

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа машиностроения

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Сборник научных трудов
Международной научно-практической конференции

21–25 ноября 2022 года

Санкт-Петербург



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2023

УДК 621
ББК 34.4
П26

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
материаловедения и технологии художественных изделий
Санкт-Петербургского горного университета *А. П. Петкова*

Доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией ресурса материалов
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *Б. С. Ермаков*

Перспективные машиностроительные технологии : сборник научных трудов
Международной научно-практической конференции, 21–25 ноября 2022 г., С.-Петербург.
– СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 519 с.

В сборнике научных трудов Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии» размещены в авторской редакции статьи, подготовленные учеными Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, а также представителями других высших учебных заведений и предприятий реального сектора экономики России, Алжира, Беларуси, Индии, Казахстана, Китая, Кыргызской Республики, Узбекистана. Сборник содержит статьи по направлениям: «Технология машиностроения», «Компьютерные технологии в машиностроении», «Конструкторско-технологические разработки триботехнического назначения», «Инновационные технологии электрофизических и электрохимических методов обработки материалов», «Машины и обработка металлов давлением», «Управление качеством в машиностроении», «Перспективные материалы и технологии».

Представленные материалы могут быть полезны специалистам, работающим в области технологии машиностроения, материаловедения, трибологии, управления качеством. Приведенные статьи в значительной степени направлены на использование преподавателями, обучающимися по программам бакалавриата, магистратуры и аспирантуры технических высших учебных заведений, инженерами, конструкторами и технологами промышленных предприятий.

Все работы публикуются в авторской редакции.

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

А. А. Попович, Д. П. Гасюк

Ответственный за выпуск – кандидат технических наук *В. Г. Теплухин*

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Попович А. А., Гасюк Д. П., научное
редактирование, 2023
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2023

ISBN 978-5-7422-8042-2



**Эталонные приборы для поверки
концевых мер длины, квадрантов,
нутромеров, индикаторов, головок,
поверочных линеек и плит,
угольников.**

**Разработчик и производитель -
Инженерно-метрологический центр "Микро"**



**Установка для поверки
концевых мер длины УКМ-100**



**Прибор для поверки
индикаторов ППИ-50**



Уровни электронные М-050



**Прибор для поверки
угольников ППУ-630**



**Прибор для поверки
головок ППГ-4**



**Прибор для поверки
квадрантов ППК**

**195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, дом 22,
литера А, помещение 10Н, офис 409
Тел. (812) 981-49-65, (812) 534-68-82
E-mail: imcmikro@mail.ru www.imcmikro.ru**



Уважаемые коллеги!

Мы рады приветствовать Вас в городе Санкт-Петербург на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2022». Наша конференция проводится впервые и предоставляет возможность коллегам обменяться результатами своих научных исследований, установить научные связи между разными научными школами, регионами, молодым ученым получить опыт публичных выступлений.

Тематика конференции охватывает широкий круг актуальных направлений машиностроения, машиноведения и материаловедения, практического использования научных результатов. Конференция вызывает большой интерес со стороны научного сообщества и представителей промышленности. На конференции представлены доклады ученых из России, Алжира, Беларуси, Индии, Казахстана, Китая, Кыргызской Республики, Узбекистана. Организатором проведения конференции выступила Высшая школа машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург.

Дорогие участники конференции! От имени Программного и Организационного комитетов желаем Вам успешной продуктивной работы, налаживания новых научных и творческих связей.

Председатель Программного комитета,
Директор Института машиностроения,
материалов и транспорта,
доктор технических наук, профессор
Попович Анатолий Анатольевич

Д.П. Гасюк, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОСНОВА РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Аннотация

В статье рассматривается вопрос развития наукоемких отечественных предприятий машиностроения в условиях импортозамещения.

Ключевые слова: информационные технологии, машиностроение, импортозамещение

В настоящее время машиностроение России представляет собой комплекс отраслей промышленности, а также интеллектуальный потенциал работников машиностроительной отрасли, изготавливающих:

- средства производства;
- транспорт;
- предметы потребления;
- оборонную продукцию.

Роль и значение *машиностроения* определяется, прежде всего, тем, что это *базовая отрасль экономики страны*, тесно взаимосвязанная с ведущими отраслями экономики и обеспечивающая их устойчивое функционирование, наполнение потребительского рынка, и являющаяся основой развития технологического ядра промышленности.

От уровня развития машиностроения зависят важнейшие удельные показатели валового внутреннего продукта страны:

- материалоемкость и энергоемкость;
- производительность труда в других отраслях народного хозяйства;
- уровень экологической безопасности промышленного производства;
- обороноспособность государства.

Социальная значимость машиностроения определяется тем, что комплекс объединяет около 7,5 тысячи крупных и средних предприятий и организаций, а также около 30 тысяч мелких, то есть около 40% от числа предприятий, состоящих на самостоятельном балансе в промышленности [1].

От развития машиностроения во многом зависит - сможет ли Россия занять ведущее место среди государств, обладающих высокотехнологичной промышленностью и производящих продукцию, конкурентоспособную на мировых рынках, или превратится в сырьевой придаток экономик развитых стран мира.

В условиях ведения рядом стран Запада санкционной политики в отношении отечественной экономики с целью ослабления и развала России объективно возникла потребность в формировании и интенсификации проведения *технической политики импортозамещения* [2 - 6].

Сущность *импортозамещения* состоит в *замещении импорта товарами, произведёнными внутри России*.

Наиболее зависимыми от импортного сырья и комплектующих оказались такие отрасли, как:

- сельское хозяйство;
- **машиностроение**;
- сфера информационных технологий.

Доля импорта для данных отраслей **составляла к 2014 году до 90 %** при производстве отдельных видов продукции. Данные перемены должны учитываться при решении конкретных вопросов планирования и организации производства машиностроения.

Развитие машиностроения, как системообразующей отрасли отечественной экономики, определяющей уровень производственного и кадрового потенциалов страны, обороноспособности государства, а также устойчивого функционирования всех отраслей промышленности, является главным фактором развития экономики России, определяющим объективную потребность в **инновационном характере** данного развития.

На инновационность характера развития отечественного машиностроения существенное влияние оказывает ряд факторов.

Прежде всего **само понимание инновации**, как технологического, технического и методологического нововведения, или новшества, реализованного в какой-либо сфере применения в виде товара, услуги, практики, метода и позволяющее создать дополнительную ценность [7].

Инновация в машиностроении рассматривается как внедрённое новшество, обеспечивающее качественный рост эффективности процессов производства или продукции, востребованное рынком. Инновация представляет собой материализованный результат, полученный от вложения капитала в:

- новую технику;
- технологии;
- формы организации производства и труда;
- обслуживание и управление производства и труда.

Примером инновации является выведение на рынок продукции с новыми потребительскими свойствами или качественным повышением эффективности производственных систем.

Причём, **инновация** - это не всякое новшество или нововведение, а только такое, которое серьёзно повышает **эффективность действующей системы машиностроения**, проявляющейся в:

- **получении результата** - продукции машиностроения с новыми потребительскими свойствами;
- **своевременности получения данного результата** на определённом временном срезе роста общественных потребностей и соответствующем уровне развития машиностроения;
- получении данного результата с наименьшими потерями (затратами).

Инновационное развитие машиностроения понимается как комплексная реализация новшеств (нововведений) в машиностроении, влияющих на общий результат его развития (технику, технологии, управление, маркетинг, обучение персонала, финансы, продажа и т.д.), позволяющая достигнуть качественно нового, более высокого уровня развития отечественного машиностроения.

Ретроспективный анализ подходов к развитию машиностроения позволяет судить о том, что наиболее существенное влияние на его развитие оказывают **инновации в технологиях** [8 - 11].

Следовательно, **существенным фактором**, определяющим интенсивность инновационного развития машиностроения, является **формирование инновационных технологий**, содержащих наборы методов и средств, поддерживающих этапы реализации нововведения, реализация которых приводит к получению:

- нового или усовершенствованного продукта, востребованного на потребительском рынке;

- или получению нового или усовершенствованного технологического процесса, используемого в практической деятельности, и приводящего к повышению эффективности хозяйственной деятельности предприятий машиностроения.

Побудительным мотивом формирования и развития инновационных технологий на современном этапе является, в первую очередь, санкционные условия развития отечественной экономики и недобросовестная конкуренция со стороны запада продукции, в том числе, машиностроения на мировом рынке. В данных условиях важным фактором, влияющим на **формирование инновационных технологий** отечественного машиностроения, является привлечение **инновационных инвестиций** [12 - 14].

В современных условиях отечественные предприятия машиностроения вынуждены искать пути сокращения издержек производства и привлечения инвестиций путём выхода на новые рынки сбыта дружественных стран Ближнего и Дальнего Востока, Африки и Латинской Америки.

Характерной чертой **инновационных технологий** является их **научоёмкость**.

Под **научоёмкостью** будем понимать объемвлеченных научных знаний и средств для достижения соответствующего социально-экономическому уровню развития общественных потребностей уровня качества продукции, необходимого и достаточного уровня производства и технологий.

Научоёмкость инновационных технологий характеризуется:

- численностью персонала;
- численностью технологических операций;
- уровнем (объемом) инвестиций;
- техническим уровнем и уровнем технической сложности продукции;
- наличием расходов на НИОКР;
- патентоспособностью продукции;
- организованностью научных разработок;
- компетентностью персонала предприятия;
- наличием в процессе изготовления организационных инноваций;
- использованием инновационных материалов;
- уровнем организационной сложности.

Необходимым условием для формирования **научоёмких инновационных технологий** является наличие НИОКР.

Для определения степени научоёмкости инновационных технологий, необходимо выделить критерии их научоёмкости.

В качестве **критерия научоёмкости инновационных технологий** может служить **процентное отношение затрат на выполнение НИОКР при формировании данной технологии к объему продаж продукции, полученной в реализации данной инновационной технологии**.

$$K_{HKM} = \frac{Z_{НИОКР}}{V_{ОП}} \times 100\%,$$

где K_{HKM} – коэффициент наукоёмкости инновационной технологии;

$Z_{НИОКР}$ – затраты на выполнение НИОКР;

$V_{ОП}$ – объем продаж в единицах стоимости.

Высокая наукоёмкость составляет 10...15% расходов на НИОКР от объема продаж. Если **коэффициент наукоёмкости** составляет более приведенных значений, возникает необходимость специального дополнительного обоснования необходимости в подобном уровне наукоёмкости инновационной технологии. В противном случае такой уровень наукоёмкости становится нерентабельным.

Следовательно, обоснованным ориентиром развития отечественного машиностроения является тот факт, что **наукоёмкие инновационные технологии**, определяющие высокотехнологичные отрасли промышленности России, должны позволить достичь отношение затрат на выполнение НИОКР к соответствующим объемам выпуска продукции в 1,2...1,5 раза, что обеспечит превышение среднемировой уровень данного критерия в машиностроении развитых стран, который составляет 3,5...4,5%.

К высокотехнологичным отраслям относят следующие отрасли:

- авиационную промышленность;
- ракетно-космическую промышленность;
- электронную отрасль;
- промышленность средств связи и радиопромышленность;
- оборонно-промышленный комплекс (ОПК);
- атомное судостроение и атомный комплекс в целом;
- химико-фармацевтическую отрасль;
- производство химических волокон и нитей;
- выпуск композитов;
- научное приборостроение;
- производство сложного медицинского оборудования и т.д.

Наукоёмкие, высокотехнологичные отрасли формируют научный сегмент (сектор высоких технологий) экономики России.

Для достижения данных показателей необходимо выделить объекты формирования технологических инноваций.

Любой процесс производства в машиностроении предусматривает три стадии:

- заготовительную;
- обрабатывающую;
- сборочную.

Рассмотрим возможные объекты обеспечения формирования технологических инноваций на каждой из них.

На **заготовительной стадии** возможно выделение следующих объектов:

- разработка в ходе выполнения НИОКР новых методов и способов получения заготовок, позволяющих реализовать ресурсосбережение;
- замена заготовок из сортового проката на заготовки, полученные обработкой металлов давлением;
- применение ротационных методов обработки металлов давлением (радиальное обжатие, накатка колец, зубьев, шлицов, резьбы и др.);
- гидроабразивная, плазменная, лазерная резка и раскрой листовых заготовок;

- замена литых заготовок на заготовки, полученные специальными способами, в том числе на основе метода создания трехмерных объектов, деталей путем послойного добавления материала: пластика, металла и других материалов. Такие трехмерные или 3D-объекты создаются с помощью 3D-принтеров (аддитивные технологии);

- применение комбинированных сварных или сварно-литых заготовок.

На обрабатывающей стадии:

- изменение структуры технологического процесса путём модернизации существующего или приобретения нового технологического оборудования;

- применение нового инструментального обеспечения технологического процесса, обеспечивающего форсирование режимов резания и снижение трудоёмкости механической обработки;

- применение "твёрдого точения" закалённых сталей вместо абразивной обработки;

- внедрение средств механизации, автоматизации, роботизации и цифровизации технологических процессов;

- реализация принципов выполнения переходов: **дифференциации** на основе использования универсальных станков; **интеграции** на основе использования станков с ЧПУ и **концентрации** на основе использования высокопроизводительных станков (продольно - фрезерных, карусельно-фрезерных, полуавтоматических и автоматических станков и др.).

На сборочной стадии:

- внедрение средств механизации и автоматизации технологических процессов сборки;

- изменение структуры технологического процесса сборки путём модернизации существующего или приобретения нового технологического оборудования.

К сложностям, возникающим в процессе инновационных наукоёмких технологий, обычно относят:

- **поиск источников финансирования** инновационных проектов;

- **подготовку высококвалифицированного** специалиста;

- **организацию работы поставщиков** по обеспечению работы нового производства;

- **создание конкурентоспособной продукции** и определение протяженности стадий её жизненного цикла;

- **обновление продукции** и организационное сопровождение программы обновления;

- **маркетинг** продукции и т.д.

Главной проблемой современного периода развития отечественного машиностроения является тот факт, что **новая техника стоит дороже, чем низко квалифицированная рабочая сила**, и дорожает значительно быстрее.

В данных условиях **технологическая модернизация** подавляющего большинства отечественных предприятий **становится экономически невыгодной**, поскольку предприятия, не использующие достижения научно-технического прогресса, имеют более низкие издержки и, следовательно, более выгодные, с экономической точки зрения, индивидуальные условия производства.

Наличие дешёвой низко квалифицированной рабочей силы породило возможность замещать машины живым трудом что в конечном итоге привело к

падению рыночного спроса предприятий на новейшие наукоёмкие средства производства.

Данное обстоятельство привело к тому, что *процесс внедрения технологических инноваций в производство на отечественных предприятиях идёт медленнее*, чем в индустриально развитых странах.

Тем не менее, *современная структура наукоёмкого сектора* отечественного машиностроения представляет собой *совокупность научного и производственного сегментов*.

Основой наукоёмкого сектора отечественного машиностроения исторически является *оборонно-промышленный комплекс*, который имеет в своем составе *предприятия с 5%-й и более высокой долей оборонной продукции (в том числе продукция двойного использования) в общем объеме разработки и производства*.

В 70-е годы прошлого столетия ОПК (в то время ВПК) обеспечивал до 50% роста экономики оборонных предприятий за счет создания новых наукоёмких базовых технологий, большинство которых было сосредоточено в военном комплексе и почти не применялось на предприятиях народного хозяйства, составляющих сектор выпуска продукции гражданского назначения.

Однако, важным историческим обстоятельством является тот факт, что именно на основе предприятий ВПК была создана научная и технологическая база современного отечественного машиностроения.

Наиболее важным фактором обеспечения формирования инновационных технологий как основы развития отечественного машиностроения является подготовка высококвалифицированных специалистов [15 – 17]. Одним из перспективных направлений подготовки таких специалистов является создание в технических ВУЗах научно-образовательных центров (НОЦ).

Главной функцией НОЦ является осуществление образовательного процесса по принципу «обучение через научно-техническую деятельность» и проведение комплексных научных исследований в приоритетных направлениях машиностроения. Взаимодействие с ведущими предприятиями приоритетных отраслей экономики, бизнесом и работодателями.

Цель НОЦ – обеспечить высокое качество профессиональной подготовки специалистов и механизмы практической реализации научно-инновационного потенциала на основе комплексного сотрудничества университета с заинтересованными предприятиями и организациями - стратегическими партнерами путем объединения интеллектуального потенциала, материальных, финансовых и корпоративных ресурсов.

Для опережающей подготовки кадров необходима интеграция образования, науки и высокотехнологичных производств. К сожалению, нынешняя система дополнительного профессионального образования является недостаточно эффективной и не в полной мере удовлетворяет потребностям развития предприятий машиностроительного комплекса.

Повышению инновационной активности и устойчивому развитию машиностроительных предприятий способствует разработка на предприятиях системы управления кадровым потенциалом, а также совершенствование системы дополнительного образования.

Функционирование данных НОЦ позволит обеспечить в условиях импортозамещения подготовку специалистов способных в близлежащей перспективе формировать *наукоёмкие инновационные технологии* отечественного

машиностроения, что, в конечном итоге, обеспечит технический уровень отечественной продукции машиностроения соизмеримый с мировыми образцами в отдельных отраслях и существенно его превосходящий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная комплексная программа развития машиностроительного комплекса России на период до 2025 года.
2. Постановление правительства РФ от 15 апреля 2014 г. №328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»
3. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
4. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н. Таможенная политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Вестник Российской таможенной академии. 2015. № 1. С. 14-19.
5. Черныш А.Я., Анисимов Е.Г. Концепция построения теории таможенного дела // Вестник Российской таможенной академии. 2009. № 3. С. 5-11.
6. Тебекин А.В., Анисимов Е.Г. О фронтах гибридной войны в экономическом и геополитическом пространстве // Журнал исследований по управлению. 2020. Т. 6. № 5. С. 60-74.
7. Анисимов В.Г. Стратегическое управление инновационной деятельностью: анализ, планирование, моделирование, принятие решений, организация, оценка / В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.]. - Санкт-Петербург, 2017. - 312с.
8. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях// Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
10. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.
11. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.
12. Ильин И.В. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И.В. Ильин [и др.]. - Санкт-Петербург, 2018. – 289 с.
13. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы. - Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006. 123 с.
14. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Ботвин Г.А., Черныш А.Я., Чечеватов А.В. Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности. - Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; 2006. 288 с.

15. Гасюк Д.П. Особенности и направления развития системы подготовки специалистов в области машиностроения в условиях импортозамещения и цифровизации экономики России // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых,- Санкт-Петербург, 2022. С. 4-12.

16. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Лихачева О.А. Методика апостериорной оценки эффективности деятельности научных и научно-педагогических подразделений высших учебных заведений // Вестник Российской таможенной академии. 2014. № 1. С. 27-32.

17. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проведение занятий в активной форме при изучении специальных дисциплин студентами машиностроительных направлений // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 18-28.

D.P. Gasyuk, D.E.Sc., Professor
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AS THE BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF DOMESTIC ENGINEERING IN THE CONTEXT OF IMPORT SUBSTITUTION

Abstract

The article deals with the development of high-tech domestic machine-building enterprises in the conditions of import substitution.

Keywords: information technology, mechanical engineering, import substitution

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.3

Ван Цзыси, Ли Цзылинь, Чэнь Жуй, Ияо Цзакан, Гуо Тэнда, Ли Дэцай
State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering,
Университет Цинхуа, Пекин, Китай, zxwang@tsinghua.edu.cn

ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИИ ПОДШИПНИКОВ ЛЕВИТАЦИИ (МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ И ПОДШИПНИКОВ ИЗ ФОЛЬГИ)

Аннотация

В работе представлен теоретический и технологический прогресс в исследовании подшипников левитации. Основными темами и направлениями работы является разработка высокоскоростного прецизионного электрического шпинделя с магнитными подшипниками, повышение надежности при падении мощного ротора с магнитной левитацией и разработки страховочного подшипника, а также разработка новых типов подшипников из фольги.

Ключевые слова: подшипник левитации, магнитный подшипник, подшипник из фольги, высокоскоростной электрический шпиндель, страховочный подшипник.

Введение

В настоящее время научно-исследовательские учреждения и организации мира провели обширные исследования, посвященные принципам действия, рабочим характеристикам и способам проектирования подшипников левитации. Особое внимание в работах уделяют новым требованиям к повышению высокой удельной мощности и высокой надежности магнитных подшипников и подшипников из фольги в энергетическом оборудовании и прочих вращающихся механизмах. Важно и необходимо разработать подшипники с такими особенностями, как высокая скорость, высокая точность, высокий КПД, высокая удельная мощность, высокая рабочая температура, длительный срок службы и т. д. Исследования подшипников левитации сталкиваются с рядом теоретических и технических проблем, в том числе: переход критической скорости высокоскоростного ротора с магнитной левитацией, обеспечение безопасности и надежности при падении мощного ротора с магнитной левитацией, достижение высокоскоростных и высокотемпературных характеристик подшипников из фольги. В данной работе обобщены результаты исследований в рамках проекта Национального плана исследований и разработок Китая (2018YFB2000100), выполняемого командой под руководством профессора Ли Децай из Университета Цинхуа.

1. Прогресс в исследовании магнитных подшипников

1.1. Разработка высокоскоростного прецизионного электрического шпинделя

В последнее время, с целью увеличения скорости вращения и повышения удельной мощности, требования к роторам со сверхкритической скоростью вращения

становятся все более строгими. Особое внимание исследователей гибких роторов с магнитными подшипниками было сосредоточено на изучении принципов колебания роторов со сверхкритической скоростью вращения и проектировании контролирующих устройств роторов со сверхкритической скоростью вращения. Многие результаты исследований по роторам со сверхкритической скоростью вращения получили практическое применение и показали высокую эффективность и надежность, однако, остаются серьезные технические проблемы при изучении магнитных подшипников.

Целью исследований является разработка высокоскоростного прецизионного электрического шпинделя с точностью при вращении после перехода критической скорости не более 3 мкм (при рабочей скорости не менее 70000 об./мин.).

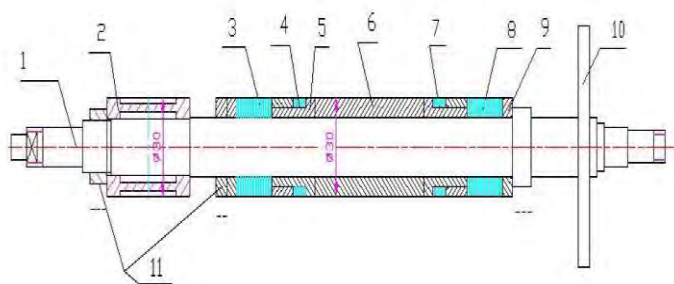
Для этого были изучены следующие научные и технологические вопросы [1-2]:

(1) Динамические характеристики поведения и механизм стабилизации гибкого ротора с магнитной левитацией при многофакторной связи;

(2) Метод моделирования высокоточной динамической модели для гибкой роторной системы с замкнутым контуром;

(3) Методика контроля вибрации с целью получения высокой надежности и точности для сверхкритической роторной системы с магнитной левитацией.

На основе результатов исследований были спроектированы и изготовлены соответствующие компоненты электрического шпинделя (См. рисунок 1): ротор, электромагниты, система управления с программным обеспечением. Часть параметров приведена в таблице 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Прецизионный электрического шпиндель с магнитной левитацией: а) 1 - сердечник вала, 2 - ротор двигателя, 3 – ротор переднего магнитного подшипника, 4 - ротор переднего датчика, 5 - кольцо из нержавеющей стали, 6 - алюминиевое кольцо, 7 - ротор заднего датчика, 8 - ротор заднего магнитного подшипника, 9 - кольцо из нержавеющей стали, 10 - упорная пластина, 11 - балансировочное кольцо; б) фотография макета

В рамках работы был спроектирован и реализован специальные стенд проверки точности ротора и стенд испытания электрического шпинделя. Результаты испытаний следующие: максимальная скорость 70800 об./мин. (1180 Гц), стабильная рабочая скорость 70100 об./мин. (1168,33 Гц), пиковое положение при критической скорость: 50400 об./мин. (840 Гц), вибрация: менее 3 мкм.

1.2 Повышение надежности при падении мощного ротора с магнитной левитацией

Проблема, связанная с безопасностью при падении тяжелого высокоскоростного ротора, является крайне актуальной. При высокой скорости вращения ротор имеет высокую кинетическую энергию, и прогнозирование его падения является сложной задачей. Вероятность падения ротора, хоть и очень невелика, но все равно остается. Падение ротора может привести к серьезному повреждению технического оборудования в целом. Для надежной работы высокоскоростных магнитных подшипников необходимо обеспечить достаточную надежность при падении ротора. Были проведены исследования систем защиты подшипников. Страховочные подшипники являются последним барьером защиты высокоскоростных роторов с магнитной левитацией, и должны обладать достаточной устойчивостью к удару. Необходимо не только выяснить траекторию падения ротора, но и определить количественное влияние падения на срок службы страховочных подшипников, а для этого целесообразно обосновать механизм возникновения местного нагрева при падении ротора и связь между накоплением поверхностных повреждений и количеством падений.

Таблица 1 – Конструктивные параметры электрического шпинделя

Параметры	Значение
Общий вес ротора, кг	3,5
Номинальная скорость, об./мин.	70000
Максимальная осевая электромагнитная сила при положении равновесия, Н	300
Максимальная радиальная электромагнитная сила при положении равновесия, Н	200
Воздушный зазор радиального магнитного подшипника, мм	0,3
Радиальный защитный воздушный зазор, мм	0,1
Воздушный зазор осевого магнитного подшипника, мм	0,4
Осевой защитный воздушный зазор, мм	0,2
Уровень динамического баланса ротора	G1,0
Зазор датчика, мм	0,3
Напряжение на шине магнитного подшипника, В	48
Максимальная рабочая температура окружающей среды, °С	80

Целью исследования является разработка страховочного подшипника для вертикального ротора гелиевого нагнетателя главного насоса АЭС. Вес ротора составляет 3 тонны. Страховочному подшипнику нужно выдержать падение более 10 раз без повреждения ротора при его скорости вращения 3000 об./мин.

Для изучения и анализа динамического поведения падения вертикального ротора была создана многомерная модель, учитывающая связи между динамикой, термодинамикой и повреждением поверхности на основе нелинейной теории ударов Герца, теории термодинамики и теории трибологии поверхности. Модель позволяет уточнить силовые и тепловые воздействия страховочного подшипника в условиях падения [3-5]. Была создана программа для расчета динамико-теплого режима страховочного подшипника для вертикального ротора, были оптимизированы конструкции страховочного подшипника и системы оси. Результаты расчета сверялись и корректировались с экспериментальными данными, полученными на лабораторном стенде падения ротора с магнитными подшипниками.

Специфическим требованием к разрабатываемому страховочному подшипнику, работающему в установке АЭС, является отсутствие какой-либо жидкой или жирной смазки. В связи с этим был разработан самосмазывающийся керамический материал $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}_{0,3}\text{N}_{0,7}$ с высокой прочностью и высокой рабочей температурой для изготовления шариков подшипника [6].

Были изготовлены страховочные подшипники (См. рисунок 2) с внутренним диаметром 190 мм, внешним диаметром 260 мм и шириной 33 мм. На испытательном стенде проведены испытания по падению ротора после отключения системы управления магнитных подшипников. Страховочный подшипник выдержал 10-кратное падение ротора без повреждения самого подшипника и ротора. Основные параметры стенда следующие: Масса ротора 3120 кг, длина ротора 3 м, частота вращения 3000 об./мин, мощность двигателя 4500 кВт. Осевой и радиальный зазоры между страховочным подшипником и положением равновесия 0,3 мм.

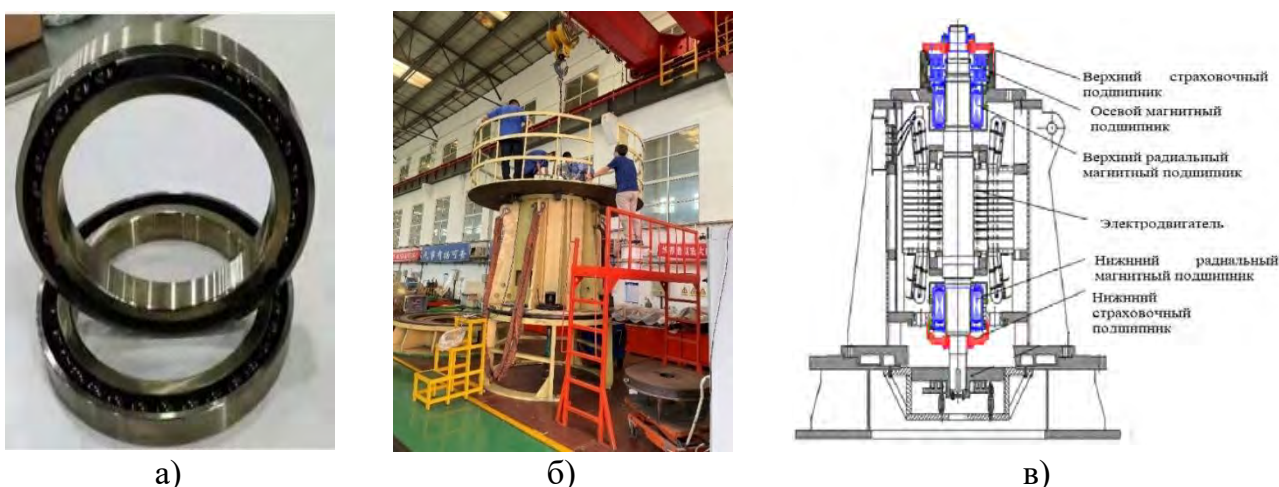


Рисунок 2 – Страховочные подшипники и испытательный стенд: а) страховочный подшипник; б) испытательный стенд; в) схема испытательного стенда

2. Прогресс в исследовании подшипников из фольги

Проблемы, связанные с высокоэффективными газодинамическими подшипниками из фольги, стали более актуальными. Создание высокоэффективного энергетического оборудования требует разработки подшипников из фольги с более высокой радиальной несущей способностью ($\geq 0,6$ МПа), с более высокой осевой несущей способностью ($\geq 0,4$ МПа), и с более высокой рабочей температурой (≥ 650 °С).

В рамках исследований по данной работе были уточнены принципы взаимодействия между газовой пленкой и эластичной конструкцией фольги на различных стадиях действия подшипника ротора. А также изучены принципы смазывания в подшипниках из фольги с целью уточнения спроектированной модели для прогнозирования силового и термического взаимодействия между газовой и твердой средой подшипников. Проанализированы работы и характеристики полного цикла Взлета-Эксплуатации-Нестабильности. Предложены методики проектирования конструкции подшипников из эластичной фольги [7-8].

Для эффективного определения ключевых параметров подшипников из фольги в условиях работы на сверхвысоких скоростях и конструктивных ограничений, были предложены новые методы испытаний переходных характеристик фольги и подшипника в целом. Были созданы стенды для измерения в режиме реального

времени важных параметров, таких как радиальное биение ротора, момент трения подшипника, несущая способность, частота вращения, температура подшипника и т.д., а также рабочее состояние фольги.

В процессе изготовления эластичные фольги прессуются и из-за пластической деформации и релаксации материала в процессе прессования возникают такие проблемы, как неравномерная толщина и изменение размеров сформированной фольги. Для решения этой проблемы был изучен механизм упругопластического релаксации в процессе формования фольги, предложен алгоритм коррекции компенсации релаксации, разработаны формы с равномерной пластической деформацией и контролируемым запасом релаксации и отлажены ключевые технологии изготовления фольги и подшипника.

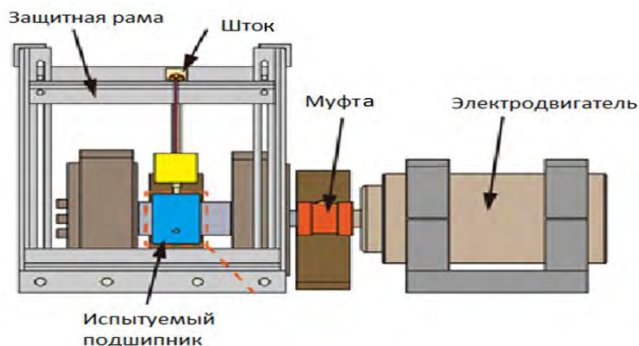
Были разработаны и испытаны два новых типа подшипников (См. рисунок 3): радиальный подшипник из фольги тиа J45 со скоростью 46000 об./мин, нагрузкой 1220 Н и несущей способностью 0,6 МПа; упорный подшипник из фольги тиа Т66 со скоростью 40000 об./мин, нагрузкой 1075 Н и несущей способностью 0,42МПа.



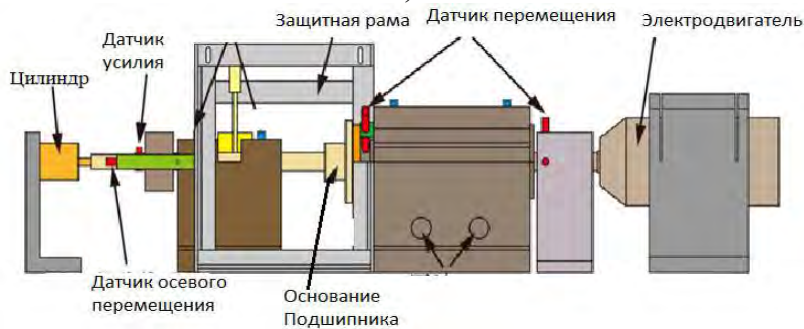
а)



в)



б)



г)

Рисунок 3 – Подшипники из фольги и схема испытательного стенда:

- а) радиальный подшипник из фольги тиа J45; б) схема испытательного стенда для радиального подшипника из фольги; в) упорный подшипник из фольги типа Т66; г) схема испытательного стенда для упорного подшипника из фольги

Износ материала фольги при высоких температурах резко возрастает. Для снижения трения и износа фольги на этапе пуска-остановки подшипника были изучены принцип смазки и механизм отказа при износе покрытия во время эксплуатации подшипника [9]. Было разработано высокотемпературное твердое смазочное покрытие со следующими параметрами: рабочая температура до 650 °С, коэффициент трения покрытия не более 0,25 при комнатной температуре до 650 °С, скорость износа не более 2×10^{-4} мм³/Нм, сила сцепления покрытия с подложкой не менее 50 МПа. Покрытие было нанесено на радиальном подшипнике из фольги типа

J45-T со следующими параметрами: скорость вращения 40000 об./мин, нагрузка до 300 Н. Подшипник (См. рисунок 4) был испытан на лабораторном стенде и на микротурбинном стенде, и показал хорошие смазывающие свойства и эффективное снижение износа при температурах 623-673°C.

Заключение

В результате проведенных исследований получен значительный теоретический и технологический прогресс в процессе исследования подшипников левитации, в направлении разработки высокоскоростного прецизионного электрического шпинделя с магнитными подшипниками, повышении надежности при падении мощного ротора с магнитной левитацией и разработке страховочного подшипника, а также разработке новых типов подшипников из фольги. Данные результаты способствуют расширению промышленного применения подшипников левитации в различных отраслях.



а)



б)

Рисунок 4 – Высокотемпературный подшипник из фольги и схема испытательного стенда: а) высокотемпературный радиальный подшипник из фольги тиа J45-T; б) схема испытательного стенда для высокотемпературного радиального подшипника из фольги;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang, C.Y. International Symposium on Software Reliability, Industrial Safety, Cyber Security and Physical Protection for Nuclear Power Plant / C.Y. Wang, Y. Xu, K. Zhang, // Nuclear Power Plants: Innovative Technologies for Instrumentation and Control Systems: The Sixth International Symposium on Software Reliability, Industrial Safety.- 2022. - P.104-23.
2. Zhang, X. Analysis of supercritical pitchfork bifurcation in active magnetic bearing-rotor system with current saturation / X. Zhang, Z. Sun, L. Zhao, // Nonlinear Dyn. -2021. - V. 104. - P. 103-123.
3. Li, Z. Dynamic and Thermal Investigations of the Forward Dry-Friction Whirl/Whip of a Vertical Rotor-AMB System during Touchdowns / Z. Li, M. Lyu, G. Yang, // Actuators. -2022. - V. 11. - № 10. - P. 291.
4. Lyu, M. A control method of the rotor re-levitation for different orbit responses during touchdowns in active magnetic bearings / M. Lyu, T. Liu, Z. Wang, // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2018. - V. 105. - P. 241-260.

5. Su, Y. Nonlinear dynamic simulation and parametric analysis of a rotor-AMB-TDB system experiencing strong base shock excitations / Y. Su, Y. Gu, P.S. Keogh, // *Mechanism and Machine Theory*. - 2021. - V. 155.- P. 104.
6. Liu, J. TiO₂-supported 2D layered carbon derived from CO₂ oxidation Ti₃C₂ for strengthening Si₃N₄ ceramic / J. Liu, Z. Wang, J. Yang, // *Materials Letters*. - 2019. - V. 256. - P. 126646.
7. Hou, Y. Application of Gas Foil Bearings in China / Y. Hou, Q. Zhao, Y. Guo, // *Applied Sciences*. - 2021. - V. 11.- P. 11136210.
8. Guan, H. Experimental and theoretical investigation of rotordynamic characteristics of a rigid rotor supported by an active bump-type foil bearing / H. Guan, K. Feng, Y. Cao, // *Journal of Sound and Vibration*. -2020. - V. 466.- P. 115049.
9. Shi, P. Microstructure and tribological behavior of a novel atmospheric plasma sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy matrix self-lubricating composite coatings / P. Shi, Y. Yu, N. Xiong, // *Tribology International*. -2020. - V. 151.- P. 106470.

Zixi Wang, Zilin Li, Rui Chen, Jiakang Yao, Tengda Guo, Decai Li
State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering,
Tsinghua University, Beijing, China, zxwang@tsinghua.edu.cn

PROGRESS IN THE STUDY OF SUSPENSION BEARINGS (MAGNETIC BEARINGS AND FOIL BEARINGS)

Abstract

The paper presents theoretical and technological progress in the study of suspension bearings. The main topics and directions are the development of a high-speed precision electric spindle with magnetic bearings, increasing reliability in falling of a powerful rotor with magnetic levitation and the development of a touchdown bearing, as well as the development of new types of foil bearings.

Keywords: Magnetic bearing, foil bearing, high-speed electric spindle, touchdown bearing.

Я.Ю. Бровкина, Д.Н. Шабалин, И.И. Козарь, А.В. Петров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, zoom87@list.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА И ПОВЫШЕНИЯ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ КРУГОВ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности процесса шлифования и повышения периода стойкости кругов за счет снижения сил трения. На основе статистических исследований была подобрана оптимальная СОЖ, при которой коэффициент трения круга с заготовкой минимален.

Ключевые слова: керамика, реакционно-спеченный карбид кремния, режущие вершины зерен, алмазное шлифование, алмазосодержащее пространство, технология механической обработки, коэффициент трения.

Введение

Жидкости, используемые при обработке технической керамики, имеют смазочное, охлаждающее и режущее действие [1].

Для повышения производительности шлифования и стойкости круга, действие смазочно-охлаждающей жидкости должно заключаться в хорошем охлаждении заготовки и способности удаления перемешанной смеси шлифовальной стружки, мелких частиц, абразива и связующего вещества, полученных при шлифовании, благодаря чему можно наблюдать уменьшения температуры заготовки в зоне обработки и улучшению частоты шлифованной поверхности. Наибольшему воздействию жидкости подвергается поверхностный слой шлифуемой заготовки, в котором образуется большое число высокотемпературных очагов, являющихся результатом массового царапания зернами круга поверхности керамики, на высоких скоростях. Охлаждающая жидкость более благоприятные условия работы абразивного зерна и уменьшает вероятность получения большого числа глубоких (нерегулярных) рисок путем очищения зоны шлифования и круг от отходов шлифования, чем способствует повышению частоты шлифованной поверхности [2].

В работах [3-7] упоминалось, что охлаждающая жидкость также оздоравливает условия труда, осажая пыль, образующуюся при шлифовании. Охлаждающая жидкость должна обладать некоторым смазочным эффектом, необходимым для уменьшения трения абразивных зерен и связки круга о шлифуемую поверхность.

При обработке технической керамики алмазные шлифовальные круги сравнительно быстро теряют свои режущие свойства. Это связано с засаливанием поверхности кругов, а также с затуплением режущих элементов зерен. Известно, что чем выше твердость технической керамики, тем ниже стойкость круга при обработке [8]. В некоторых случаях обработки период стойкости (время между 2 правками) мал, и круг приходится править часто. Вследствие чего время на обработку детали увеличивается. В связи с этим были исследованы и предложены методы уменьшения

количества правок и повышения периода стойкости кругов за счет использования различных СОЖ.

Цель данного исследования – определить оптимальную СОЖ, при которой коэффициент трения круга с заготовкой будет минимальным.

Силы трения оказывают существенно влияние на зерна кругов в процессе работы. Под их действием происходит нагрев вершин алмазных зерен, что может привести к граффитизации.

На основе вышесказанного, были сформулированы основные требования к охлаждающей жидкости применяемой при шлифовании:

1) высокие охлаждающие свойства, наличие смазывающего эффекта и активизация процесса снятия стружки, способствующие повышению чистоты шлифованной поверхности и производительности шлифования;

2) предохранение шлифуемой детали и механизмов станка от коррозии;

3) стойкость в работе (не должна разлагаться);

4) отсутствие каких-либо вредных для рабочего свойств и неприятного запаха;

5) быстрое осаждение отходов шлифования на дно бачка во избежание попадания этих отходов (через насос) обратно в зону шлифования.

Материал и метод исследований

Исследования проводились на плоскошлифовальном станке 3Л722-70 с использованием абразивного инструмента следующего типа: 1А1 300×20×6×127 В2-01 100 % АС6 125/100. Обрабатываемая деталь: заготовка осевого подшипника погружного насоса для добычи и перекачки нефти (рис. 1а) – наружный диаметр до 600 мм. Материал заготовки - реакционно-спеченный карбид кремния (рисунок -1б), обладающие следующими свойствами: предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ 450 МПа, трещиностойкость K_{Ic} 4,0 МПа·м^{1/2}, плотность ρ 3,11 г/см³, твердость ГПа 33.

Точность размеров деталей соответствует 7 качеству, шероховатость поверхности Ra=0,4 мкм.

Параметры шероховатости Ra шлифованной поверхности измеряли с использованием прибора «PCE-RT-1200». Анализ морфологии поверхности и структуры поверхностного слоя изучали с применением электронного микроскопа Supra 40 VP, Karl Zeiss.

Для исследования были выбраны следующие СОЖ: Велс-1, Велс-1М, Ровел, НГЛ-205, Дисульфид молибдена.

Индивидуальный бак станка объемом 80 литров был очищен, промыт 1%-ным раствором кальцинированной соды и заполнялся поочередно сначала раствором СОЖ Велс-1, Велс-1М, Ровел, НГЛ-205, Дисульфид молибденом.

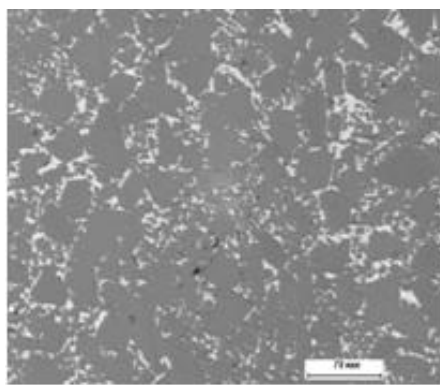
Предварительно шлифованные заготовки приклеивают на нагретый до температуры 363...373 К рабочий сменный стол станка, смазанный парафино-канифольевым клеем. Количество закрепляемых заготовок в зависимости от габариторазмеров равно 18...20 шт/стол (рис. 2). Затем сменный стол устанавливается на магнитный стол станка.

Шлифование происходит периферией алмазного круга при следующих режимах: продольная подача $S_{прод} = 5 \div 15$ м/мин, поперечная подача $S_{попереч} = 0,5 \div 1,5$ мм/ход, глубина шлифования $t = 0,04 \div 0,08$ мм. Скорость круга во всех экспериментах оставалась постоянной, $v_{кр} = 30$ м/с.



а

Рисунок 1 – а) подшипник погружного насоса для добычи и перекачки нефти; б) микроструктура реакционно-спеченного карбида кремния



б



Рисунок 2 – закрепляемые заготовки на сменном столе

Полученные результаты

В таблице 1 приведены исследования снижение сил трения за счет применения специальных СОЖ.

Таблица 1 - Снижение сил трения за счет применения специальных СОЖ.

СОЖ	Период стойкости			
	t ₁ , мин	t ₂ , мин	t ₃ , мин	t _{ср} , мин
Велс-1	7	12	10	9,67
Велс-1М	14	12,5	16	14,17
Ровел	21	18	24	21
НГЛ-205	22	23	27	24
Дисульфид молибдена	12	14	13	13

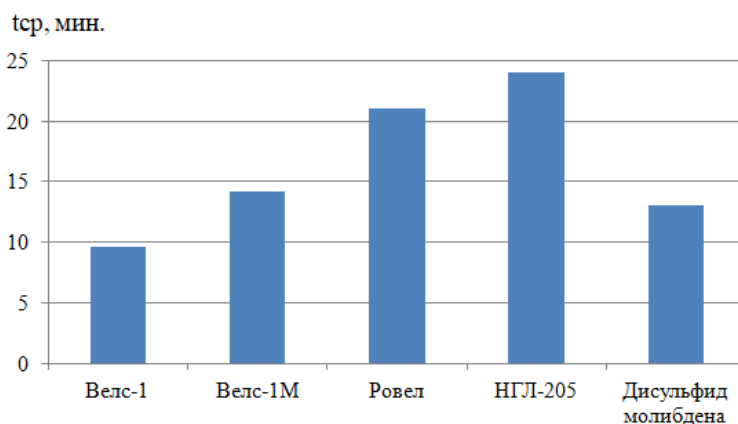


Рисунок 4 – Период стойкости кругов в зависимости от применяемых СОЖ

Выводы

Результаты проведенных исследований представлены в виде графика на рис. 4. Откуда видно, что для шлифования радиоспеченного карбида кремния, наиболее подходит СОЖ НГЛ-205. Период стойкости работы круга 1А1 с данным СОЖ при обработке РКК наиболее продолжителен и достигает 24 минут. Наибольшее приращение периода стойкости наблюдалось при работе с Велс — 1М, до 49%.

Также при испытаниях выявлено, что все исследуемые СОЖ обладают

хорошими моющими свойствами. На всех обрабатываемых деталях отсутствовал жировой налет. На деталях и узлах станка отсутствовали скопления шлака. При этом шлак, попавший в бак, всплывал, что позволяло его удалять без особых затруднений.

Коррозия и прижоги на кольцах во время испытания отсутствовали. Вредных воздействий не выявлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитков Н.В., Шабалин Д.М., Ковеленов Н.Ю. Расчет режимов резания при алмазном шлифовании заготовок из твердохрупких материалов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного Политехнического университета – 2012. №3-2(154). – С. 155-159.

2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов, Машиностроение, 1974. – 320 с.

3. Любомудров С.А., Хрусталева И.Н., Толстолес А.А., Маслаков А.П. Повышение эффективности технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства на основе имитационного моделирования // Записки Горного института – 2019. Т. 240. С. 669-677.

4. Teplukhin, V.G., Tsvetkov, A.S., Popov, A.I., Shabalin, D.N. Carbide formation in the niobium-microalloyed 15KH2Mfa steel during heat treatment (2020) AIP Conference Proceedings, 2315, статья № 040045.

5. Zhukov, E.L., Kozar, I.I., Olodyazhniy, D.Y. Problems of ensuring quality of a surface layer when producing components from hard-to-process heat resistant alloys (2016) Acta Metallurgica Slovaca, 22 (2), pp. 128-132.

6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

7. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

8. Бровкина Я.Ю., Шабалин Д.Н., Никитков Н.В. Плотность вершин алмазных зерен на поверхности кругов, шлифующих твердые материалы на станках с ЧПУ // Металлообработка – 2019. №5(113). – С. 11-18.

Ya.Yu. Brovkina, D.N. Shabalin, I.I. Kozar, A.V. Petrov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

METHODOLOGY FOR STUDYING THE PARAMETERS OF A DIAMOND GRINDING WHEEL AND INCREASING THE DURABILITY PERIOD OF CIRCLES BY REDUCING FRICTION FORCES DURING PROCESSING OF TECHNICAL CERAMICS

Abstract

The article discusses the issues of increasing the efficiency of the grinding process and increasing the durability period of the circles by reducing the friction forces. Based on statistical studies, the most optimal coolant was selected, at which the coefficient of friction of the circle with the workpiece is minimal.

Keywords: ceramics, silicon nitride, cutting grain tops, diamond grinding, diamond-containing space, machining technology, coefficient of friction.

П.В. Бурдин¹, С.В. Михайлов^{1,2}, Н.Ю. Ковеленов^{1,3}¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия²Костромской государственной университет, Кострома, Россия³ООО «Вириал», Санкт-Петербург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗЦАМИ СО СМЕННЫМИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Аннотация

Разработан математический аппарат для решения задач оптимизации технологических условий резания инструментом с криволинейной передней поверхностью с учетом завивания и дробления сливной стружки

Ключевые слова: резание материалов, токарная обработки, сменные многогранные пластины, стружкодробление, расчет режимов резания.

Введение

В настоящее время в условиях автоматизированной токарной обработки материалов применяются сборные резцы, оснащенные сменными многогранными пластинами (СМП) с криволинейной стружкозавивающей поверхностью. Сложнопрофильная передняя поверхность пластины стабилизирует процесс резания и обеспечивает дробление стружки в процессе обработки материалов. Вместе с тем создание на передней поверхности стружкозавивающих элементов ограничивает диапазон технологических возможностей пластин, что необходимо учитывать при назначении оптимальных условий эксплуатации инструмента. Проблема назначения оптимальных режимов резания материалов групп ISOP, M, S с учетом получения благоприятной формы стружки относится к числу актуальных.

Методы и результаты исследований

Методика назначения обоснованных режимов резания включает выбор критерия оптимизации и поиск оптимальных условий с учетом технических ограничений для операции точения. В качестве критерия оптимизации распространение получил критерий минимальной технологической себестоимости обработки. Его использование позволяет построить технологический процесс с минимальными затратами на оборудование, инструмент, заработную плату рабочего [1 - 8].

Зависимость себестоимости удаления единицы объема припуска от режимов резания имеет вид:

$$C_{уд} = \frac{E}{vst} + \frac{(W + ET_{см})v^{n-1}s^{y_T-1}t^{x_T-1}}{C_T}, \quad (1)$$

где E – себестоимость эксплуатации оборудования за минуту, руб/мин; W – затраты, связанные с приобретением, хранением и сменой инструмента, отнесенные к одному периоду стойкости, руб; $T_{см}$ – время на снятие изношенного инструмента и

подналадку, мин; n , x_T , y_T , C_T - коэффициенты и показатели степени зависимости стойкости от режимов резания [9].

В декартовых осях координат зависимость удельной себестоимости от подачи и скорости резания представляет собой поверхность типа оврага, с локальными минимумами в поперечных сечениях. При этом функция (1) абсолютного глобального минимума не имеет. Поэтому оптимальное сочетание режимов резания зависит от технических ограничений операции точения и находятся на границах некоторого блокирующего контура.

Критерий оптимальности для функции (2) имеет вид:

$$C_{y\partial} = f(v, s) \rightarrow \min \quad (2)$$

Ограничивающими факторами режимов резания являются кинематические возможности станка, мощность оборудования, устойчивость технологической системы СПИЗ, прочность режущего инструмента, параметры точности, качество поверхностного слоя и др. Важным техническим ограничением режимов резания для токарных операций инструментом с СМП является ограничение по стружкодроблению.

При обработке материалов резанием форма стружки и вероятность ее дробления определяется процессами, протекающими в зоне стружкообразования. Основными параметрами, характеризующими состояние зоны стружкообразования, являются: угол наклона условной плоскости сдвига, коэффициент утолщения стружки, длина пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента, угол схода и радиус кривизны стружки в главной секущей плоскости. Изучение взаимосвязи указанных параметров при резании инструментом с криволинейной передней поверхностью позволяет понять причины образования различных форм стружек, устанавливать взаимосвязи и управлять выходными характеристиками резания, в том числе завиванием и дроблением стружки.

В результате экспериментальных исследований подтверждены выводы о том, что причиной естественного завивания стружки являются неоднородные пластические деформации по толщине срезаемого слоя. При этом кривизна стружки напрямую не зависит от коэффициента утолщения стружки и связанного с ним угла наклона условной поверхности сдвига.

Приняв гипотезу слабой взаимосвязи между углом наклона поверхности сдвига и радиусом кривизны стружки можно применить упрощенную модель зоны резания с единственной плоскостью сдвига для вывода расчетных выражений усадки стружки через силовые характеристики резания.

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_1 = \arctg\left(\frac{P_z}{\tau_p \cdot a_1 \cdot b_1} - \operatorname{tg}(i_0)\right) \\ R_n = \frac{(L-l)}{\operatorname{tg}(\psi/2)} \\ l = 2,4 \frac{(1 + \operatorname{tg}\beta_1^2)(1 - a_1/R_n)^{0,912} e^{(-3,958a_1/R_n)}}{\operatorname{tg}\beta_1 (\cos \gamma(1 + \operatorname{tg}\beta_1) - \sin \gamma(1 - \operatorname{tg}\beta_1))}, \end{array} \right. \quad (3)$$

Исследования показывают, что дробление стружки происходит в результате ее распрямления при взаимодействии с препятствиями, возникающими на ее пути.

Величина критического радиуса распрямления, при котором происходит ее дробление на элементы, зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, начального радиуса кривизны, толщины и ширины стружки. Для цилиндрической стружки величина критического радиуса кривизны равна:

$$R_{кр} = 0,5a_2 + \left(\frac{1 + \sigma_T / E}{R_0 - 0,5a_2} - \frac{\sigma_T}{0,5a_2 E (0,086 - 0,11\delta)} \right)^{-1} \quad (4)$$

где a_2 – толщина стружки; R_0 – наружный радиус кривизны винтовой стружки; E , σ_T – модуль упругости и предел текучести материала стружки; δ – относительное остаточное удлинение при разрыве.

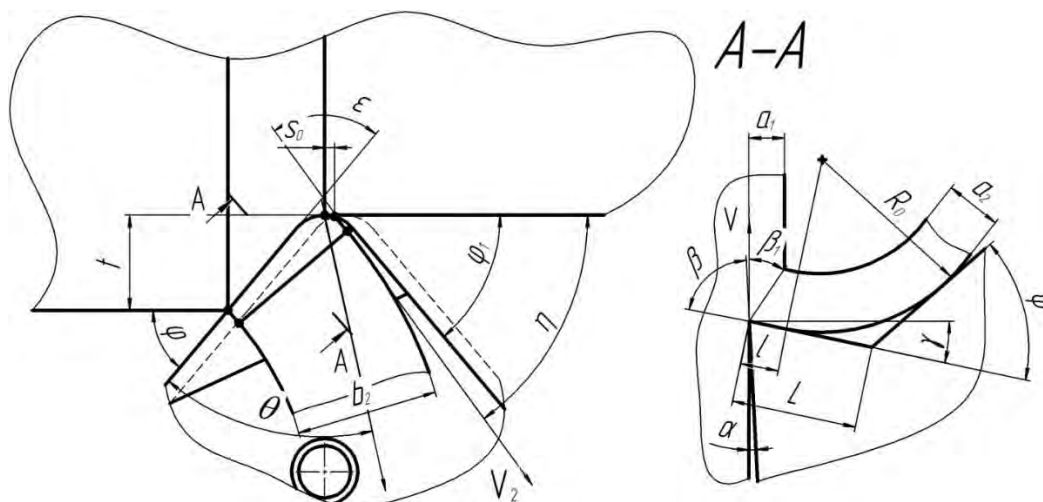


Рисунок 1 – Схема резания сборным резцом с СМП

Толщина стружки связана с подачей по формуле:

$$a_2 = k_a s \sin \varphi, \quad (5)$$

где k_a – коэффициент утолщения стружки, φ – главный угол в плане.

Условие надежного стружкодробления может быть представлено в виде следующего ограничения:

$$R_{кр} \leq C_R R_0 \quad (6)$$

Радиус кривизны стружки R_0 в момент ее схода зависит от формы стружкозавивающих элементов пластины (таблица 1).

Например, для схемы №1, показанной в Таблице 1:

$$R_0 = \frac{(L - l_k)}{\operatorname{tg}(\psi / 2)}, \quad (7)$$

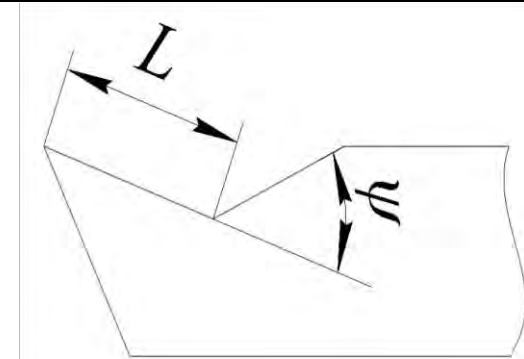
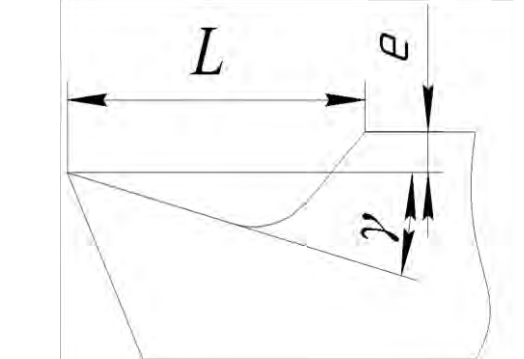
где L , ψ – параметры геометрии стружкозавивающей поверхности; l_k – длина контакта стружки с передней поверхностью пластины. Аналитическая зависимость длины контакта от режимов процесса точения дана в работе [10].

Теоретические исследования влияния режимов резания и геометрии передней поверхности СМП на завивание и дробление стружки подтвердили адекватность полученных выражений (рисунок 2).

Согласно исследованиям с увеличением расстояния стружкозавивающего элемента от режущей кромки L радиус кривизны стружки монотонно увеличивается,

при увеличении угла наклона стружколома ψ радиус кривизны стружки уменьшается, с увеличением глубины резания и подачи радиус кривизны стружки уменьшается, а с увеличением скорости резания –увеличивается.

Таблица 1 – Аналитические выражения для расчета радиуса кривизны стружки для различных форм канавок

№	Схематичное представление стружколомающей канавки	Аналитическая формула
1		$R = \frac{L-l}{\operatorname{tg}(\psi / 2)}$
2		$R = \frac{1}{2 \cdot \sin \gamma_K} \cdot \left(\frac{l^2}{L} \cdot \cos(\gamma_K - \gamma) + \frac{L}{\cos(\gamma_K - \gamma)} - 2 \cdot l \cdot \cos \gamma_K \right)$ где $\gamma_K = \gamma + \operatorname{arctg} \left(\frac{e}{L} \right)$

Решая систему выражений (1 – 7) относительно режимов резания получим ограничение по стружкодроблению в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{kp} \leq C_R R_n \\ R_{kp} = l_0 + \left(\frac{1 + \sigma_T / E}{R_0 - l_0} - \frac{\sigma_T}{E \cdot y_{\max} \cdot (0,086 - 0,11\delta)} \right)^{-1} \\ R_n = \frac{(L-l)}{\operatorname{tg}(\psi / 2)} \\ \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{10 C_{pz} t^{x_z} s^{y_z} v^{n_z} K_p}{\tau_p \cdot a_1 \cdot b_1} - \operatorname{tg}(i_0) \\ l = 2,4 \frac{(1 + \operatorname{tg} \beta_1^2)(1 - a_1 / R_n)^{0,912} e^{(-3,958 a_1 / R_n)}}{\operatorname{tg} \beta_1 (\cos \gamma (1 + \operatorname{tg} \beta_1) - \sin \gamma (1 - \operatorname{tg} \beta_1))} \end{array} \right. \quad (8)$$

Графическое представление технологического ограничения по надежному стружкодроблению в координатах s, v при постоянной глубине резания t получим из решения выражений:

$$\begin{cases} F(s, v) = 0 \\ F(s, v) = R_{кр}(s, v) - C_R R_n(s, v), \text{ где } s \in [s_1, s_2], v \in [v_1, v_2] \end{cases} \quad (9)$$

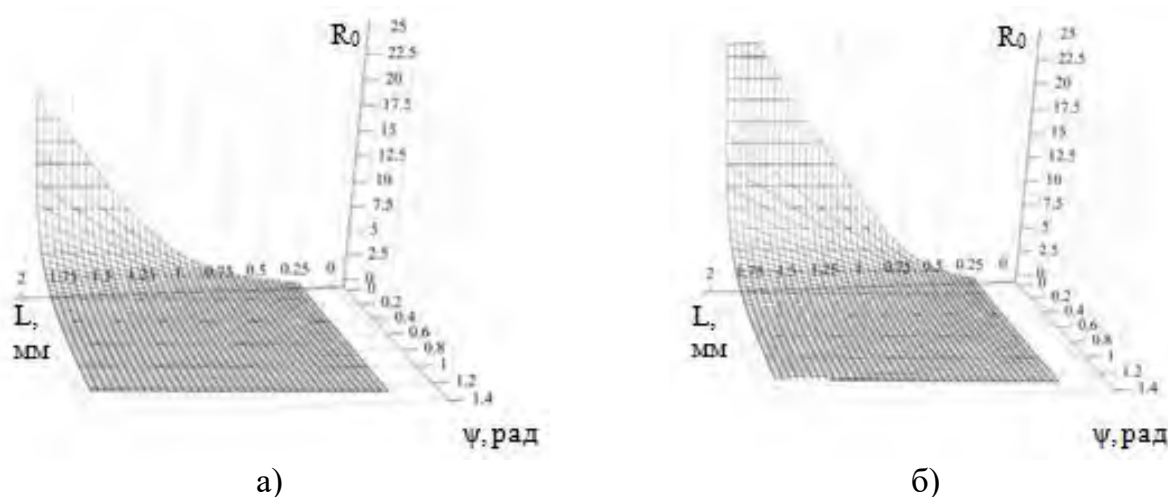


Рисунок 2 – Исследование влияния геометрических параметров стружкозавивающего элемента и режимов резания на радиус кривизны стружкиб Сталь 45- Т15К6, передний угол 15 град: а) $t=2,0$ мм, $s=0,2$ мм, $v=200$ м/мин; б) при $t=1,5$ мм, $s=0,2$ мм, $v=400$ м/мин

Второе ограничение для инструментов со стружкозавивающей поверхностью связано с определением условий благоприятного стружкообразования, не вызывающего резкого увеличения сил резания. Предельное минимальное значение радиуса естественного завивания стружки, начиная с которого наблюдается рост сил резания, соответствует наиболее энергетически эффективным условиям резания:

$$R_{onm} = 0,0357 a_1 \left(\frac{1 + \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \gamma} \right)^{3,46} \exp \left(\frac{5,87(\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \gamma)}{1 + \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma} \right), \quad (10)$$

где $\operatorname{tg} \beta_1$ – угол наклона условной плоскости сдвига, γ - передний угол, a_1 - толщина срезаемого слоя.

Угол наклона условной плоскости сдвига можно рассчитать через коэффициент утолщения стружки $k_a = \frac{\cos \gamma + \operatorname{tg} \beta_1 \sin \gamma}{\operatorname{tg} \beta_1}$, связанный с тангенциальной составляющей силы резания по формуле:

$$k_a = \left(\frac{P_z}{0,8 \sigma_b s t} - 1 \right) \cos \gamma + \sin \gamma \quad (11)$$

где σ_b – предел прочности обрабатываемого материала при растяжении.

После несложных преобразований получим расчетное выражение для определения $\operatorname{tg} \beta_1$ от режимов обработки:

$$tg\beta_1 = \frac{0,8\sigma_b}{10C_{Pz}v^{n_{Pz}}s^{y_{Pz}}t^{-1}x_{Pz}^{-1} - 0,8\sigma_b} \quad (12)$$

Таким образом, через эмпирическую зависимость силы резания от режимов обработки [9] можно установить зависимость предельно допустимых условий благоприятного стружкообразования от скорости резания и подачи.

Оптимальный радиус кривизны R_{opt} соответствует минимальным силам резания и может быть интерпретирован как минимально рекомендуемый радиус завивания стружки. При дальнейшем уменьшении радиуса кривизны стружки за счет стружкозавивающих элементов происходит увеличение сил и мощности резания. В соответствие с этим, ограничение по оптимальному радиусу кривизны стружки можно записать в следующей форме:

$$R_{opt} \leq R_0 \quad (13)$$

После подстановки уравнений (7,9,11) в неравенство (12) получим модель ограничения режимов резания по обеспечению условий благоприятного стружкообразования.

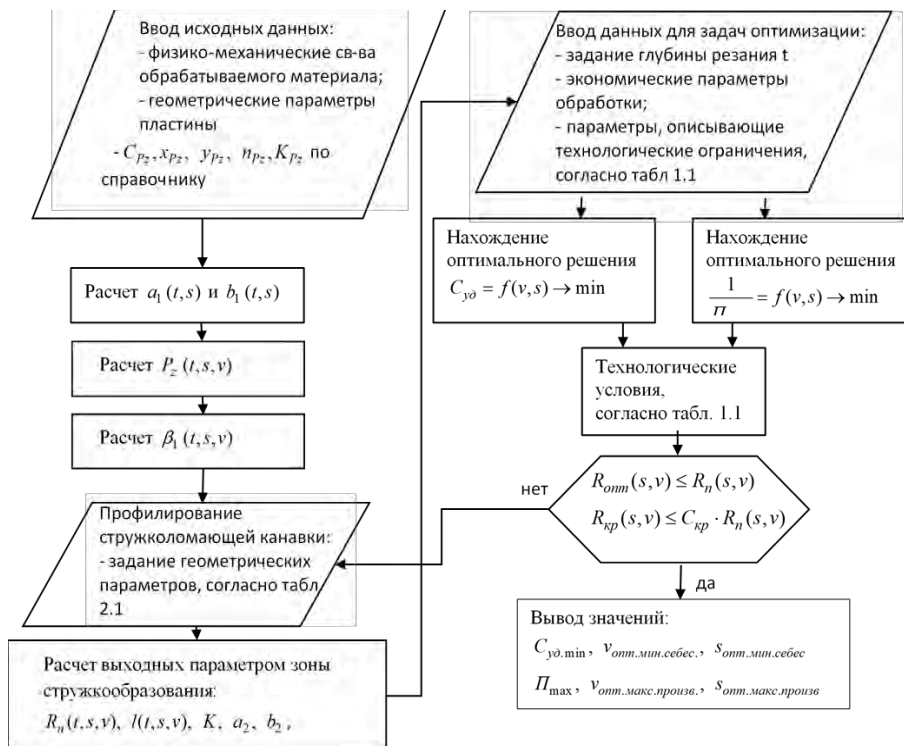


Рисунок 3 – Алгоритм поиска оптимальных решений технологического процесса точения с учетом стружкообразования

По указанному алгоритму возможно решение двух технологических задач – назначение оптимальных режимов резания для выбранного токарного инструмента с СМП или подбор оптимальной геометрии пластины для заданного диапазона режимов резания.

В качестве примера приведен расчет задачи оптимизации по минимальной себестоимости для токарной пластины VВМТ160404-ММ при условиях продольного точения заготовки марки сталь 45 на станке 16К20. Приняты следующие экономические характеристики: $E=10$ руб/мин; $W=125$ руб; $T_{cm}=3$ мин; параметры

оборудования: диапазон подач станка – 0,07 - 4,16 мм/об; диапазон частоты вращения станка – 12,5-2000 об/мин; мощность главного привода – 10 кВт; КПД – 0,8; жесткость станка – 12000 Н/мм; требования по качеству обработки: допуск радиального биения $\Delta_{дон.дет} = 0,07$ мм, $\Delta_{дон.заг} = 0,8$ мм. Оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость операции точения инструментом с СМП с учетом мощности оборудования, прочности режущей пластины, параметров качества детали и обеспечения надежного стружкодробления определялись из решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{y\partial}(s, v) = \frac{E}{vst} + \frac{(W + ET_{cm})v^{n-1}s^{y_T-1}t^{x_T-1}}{C_T} \rightarrow \min \\ s \geq s_{\min.стан} \\ s \leq s_{\max.стан} \\ v \geq \frac{\pi D n_{\min}}{1000} \\ v \leq \frac{\pi D n_{\max}}{1000} \\ v^{n_{Pz}+1} s^{y_{Pz}} \leq \frac{6120 N_{дв.эл} \cdot \eta}{C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}}} \\ v^{n_{Pz}} s^{y_{Pz}} \leq \frac{34q^{1.35} \left(\frac{\sin 60}{\sin \varphi}\right)^{0.8}}{C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}-0.17}} \\ v^{n_{Py}} s^{y_{Py}} \leq \frac{\Delta_{дон.дет} \cdot j_{стан}}{10C_{Py} \cdot \Delta_{дон.заг}} \\ R_{кр}(s, v) \leq C_R R_n(s, v) \\ R_{онм}(s, v) \leq R_n(s, v) \end{array} \right. \quad (14)$$

где $N_{дв.эл}$ – мощность двигателя главного движения, η - КПД станка, q – толщина пластины, φ - главный угол в плане, $\Delta_{дон.дет}$ – радиальное биение детали, $\Delta_{дон.заг}$ – радиальное биение заготовки, $j_{стан}$ - жесткость станка; n_{Py} , x_{Py} , y_{Py} , C_{Py} - коэффициенты и показатели степени P_y составляющей силы резания, согласно [9].

Графоаналитическое решение задачи оптимизации режимов резания с учетом получения благоприятной дробленой стружки представлено на рисунке 4.

Анализ результатов расчета позволяет выбрать технически обоснованные режимы резания при использовании сборного инструмента с СМП.

Заключение

Разработана методика расчета режимов токарной обработки материалов, позволяющая прогнозировать и назначать наиболее эффективные условия резания с учетом получения благоприятной формы стружки.

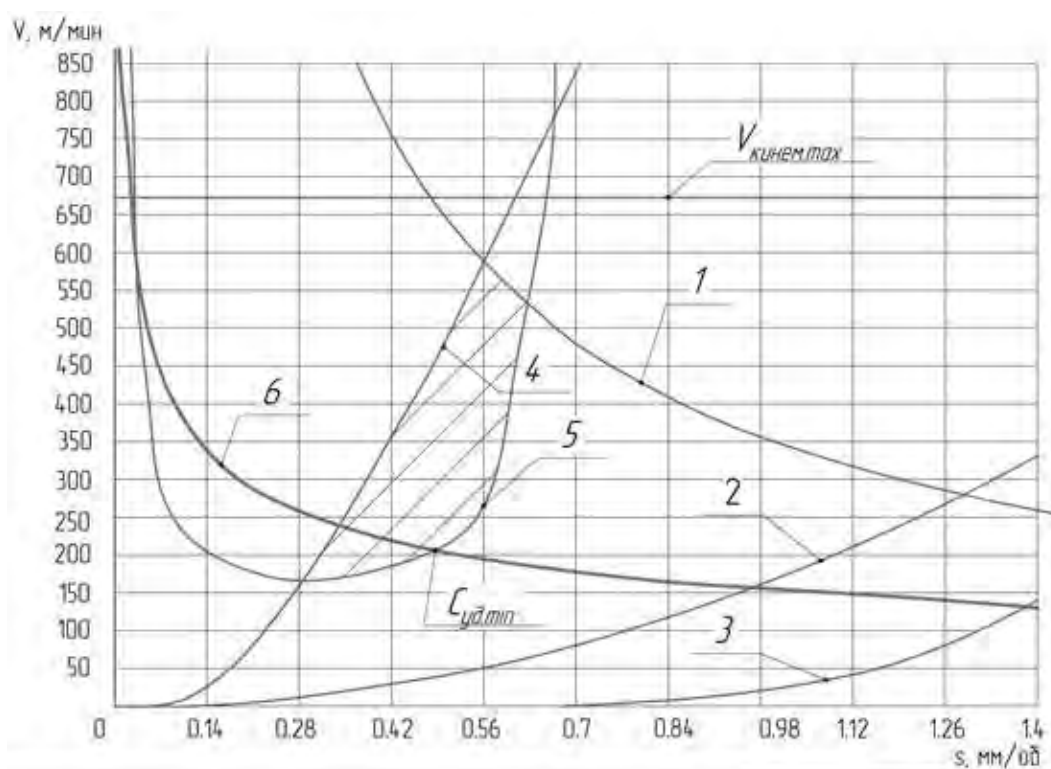


Рисунок 4 – Блокирующий контур технологических параметров резания v , s и линия локальных минимумов себестоимости при постоянной глубине резания: 1 – ограничение по мощности оборудования, 2 – ограничение по прочности пластины, 3 – ограничение по допускаемому биению; 4 – ограничение по надежному дроблению стружки; 5 – ограничение по благоприятному стружкообразованию; v_{max} – кинематическое ограничение по допускаемой скорости резания; 6 – функция локальных минимумов удельной себестоимости

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдин. П.В., Михайлов С.В. Оптимизация токарной обработки материалов по критерию наименьшей себестоимости с учетом стружкодробления / Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Инновационные идеи в машиностроении" ИИМ-2022, – С-П24–26 мая 2022 г. / под ред. д. техн.наук, проф. А. А. Поповича, д. техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С 19-24.

2. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Михайлов В.В. Определение рациональных параметров резания инструментальных переходов поточной линии на основе имитационного моделирования // Инновационные идеи в машиностроении. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. Санкт-Петербург, 2022. С. 50-54.

3. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
4. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
6. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.
7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.
8. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.
9. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / под ред. А. Г. Косиловой. – М.: Машиностроение, 1972.
10. Михайлов, С. В. Компьютерное прогнозирование и системный анализ причинно-следственных связей процессов образования, завивания и дробления сливной стружки / С. В. Михайлов. – Кострома: изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. – 159 с.

P.V. Burdin¹, S.V. Mikhailov^{1,2}, N.Yu. Kovelentov^{1,3}

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,

²Kostroma State University, Kostroma, Russia

³VIRIAL LLC, Saint Petersburg, Russia,

MODELING AND OPTIMIZATION OF TURNING WITH INTERCHANGEABLE COMPLEX PROFILE INSERTS

Abstract

A mathematical apparatus has been developed for solving a problem related to the optimization of environmental conditions.

Keywords: cutting of materials, turning, multifaceted indexable inserts, chip breaking, calculation of cutting conditions.

Д. Быченко^{1,2}, И.И. Козарь¹, Д.Н. Шабалин¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, denisba97@mail.ru

²АО «Армалит», Санкт-Петербург, Россия

ВЫБОР И РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Аннотация

В работе поднимается вопрос о необходимости обоснованного назначения геометрических допусков (формы, ориентации, месторасположения и биения) к поверхностям деталей станочных приспособлений. Рассматриваются два метода их выбора (по аналогам и с использованием нормативно-технической документации) и метод расчета, основанный на построении пространственных размерных цепей. Анализируются их достоинства и недостатки. Акцентируется внимание на некоторых технологических и метрологических проблемах, связанных с геометрической точностью деталей, которых можно избежать при грамотном оформлении конструкторской документации.

Ключевые слова: станочные приспособления, геометрические допуски, конструирование.

Введение

Одним из первых этапов конструирования станочных приспособлений является разработка системы установочных элементов, материализующих выбранную схему базирования. При этом для достижения заданной точности обработки с использованием разрабатываемого приспособления большую роль играет точность поверхностей установочных элементов. К примеру, точность размеров установочных элементов типа жестких оправок и пальцев непосредственно влияет на погрешность базирования заготовки – расстояние между конструкторской (ось отверстия заготовки) и технологической (ось рабочей поверхности установочного элемента) базами. Зачастую точность размеров установочных элементов (поле допуска размера) назначается конструктивно, по рекомендациям в зависимости от требуемой точности обработки. При необходимости производится расчет расстояния между элементами (например, пальцами) и некоторых других размеров. Этот подход нашел отражение во многих, ставших классическими, трудах по станочным приспособлениям, к примеру [1-3].

В то же время при оформлении комплекта чертежей инженер-конструктор по оснастке неизбежно сталкивается с необходимостью установить к поверхностям деталей приспособлений некоторые дополнительные требования, исходя из их функционального назначения, выражаемые геометрическими допусками – допусками формы, ориентации, месторасположения и биения. Этой теме посвящено сравнительно мало работ [4, 5], несмотря на ее важность и значимость с точки зрения обеспечения качества обрабатываемых деталей. Так, к примеру, биение рабочих поверхностей токарной оправки относительно посадочной поверхности, устанавливаемой в шпинделе станка или патроне, неизбежно передается обрабатываемой детали и может быть частично нивелировано только путем

длительной выверки. Неперпендикулярность и непараллельность рабочих поверхностей приспособлений типа угольников и подставок относительно их установочных плоскостей вызывает соответствующие отклонения у обрабатываемых деталей. При работе на универсальном оборудовании компенсированы они могут быть также выверкой и доработкой приспособлений непосредственно на станке. В случае со станками, оснащенными системой ЧПУ и измерительными щупами, можно производить измерения деталей, установленных на оснастку, перед началом очередного цикла обработки с целью установить истинное положение их системы координат и положение поверхностей относительно системы координат станка и ввести соответствующие поправки в управляющую программу. В любом случае, все эти манипуляции снижают производительность обработки.

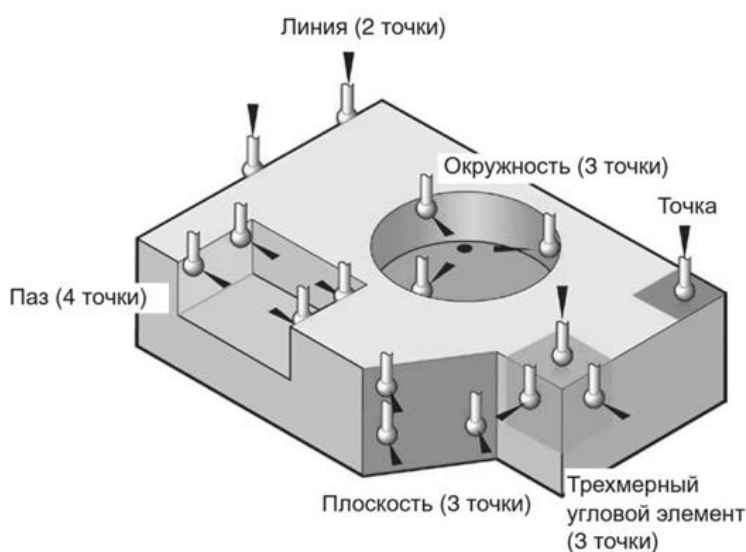


Рисунок 1 – Измерение детали на станке с ЧПУ с помощью датчика касания [6]

Таким образом, конструктор должен, с одной стороны, назначать достаточно жесткие геометрические допуски к поверхностям станочных приспособлений, чтобы обеспечить необходимую точность обработки деталей. Однако с другой стороны, он должен понимать, что с ужесточением требований к степени геометрической точности поверхности значительно возрастают трудозатраты по ее достижению, возникает необходимость применения методов обработки, не всегда доступных в условиях конкретного производства [7 - 13]. К примеру, достижение 3-4 степени геометрической точности по ГОСТ 24643-81 требует применения тонкого точения, тонкого шлифования, доводки, шабрения, тогда как 5-6 степень точности может быть достигнута чистовым точением или чистовым шлифованием [14].

Кроме того, при разработке конструкторской документации важно предусматривать удобство и точность последующего измерения деталей, выполненных по ней, следовательно – достаточную точность и протяженность базовых поверхностей, либо использование комплекта баз [15, 16]. Немаловажным фактором является указание или неуказание нормируемого участка, особенно для протяженных поверхностей, поскольку при одном и том же значении допуска именно размер нормируемого участка будет определять степень геометрической точности поверхности, а значит, в конечном счете, методы ее достижения.

Поэтому целью настоящей работы является формулирование основных положений по рациональному выбору геометрических допусков для деталей станочных приспособлений, а также возможностям их расчета.

Методы

Одним из распространенных методов конструирования приспособлений является конструирование по аналогу, когда вновь разрабатываемое приспособление создается на основе уже существующего. При этом в конструкцию часто вносятся лишь незначительные изменения, касающиеся установочных элементов и габаритов приспособления в целом [17]. При таком подходе один раз установленные с некоторым «запасом» степени геометрической точности или же просто значения допусков переносятся на новые приспособления. Например, в [1] рекомендуется назначать допуски параллельности, перпендикулярности, плоскостности в пределах 0.02-0.05 мм на 100 мм длины, то есть так, чтобы угловые смещения поверхностей не превышали 1-2°. Достаточно обширная информация о станочных приспособлениях и предъявляемых к ним требованиях содержится в стандарте на универсальные наладочные и специализированные наладочные приспособления [18].

Достоинством метода является высокая скорость конструирования, что особенно важно в условиях современного динамичного производства, где наблюдается отчетливая тенденция на сокращение производственного цикла от заключения контракта до отгрузки заказчику готового изделия. В этих условиях все стадии технологической подготовки производства: выбор заготовок, написание технологического процесса, подбор и (или) разработка режущего, вспомогательного, измерительного инструмента и оснастки, написание программ для станков с ЧПУ – должны быть осуществлены в возможно меньшие сроки. Очевидно также, что основным недостатком такого подхода будет перенос ошибок старых конструкций на новые и отсутствие предварительного расчета реальной точности обработки с использованием проектируемых приспособлений. В некоторых случаях она, в конечном счете, может оказаться недостаточной, в других – избыточной.

В качестве второго метода выбора геометрических допусков деталей станочных приспособлений после метода работы по аналогу можно назвать целенаправленное внедрение в процесс конструирования стандарта [19], определяющего связь между допуском на размер и геометрическим допуском. Стандарт [19] устанавливает три уровня относительной геометрической точности: «А» – нормальная относительная геометрическая точность (геометрический допуск составляет примерно 60% от допуска на размер), «В» – повышенная геометрическая точность (соответственно – 40%), «С» – высокая геометрическая точность (соответственно – 25%). В пределах каждого качества и диапазона размеров заданному уровню геометрической точности будет соответствовать одна из шестнадцати степеней точности и конкретное значение допуска формы, ориентации, месторасположения или биения. Стандарт [19] удобен для инженера-конструктора тем, что позволяет в перспективе абстрагироваться от самых разных противоречивых рекомендаций и требований ранее разработанных чертежей в части геометрических допусков. Тем не менее, изначально эти рекомендации, требования, опыт использования приспособлений должны быть тщательно проанализированы и определена целесообразная степень точности для вновь проектируемых приспособлений, желательно разбитых по типам (к примеру, оправки жесткие, оправки цанговые, оправки кулачковые и т.д.). Тогда в дальнейшем на этапе

конструирования инженеру достаточно установить допуски на размеры к основным посадочным поверхностям деталей приспособления (как это всегда и делается), а далее, задаваясь уровнем точности, определить по стандарту [20] значения искомым геометрических допусков. Назначаемые допуски будут, кроме того, отражать требования к инструментальному производству, остающиеся постоянными для заданного типа приспособлений (поскольку неизменен будет выбранный уровень геометрической точности) и заключающиеся в соответствующем построении технологических процессов с использованием определенного оборудования. Это весьма важный момент, который позволяет заниматься долгосрочным планированием производства и с большой долей вероятности избежать ситуаций, когда та или иная единица оснащения не может быть изготовлена силами самого предприятия. С другой стороны, этот метод, равно как и метод аналогов, не позволяет рассчитать предполагаемую точность обработки с использованием проектируемого приспособления, по причине чего уровни точности должны выбираться с определенным запасом. При необходимости, конечно, можно вводить свои «промежуточные» уровни точности, но это требует и пересчета значений допусков. Кроме того, не всегда геометрические допуски назначаются к поверхностям, связанным точными размерами. К примеру, высота подставок для фрезерных или шлифовальных станков зачастую может быть выполнена не точнее 12-14 квалитетов. В то же время, параллельность верхней плоскости подставки основанию и плоскостность основания иногда играют большую роль. В приспособлениях типа угольников допуск перпендикулярности рабочей поверхности угольника к основанию не может быть никаким образом получен из допусков размеров.

Третьим методом, самым сложным и затратным по времени, но зато позволяющим объективно оценить предполагаемую точность проектируемого приспособления и скорректировать геометрические допуски в сторону ужесточения/увеличения, является расчет размерных цепей, широко распространенный в машиностроении. Так авторы [20, 21] используют этот метод для расчета биения концевой фрезы, закрепленной в цанговом патроне (рис. 2).

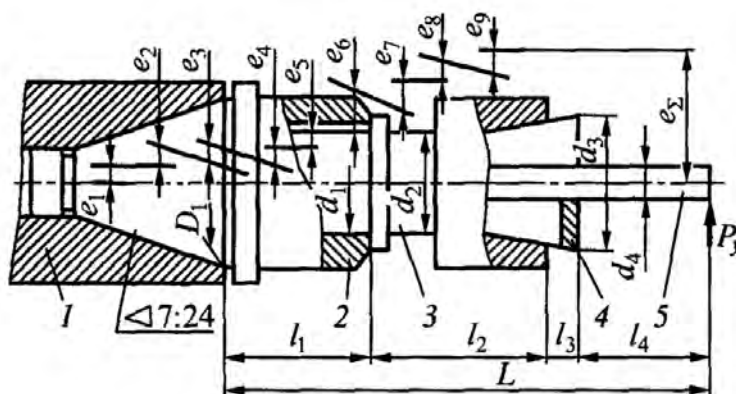


Рисунок 2 – Размерная цепь для расчета биения концевой фрезы [14]

Биение режущей части инструмента в системе координат станка рассматривается как замыкающее звено в сложной размерной цепи, образованной отклонениями линейных и угловых размеров элементов технологической системы. Поскольку указанная цепь является пространственной и звенья ее могут занимать произвольную ориентацию относительно друг друга, то расчеты целесообразно вести

теоретико-вероятностным методом, с учетом законов распределения отдельных погрешностей:

$$e_{\Sigma} = \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_i^n A_i^2 K_i^2 e_i^2},$$

где e_{Σ} – половина биения фрезы (замыкающего звена);

K_{Σ} – коэффициент относительного рассеивания замыкающего звена, учитывает отклонение его закона распределения от нормального;

A_i – передаточное отношение i -го углового звена цепи (к примеру, отношение его фактического вылета к вылету, на котором нормируется величина перекоса);

K_i – коэффициент относительного рассеивания i -го звена цепи;

e_i – величина биения (перекоса) i -го звена цепи (шпинделя, корпуса цангового патрона, оси цанги и т.д.)

Такие же размерные цепи можно построить и для оснастки, установленной на станках. Замыкающим звеном цепи будет допуск ориентации, месторасположения или биения, который должен быть сравнен с соответствующим допуском обрабатываемой детали. Допуски формы этим методом рассчитать нельзя.

Несомненным достоинством такого подхода является наглядность, обоснованность и возможность количественно оценить возрастание точности при использовании оснастки схожей конфигурации, но с разными посадочными поверхностями. К примеру, токарная оправка с коническим хвостовиком, устанавливаемая в шпинделе станка, очевидно, обеспечит намного меньшее биение, нежели оправка с цилиндрическим хвостовиком, зажимаемая в патроне, за счет меньших перекосов в сопряжениях и меньшего числа звеньев размерной цепи.

Результаты и обсуждение

Как видно из рассмотренных случаев и примеров, компетентный инженер-конструктор в своей работе должен отчасти выступать в роли инженера-технолога и инженера-метролога: выбирая геометрические допуски, всегда учитывать возможность достижения заданной степени точности в условиях конкретного производства, понимать, какие методы измерений потребуются, и предусматривать конструкторские базы, которые было бы удобно использовать и в качестве измерительных.

Выбор допусков по рекомендациям и с использованием информации стандартов, в частности [18, 19], являются достаточно простыми и производительными методами оформления чертежей деталей [22, 23]. Однако более правильно и перспективно с точки зрения технологии машиностроения как науки оценивать значения геометрических допусков на основе теоретико-вероятностного расчета пространственных размерных цепей, что позволяет обоснованно ужесточать/уменьшать эти допуски.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ансеров, М. А. Приспособления для металлорежущих станков: расчеты и конструкции / М. А. Ансеров. - М.-Л.: Машгиз, 1960. - 624 с.
2. Корсаков, В. С. Основы конструирования приспособлений: учебник для вузов / В. С. Корсаков. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1983. - 277 с.

3. Станочные приспособления: справочник. В 2 томах. Том 1 / А. И. Астахов, С. В. Бояршинов, Б. Н. Вардашкин и др.; под ред. Б. Н. Вардашкина и А. А. Шатилова. - М.: Машиностроение, 1984. - 592 с.
4. Антонюк, В. Е. Справочник конструктора по расчету и проектированию станочных приспособлений / В. Е. Антонюк, В. А. Королев, С. М. Башеев. - Минск: Беларусь, 1969. - 392 с.
5. Богуцкий, В. Б. Подходы к определению погрешности обработки вызванной установкой технологической оснастки на станке / В. Б. Богуцкий // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. - 2021. - № 10. - С. 35-38. - DOI 10.26160/2658-3305-2021-10-35-38.
6. Измерительные системы для станков с ЧПУ: [сайт]. - URL: https://cnc360.ru/files/404/h-2000-3538-10_tech_spec.pdf (дата обращения: 28.10.2022).
7. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
8. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях ао "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
10. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.
11. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
12. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке. // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.
13. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.
14. Гжиров, Р. И. Краткий справочник конструктора / Р. И. Гжиров. - Л.: Машиностроение, 1983. - 464 с.
15. Правиков, Ю. М. Метрологическая экспертиза рабочих чертежей деталей машин как этап технологической подготовки производства / Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина // Вестник Ульяновского государственного технического университета. - 2008. - № 2(42). – С. 48-52.
16. Зими́на, Е. В. Роль метрологической экспертизы технической документации в повышении проектного качества продукции / Е. В. Зими́на, В. Н. Кайнова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2015. - № 4(111). - С. 186-192.

17. Жуков, Э. Л. Проектирование установочно-зажимных приспособлений: учеб. пособие / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. А. Любомудров. - Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. -192 с. - ISBN 978-5-7422-4360-1.

18. ГОСТ 31.0151.01-90. Приспособления универсальные наладочные и специализированные наладочные. Общие технические условия = Universalandspecializedadjustingdevices. Generalspecifications: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 25 апреля 1990 г. № 1001: взамен ГОСТ 22129-76: дата введения 1991-07-01 / разработан и внесен Государственным комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам. - М.: Издательство стандартов, 1990. - 66 с.

19. ГОСТ 24643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения = Basic norms of interchangeability. Tolerances of form and position of surfaces. Numerical values: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 18 марта 1981 г. № 1423: взамен ГОСТ 10356-63 в части разд. 3: дата введения 1981-07-01 / разработан и внесен Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. - М.: Издательство стандартов, 2004. - 9 с.

20. Кузнецов, Ю. И. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник / Ю. И. Кузнецов, А. Р. Маслов, А. Н. Байков. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1990. - 512 с. - ISBN 5-217-01114-9.

21. Григорьев, С. Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: справочник / С. Н. Григорьев, М. В. Кохомский, А. Р. Маслов; под общ. ред. А. Р. Маслова. - М.: Машиностроение, 2006. - 544 с. - ISBN 5-217-03363-0.

22. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.

23. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.

D. Bychenko^{1,2}, I.I. Kozar¹, D.N. Shabalin¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

²АО «Armalit», St. Petersburg, Russia, denisba97@mail.ru

SELECTION AND CALCULATION OF GEOMETRICAL TOLERANCES FOR THE PARTS OF MACHINE TOOL DEVICES

Abstract

The paper raises the question of reasonable establishing of geometrical tolerances (tolerances of form, orientation, location and run-out) to the surfaces of the machine tool devices' parts. Two methods of their selection (using similar designs and recommendations and using technical standards) and calculation method based on analysis of spatial dimensional chains are considered. Their advantages and disadvantages are analyzed. Attention is paid to some technological and metrological problems associated with geometric accuracy of parts, which can be avoided with correct design documentation.

Keywords: machine tool devices, geometrical tolerance

Е.Г. Деева, Д.П. Гасюк
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, nimo_95@mail.ru

УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В ПРОЦЕССАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

В статье рассматриваются условия и факторы, влияющие на обоснования выбора средств технического контроля.

Ключевые слова: Средства контроля, качество, технический контроль, измерения.

Уровень качества продукции является важнейшим показателем работы предприятия. Правильный выбор средств технического контроля обеспечивает повышение достоверности информации о качестве продукции, является существенной предпосылкой повышения качества продукции.

Цель: изучение условий и факторов выбора средств технического контроля для повышения качества продукции.

Основная задача технического контроля – получение достоверной информации о качестве продукции в интересах разработки предупреждающих действий появления брака и дефектов.

Одним из существенных факторов, влияющих на достоверность информации о качестве продукции при проведении технического контроля, является правильный выбор средств контроля.

Порядок выбора средств контроля и требования, предъявляемые к средствам контроля устанавливают рекомендации Р 50-609-39-01 [1].

В соответствии с данными рекомендациями утверждается тот факт, что при выборе средств контроля должны учитываться: вид объекта контроля (деталь, сборочная единица); вид контроля (сплошной, выборочный и т.д.); входной уровень дефектности контролируемой продукции; вероятность обнаружения брака на последующих этапах технологического процесса; вид контролируемого признака (геометрический размер, физический параметр и т.п.); номинальные значения и допуски контролируемых параметров; допустимая погрешность измерения; конструктивные особенности детали (конфигурация, доступность); транспортабельность средства и объекта контроля; производительность технического контроля; наличие средств контроля на предприятии; стоимость средств контроля; квалификация исполнителя контроля; целесообразность проектирования специальных средств контроля; дополнительные условия и характеристики [1].

При выборе средств контроля должны обеспечиваться: предпочтительное применение для данных условий автоматического, автоматизированного и механизированных средств контроля; возможность применения выбранного средства контроля для нескольких контролируемых параметров и объектов контроля; возможность применения средств контроля в условиях эксплуатационных помех (свободный температурный режим вибрации и т.д.); возможность переналадки

и многократного использования при изменении объектов контроля; выдача информации в форме, удобной для оперативного использования; возможность встраивания в технологическую линию; возможность активного контроля в зоне обработки [1].

Для правильного выбора методов и средств контроля необходима обязательная оценка влияния погрешности измерения на результаты контроля. Используя справочные материалы, выбирают такой измерительный инструмент или прибор, предельная погрешность измерения которого не превышает допустимой погрешности измерения.

При выборе средств измерения в качестве средств контроля качества продукции необходимо также учитывать экономические показатели: трудоёмкость процесса технического контроля с использованием выбранного средства контроля; время, затрачиваемое на настройку и измерение; время на обработку полученных в ходе контроля результатов измерения; надежность и стабильность работы; продолжительность работы до ремонта [1].

При выборе средств контроля должны обеспечиваться: предпочтительное применение для данных условий автоматического, автоматизированного и механизированных средств контроля; возможность применения выбранного средства контроля для нескольких контролируемых параметров и объектов контроля; возможность применения средств контроля в условиях эксплуатационных помех (свободный температурный режим вибрации и т.д.) возможность переналадки и многократного использования при изменении объектов контроля; выдача информации в форме, удобной для оперативного использования; возможность встраивания в технологическую линию; динамические характеристики средств контроля, соответствующие динамическим свойствам контролируемых объектов; возможность активного контроля в зоне обработки [2 - 6]. Кроме того, существенным фактором при выборе средства контроля, влияющим на достоверность информации о качестве продукции, является инструментальная погрешность средства измерения, выбираемого в качестве средства контроля. В соответствии с требованиями РМГ 63-2003 [7]. Предел допускаемой погрешности измерений, не приводящей к заметным потерям или другим неблагоприятным последствиям, может составлять 0,2 - 0,3 границы симметричного допуска на измеряемый важный параметр; для параметров, не относящихся к наиболее важным, - 0,5.

Процесс контроля качества продукции состоит из определения количественного значения контролируемого параметра и его сравнения с требуемым значением, приведенным в технических условиях (стандарте) или в условиях контракта.

Методы количественной оценки качества продукции изучает специальная дисциплина - *квалиметрия*. Количественные значения показателей качества продукции определяются:

экспериментальным методом, базирующимся на применении технических средств. Он позволяет дать наиболее объективную количественную оценку качеству, так как в его основе лежат физические эксперименты - методы метрологии (измерение геометрических размера, массы, твердости, электропроводности, износостойчивости и т.п.);

органолептическим методом, основанным на определении качества соответствующими специалистами с помощью органов чувств по балльной системе (определение вкуса, запаха, цвета);

социологическим методом, основанным на использовании данных учета и анализа потребителей продукции;

экспертным методом, базирующимся на использовании обобщенного опыта и интуиции специалистов и потребителей продукции [3].

Перечисленные методы предусматривают 100%-й охват контролируемых объектов. Однако нередко оказывается целесообразным подвергать проверке лишь часть контролируемых объектов. В этом случае применяются *статистические* методы контроля.

Под *статистическим методом* контроля понимается контроль качества продукции или состояния технологического процесса, производимый с использованием теории вероятности и математической статистики [8 - 11].

Не менее важным фактором, влияющим на качество продукции, являются условия производственной среды. На повышение качества должна быть нацелена вся производственная система. Одним из элементов системы менеджмента качеством является организация технического контроля на предприятии [12]. При выборе средств контроля наряду с инструментальной погрешностью выбираемых средств измерений существенным фактором являются затраты, имеющие место при выполнении измерений в ходе технического контроля. При этом должны быть установлены обязательные показатели процесса контроля не только по точности измерений и достоверность контроля, но и по его трудоемкости и стоимости.

При анализе затрат необходимо предусмотреть:

а) сравнение вариантов средств контроля, отвечающих одинаковым требованиям и обеспечивающих решение одинаковых задач в конкретных производственных условиях;

б) выбор вариантов, которые базируются на следующей информации: плане развития предприятия; технических требованиях к изделию; количеству изделий и срокам изготовления; технических возможностях средств контроля; затратах на приобретение средств контроля и их эксплуатацию; требованиях техники безопасности и промышленной санитарии [13- 15].

Кроме того, к применению допускаются средства контроля, признанные пригодными по результатам метрологического надзора.

Этапы выбора средств контроля:

а) анализ характеристик объекта контроля и показателей процесса контроля;

б) определение предыдущего состава средств контроля;

в) определение окончательного состава средств контроля [15].

При анализе характеристик объекта, контроля и показателей процесса контроля должны учитываться: вид объекта контроля (деталь, сборочная единица, технологический процесс); вид контролируемого признака (геометрический размер, физический параметр, форма и др.); номинальные значения и допуски на контролируемые параметры; допустимая погрешность измерений; конструктивные особенности изделия (конфигурация, доступность и др.); измерительная база; масса объекта контроля; повреждаемость (деформация) при контроле; условия рабочего места (температурный режим и др.); производительность технического контроля; транспортабельность средства и объекта контроля; наличие средства контроля на заводе; условия выдачи результатов контроля; стоимость средства контроля; квалификация контроллера; дополнительные условия и характеристики [16]. Выбор средств контроля согласовывается с отделом технического контроля и метрологической службой.

Метрологический контроль, в зависимости от условий и факторов может не только усиливаться, но и снижаться в отдельных случаях, если это не отражается на качестве выпускаемой продукции предприятий машиностроения.

Проведенный анализ условий и факторов, влияющих на достоверность полученной информации о качестве продукции в ходе её технического контроля и их учёт при выборе средств контроля позволяют повысить достоверность информации о качестве продукции, разработать более эффективные предупреждающие действия появления дефектов и в конечном итоге повысить качество продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р 50-609-39-01- Правила выбора средств контроля.
2. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 4. С. 100-104.
3. Гасюк Д.П., Деева Е.Г. Выбор средств измерения для линейных размеров // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 440-443.
4. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Богоева Е.М., Веселко А.А., Сысуев С.Ю. Модель и метод комплексной стандартизации сложных технических систем // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 2. С. 20-29.
7. РМГ 63-2003 - Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Метрологическая экспертиза технической документации: Изд-во стандартов, 2004..
8. Методы и средства измерений в машиностроении: учеб. Пособие / С.А. Любомудров, Т.А. Макарова, С.Б. Тарасов.- СПб.: Изд-во Политехн.ун-та,2011. -211с.
9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Мартыщенко Л.А., Шатохин Д.В. Методы оперативного статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции. - Санкт-Петербург, Тула: Международная академия информатизации, 2001. –72 с.
10. Авдеев М.М., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Мартыщенко Л.А., Шатохин Д.В. Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами: монография.- Санкт-Петербург; Тула, 2001.- 139 с.
11. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Коханова Н.М., Малькова А.Л. Выбор структуры производственных функций на основе синтеза безальтернативных статистических гипотез // Вестник Российской таможенной академии. 2008. № 4. С. 74-79.
12. Григорьев И.А. Контроль размеров в машиностроении: Справочное пособие.- МАШГИЗ,1959. - 400 с.
13. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. – 358 с.

14. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

15. Смилянский З.Г. Основы техники контроля размеров в машиностроении: Монография.- МАШГИЗ. 1959.

16. Технический контроль в машиностроении. Справочник проектировщика. Под общ. ред. В.Н. Чупрынина, А.Д. Никифорова. - М.: Машиностроение, 1987. - 512 с.

E.G. Deeva, D.P. Gasyuk,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
deeva.eg@spbstu.ru

CONDITIONS AND FACTORS INFLUENCING THE JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF MEANS OF TECHNICAL CONTROL IN THE PROCESS OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION

Abstract

The article considers the conditions and factors influencing the rationale for the choice of technical control tools.

Keywords: Means of control, quality, technical control, measurements.

А.К. Елагина, Т.А. Макарова, С.А. Любомудров
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 Санкт-Петербург, Россия , alisa_1355@mail.ru

ВЫБОР СРЕДСТВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НАРУЖНЫХ ДИАМЕТРОВ

Аннотация

В результате проделанной работы произведен выбор наиболее эффективного метода активного контроля диаметра венца детали «Зубчатое колесо» на операции чистового точения, производимой на станке с ЧПУ, а также описаны конструкция и принцип действия применяемой установки.

Ключевые слова: активный контроль, токарная обработка, измерительная скоба.

Введение

Точение – самый распространенный вид обработки в области машиностроения, что делает снижение суммарной погрешности этого вида обработки важной экономической задачей. При чистовом точении и растачивании основными составляющими погрешности обработки являются: размерный износ режущего инструмента, упругие деформации технологической системы, температурные деформации резца и детали, а также погрешности позиционирования на станке. Их систематические составляющие возможно скомпенсировать за счет применения систем активного контроля [1 - 9].

Так как на операции чистового точения венца зубчатого колеса заготовка устанавливается в трёхкулачковый патрон, наиболее подходящей будет система дискретного контроля, подразумевающая получение размера при помощи установки режущей кромки инструмента на размер [10]. Чертеж детали представлен на рисунке 1.

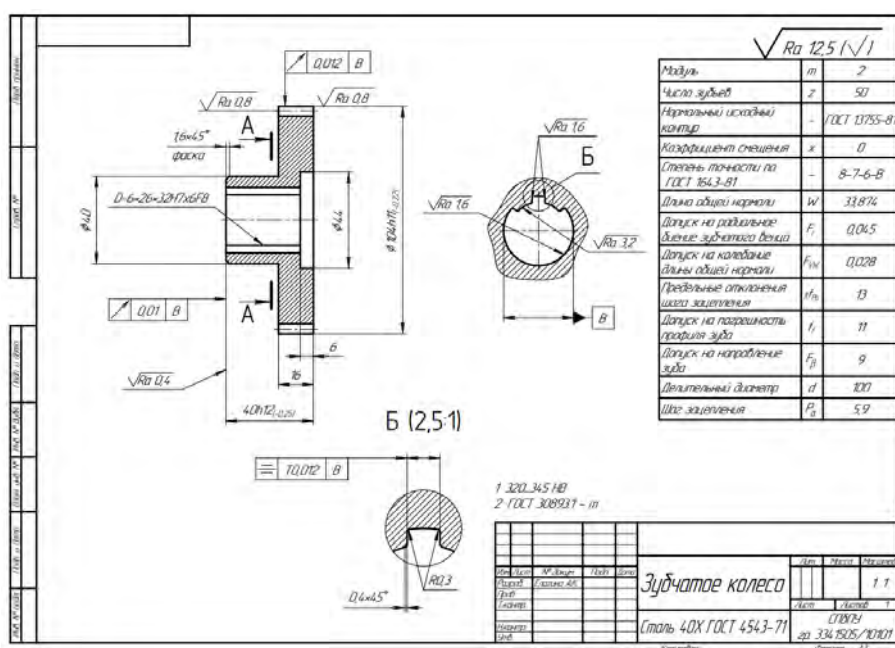


Рисунок 1 – Чертеж детали «Зубчатое колесо»

На рисунке 2 приведен операционный эскиз для операции, на которой предлагается применять систему дискретного контроля.

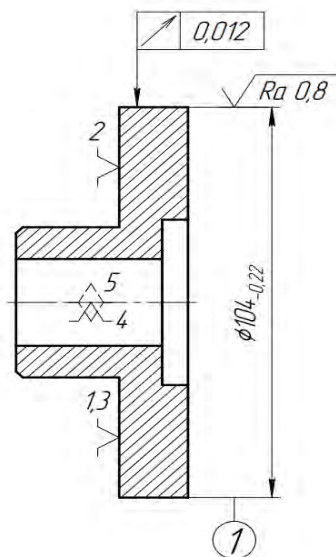


Рисунок 2 – Операционный эскиз операции 030

Дискретный контроль подразумевает контроль размеров детали до или после обработки. Разработанные и внедренные в лаборатории «Технология машиностроения» скобы позволяют контролировать диаметры деталей на станке [11, 12].

Применение скобы [12], решает проблему контроля точности изготовления изделия после завершения цикла обработки на станке с ЧПУ, для чего необходимо установить скобу на станке и написать программу для автоматического подвода ее к диаметру.

На рисунке 3 изображена измерительная скоба, установка которой на станок производится при помощи закрепления основания 1 винтами 2 на суппорте 3, в момент контроля детали 4. Закрепление скобы на суппорте обеспечивает перемещение скобы в направлении, указанном стрелкой на рисунке 3, в момент обработки детали скоба находится за деталью.

Стойка 5, закрепленная на основании, связана с направляющей штангой через пару плоских пружин 6 и витую пружину 7, которая закреплена на направляющей штанге 8, образующей скобу в сборе с измерительными губками 9 и 10. Так как губки могут перемещаться по штанге и закрепляться при помощи винтов 11, скоба может применяться для измерения не только рассматриваемой детали, но и контролировать диаметры деталей большого диапазона. Плоские пружины 6 закреплены на торцах штанги винтами 12. Верхняя пружина 6 закреплена на торце стойки 5 винтом 13, нижняя пружина 6 закреплена на втулке 14, фиксирующейся на стойке 5. Пружина 7 закреплена на консолях втулок 16 и 17, зафиксированных на штанге 8 и стойке 5 соответственно при помощи винтов 18. На концах губок скобы размещаются контактные элементы: пята 19 установлена на губке 10, соосно с пятой на верхней губке 9 закрепляется индуктивный датчик 20, данные с которого передаются на индикаторное электронное средство 21, выводятся на дисплей 22 и могут передаваться на компьютер. Нижняя губка снабжена направляющим роликом 23.

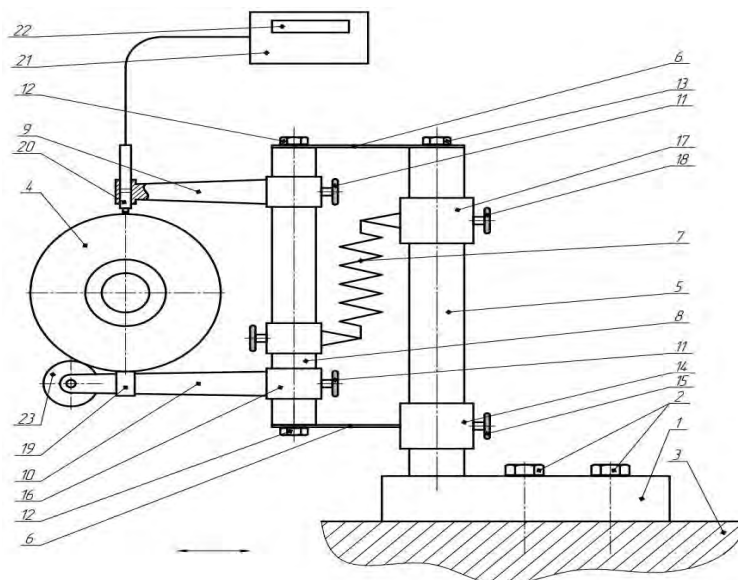


Рисунок 3 – Схема контроля внешнего диаметра детали «Зубчатое колесо»:
 1 – основание, 2 – винты крепления к суппорту, 3 – суппорт, 4 – обрабатываемая деталь, 5 – вертикальная стойка, 6 – пара плоских пружин, 7 – витая пружина, 8 – направляющая штанга, 9 и 10 – верхняя и нижняя губки, 11, 15 и 18 – винты фиксации втулок, 12 – винты крепления пружин, 13 – винт крепления пружины к стойке, 14, 16 и 17 – втулки, 19 – пята, 20 – датчик, 21 – индикаторное электронное средство, 22 – дисплей, 23 – направляющий ролик

Результаты и обсуждение

Для осуществления активного контроля предлагается использовать «Скобу» [12], так как её конструкция позволяет установку и применение на токарном станке с ЧПУ и имеет незначительную погрешность.

Прежде чем начать измерения при помощи предложенного устройства, необходимо настроить его на размер. Это можно делать по образцовой детали, либо при помощи блока концевых мер, размер которых соответствует номинальному диаметру и предварительно устанавливается между пятой 19 и наконечником датчика 20.

Заключение

Применение измерительной скобы [12] на операции чистового точения позволит ускорить проведение контроля диаметра обработанной поверхности и обеспечить своевременную подналадку станка на необходимый размер вершины режущего инструмента, что заметно снизит погрешность обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анухин В.И., Любомудров С.А., Макарова Т. А. Система Автоматической стабилизации размеров при токарной обработке партии деталей // Сборник научных трудов СПбГТУ. - № 504. - «Машиностроение», 2007. - С. 12–18.
2. Грибанов Д.А., Макарова Т.А. / Применение индуктивных измерительных систем при контроле качества деталей / Вестник ИНЖЕКОНА. Серия: технические науки. Сборник научных трудов. Вып. 8. – СПб.: СПбГИЭУ, 2010 – С. 170-181.
3. Гасюк Д.П., Деева Е.Г. Выбор средств измерения для линейных размеров // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской

научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 440-443.

4. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

6. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.

7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

8. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 4. С. 100-104.

9. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

10. Любомудров С.А., Макарова Т.А., Романов А.С. Выбор средств контроля при токарной обработке // Наука и бизнес: пути развития. - 2021. - N 12(126). - С. 48-51.

11. Пат. 167130 РФ, МПК: G01B 3/00. Устройство для измерения диаметров деталей при токарной обработке / Анухин В. И., Любомудров С. А., Макарова Т. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное Гос. автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого". № 2015131186/02; заявл. 27.07.2015; опубл. 2016.

12. Пат. 160604 (RU – Российская Федерация) МПК В23В 25/06. Устройство для измерения диаметров деталей при токарной обработке / В.И. Анухин, С.А. Любомудров, Т.А. Макарова; Заявлено 27.07.2015; Опубл. 27.03.2016.

A.K. Elagina, T.A. Makarova, S.A. Lyubomudrov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, alisa_1355@mail.ru

SELECTION OF MEANS OF ACTIVE CONTROL FOR PROCESSING OF OUTER DIAMETERS

Abstract

In this paper, the most effective method of active control of the diameter of the crown of the "Gear wheel" part on the finishing turning operation performed on the JET JCK-1630 CNC machine is selected, and the design and operating principle of the installation used are described.

Keywords: active control, turning, measuring bracket.

А.М. Гудкова, Т.А. Макарова, С.А. Любомудров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, gudkova.am@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВА АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация

Статья посвящена системе активного контроля токарной обработки. Рассмотрены существующие схемы контроля внутренних поверхностей контактным методом. В результате предложена новая конструкция скобы на основе существующего патента с применением индуктивного датчика с цифровым выходом, что дает возможность контроля детали между проходами при ее обработке. Ожидается снижение доли брака.

Ключевые слова: Обеспечение качества, токарная обработка, диаметр отверстия, средство активного контроля.

Введение

Обеспечение заданной точности изготовления деталей при точении является одной из главных задач в машиностроении [1 - 7]. Одним из способов её достижения является применение средств активного контроля деталей при изготовлении на станках токарной группы.

Применение систем активного контроля позволяет контролировать процесс изготовления детали, влиять на технологический процесс и уменьшать долю брака. Так как применение таких систем непосредственно в процессе обработки затруднено из-за высоких скоростей обработки, наличия стружки и СОЖ предполагается их использование до или после обработки.

Контроль может осуществляться прямым или косвенным способом. Средства активного контроля могут располагаться на станке и вне станка. По результатам измерения после обработки может быть произведена корректировка вершины режущего инструмента.

Контактные методы контроля являются наиболее надежными и распространенными, в качестве измерительных датчиков наиболее целесообразно применять растровые или индуктивные преобразователи с цифровым выходом.

Минимальную погрешность при контроле диаметра детали на станке имеют двухконтактные схемы контроля [8].

В процессе обработки детали «Проставка поворотная» возникает необходимость контроля размера внутреннего диаметра $56G8^{(+0,056}_{+0,010)}$ в условиях единичного или мелкосерийного производства. Проблема контроля заключается в том, что необходимо автоматизировать процесс измерения размера с целью быстрой подналадки вершины режущего инструмента. Еще одна сложность контроля размера – это маленькая глубина отверстия: 3 мм. На рисунке 1 представлен фрагмент чертежа детали «Проставка поворотная».

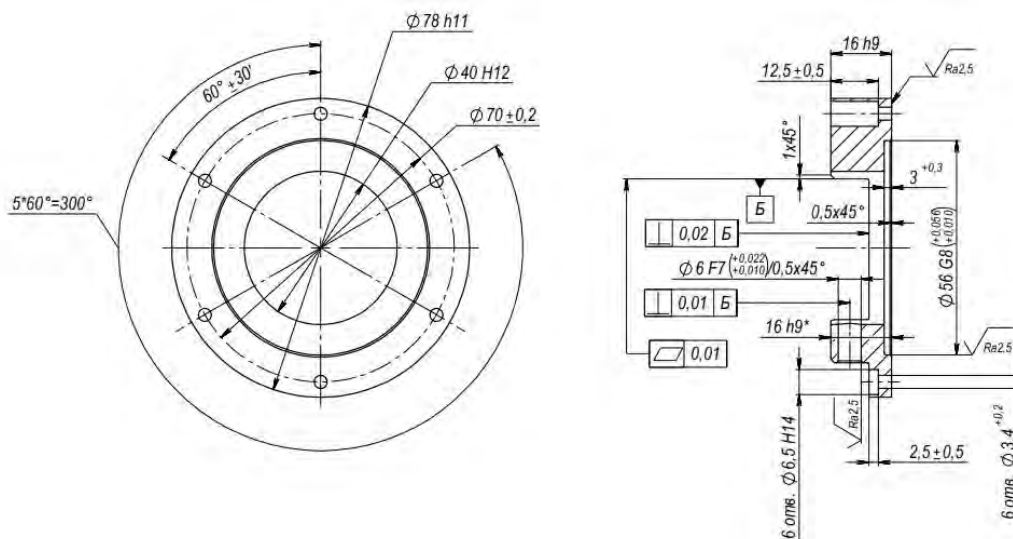


Рисунок 1 – Фрагмент чертежа детали «Проставка поворотная»

Методы

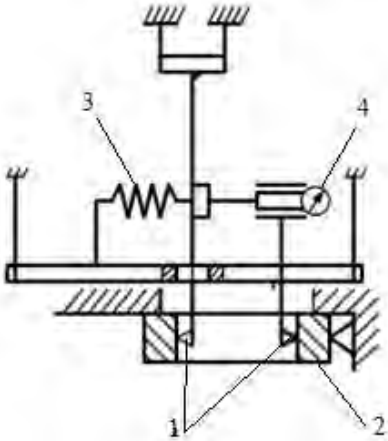
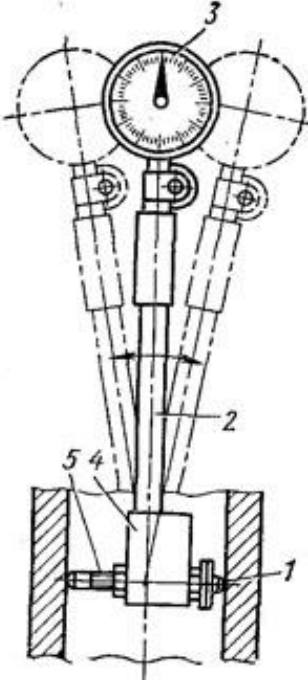
В таблице 1 приведены наиболее распространенные схемы контактного контроля отверстий.

Из общих недостатков представленных схем следует выделить: отсутствие датчиков, имеющих связь с компьютером и невозможность стабильного контакта с поверхностью из-за её малой ширины.

Таблица 1 – Схемы контактного контроля

№	Схема	Недостатки
1	<p>Рисунок 2 – Схема контроля с применением универсального измерительного устройства Универсальное измерительное устройство состоит из: 1 - пальца, 2 – детали, 3 – наконечника, 4 – планки, 5 – микрометра [9]</p>	Наличие пальца (не применимо из-за геометрической конфигурации детали «Проставка поворотная»), отсутствие цифрового выхода данных.

Продолжение таблицы 1

№	Схема	Недостатки
2	 <p data-bbox="272 696 1018 931">Рисунок 3 – Схема контроля с применением измерительного устройства с двумя плавающими измерительными наконечниками Устройство состоит из: 1 – плавающих контактов, 2 – детали, 3 – плоской пружины, 4 – электроконтактного датчика [9]</p>	<p data-bbox="1074 237 1430 510">Базирование осуществляется по наружному диаметру детали и торцу отверстия, что в некоторых случаях не применимо.</p>
3	 <p data-bbox="312 1659 976 1892">Рисунок 4 – Схема контроля с применением нутромера индикаторного Индикаторный нутромер состоит из: 1 – измерительный наконечник, 2 – трубки, 3 – индикатора, 4 – корпуса нутромера, 5 – регулируемого сменного удлинителя [10]</p>	<p data-bbox="1074 936 1430 1209">Не применимо из-за геометрической конфигурации детали «Проставка поворотная», отсутствие цифрового выхода данных.</p>

Продолжение таблицы 1

№	Схема	Недостатки
4	 <p data-bbox="311 846 973 922">Рисунок 5 – Схема контроля с применением нутромера микрометрического</p> <p data-bbox="331 925 952 963">Микрометрический нутромер состоит из:</p> <p data-bbox="256 965 1031 1077">1 – сменный наконечник, 2 – стопорное устройство, 3 – стемель, 4 – барабан, 5 – колпачок, 6 – микрометрический винт [10]</p>	<p data-bbox="1070 237 1430 510">Не применимо из-за геометрической конфигурации детали «Проставка поворотная», отсутствие цифрового выхода данных.</p>

Результаты и обсуждение

Необходимо разработать систему активного контроля, которая позволит получать информацию о точности диаметра $56G8^{+0,056}_{+0,010}$ после обработки на станке.

Наиболее рационально в единичном и мелкосерийном производствах использовать независимые системы измерения. Такой способ контроля позволяет измерять деталь с минимально возможным числом звеньев в измерительной размерной цепи, не зависящих от элементов станка. Кроме того, способ актуален для токарных станков, не снабженных необходимыми датчиками контакта. [11]

Примерами реализации данного способа являются скобы, разработанные и запатентованные в Санкт-Петербургском политехническом университете [12, 13]. Но они предназначены для контроля наружных диаметров деталей.

Разработка новой конструкции на основе существующей скобы [12] позволит использовать её для реализации поставленной задачи. В конструкции скобы изменилась конфигурация толкателя, устройства для арретирования и направления губок с наконечниками (рисунок 6). Скоба состоит из: основания 1, верхнего 2 и нижнего 3 измерительных рычагов, на которых установлены цилиндрические твердосплавные наконечники 4, плоских, параллельно установленных пружин 5, витой пружины 6, регистрирующего датчика 7, настроечного винта 8, щупом датчика 9, пальца 10, оси 11, втулки 12, пружины 13, тел качения 14 и регулируемого упора 15.

На рисунке 6 показана схема контроля скобой отверстия детали 16, закрепленной в патроне 17.

Толкатель перемещения измерительных губок выполнен в виде подпружиненного пальца, состоящего из конической и цилиндрической частей и снабженного осью, установленной в направляющей втулке корпуса с возможностью возвратно-поступательного перемещения. Коническая часть толкателя позволяет измерительным рычагам раздвигаться и устанавливаться в позицию контроля отверстия после того, как регулируемые упоры войдут в контакт с фланцем детали.

Средство измерения - индуктивный датчик, связанный с верхним измерительным рычагом. Он пропущен через сквозной паз на цилиндрической части пальца, его щуп взаимодействует с устройством настроенного винта, размещенным на нижнем измерительном рычаге.

В работе [14] представлена индуктивная измерительная система с датчиками модели М-022 и электронным блоком БИН- 2И (рисунок 7).

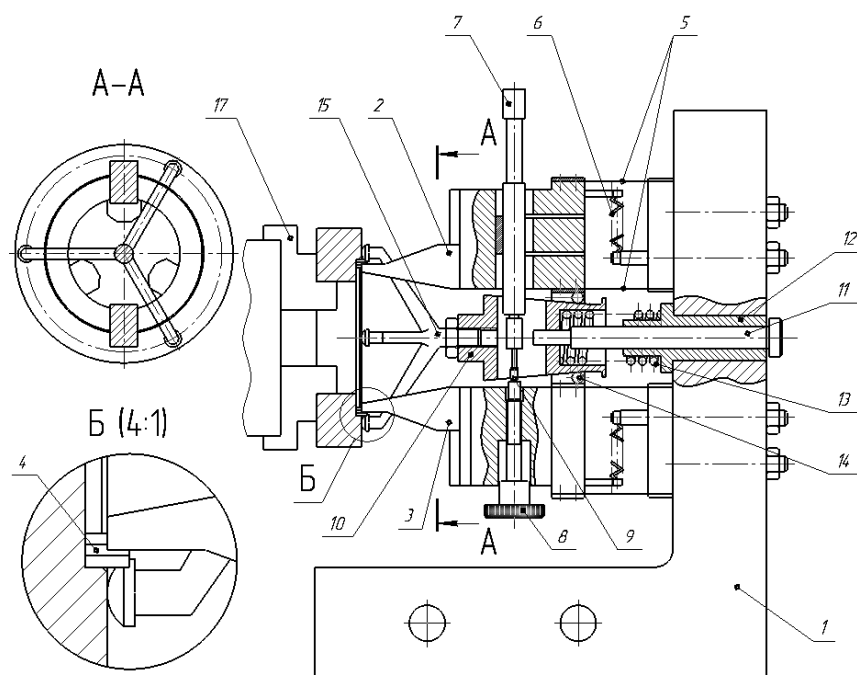


Рисунок 6 – Схема контроля отверстия детали

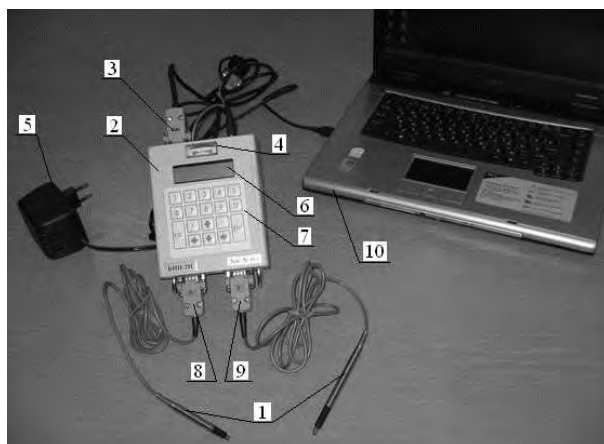


Рисунок 7 – Внешний вид индуктивной измерительной системы

Она предназначена для сбора, обработки и отображения измерительной информации и представляет собой двухканальный прибор для измерения линейных

размеров с помощью подключаемых к нему индуктивных преобразователей осевого действия (индуктивных датчиков) и (или) растровых фотоэлектрических преобразователей (растровых датчиков).

Индуктивная система позволяет решать многие технические задачи:

- проводить точные измерения линейных размеров дифференциальным или абсолютным методом;
- выполнять измерения в труднодоступных местах;
- осуществлять многомерный контроль;
- осуществлять динамические измерения;
- передавать полученные результаты измерений для обработки по каналу связи компьютеру с целью автоматизированного управления технологическими процессами [14 - 16].

В разработанной конструкции скобы (рисунок 6) предполагается применение вышеупомянутой индуктивной измерительной системы с одним датчиком модели М-022, имеющим: диапазон показаний ± 1 мм, диапазон измерений $\pm 0,5$ мм, дискретность отсчета 1 мкм, предел допускаемой погрешности ± 1 мкм и присоединительный диаметр 8 мм.

Скоба крепится на суппорте станка с противоположной стороны от режущего инструмента. Настройка скобы производится с помощью эталонной детали.

Заключение

Применение на станке разработанной скобы дает возможность контролировать внутренние размеры изделий до или после обработки, сократить время на настройку станка, снизить процент брака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
2. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.
3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
4. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.
5. Черныш А.Я., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Модель обоснования сроков модернизации экспортируемой продукции предприятий оборонно-промышленного комплекса // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2022. № 3. С. 45-49.
6. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.

7. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

8. Анухин В.И., Любомудров С.А., Макарова Т. А. Система Автоматической стабилизации размеров при токарной обработке партии деталей // Сборник научных трудов СПбГТУ. - № 504. - «Машиностроение», 2007. - С. 12–18.

9. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учебное пособие / Владимир гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. Гос. ун-та, 2009. -123 с.

10. Колышкин Б.Н., Любомудров С.А., Тарасов С. Б. Метрологическое обеспечение производства. Лабораторный практикум: учебное пособие / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 151 с.

11. Любомудров С.А., Макарова Т.А., Романов А.С. Выбор средств контроля при токарной обработке // Наука и бизнес: пути развития». - 2021. - N 12(126). - С. 48-51.

12. Пат. 160604 (RU – Российская Федерация) МПК В23В 25/06. Устройство для измерения диаметров деталей при токарной обработке / В.И. Анухин, С.А. Любомудров, Т.А. Макарова; Заявлено 27.07.2015; Опубл. 27.03.2016.

13. Пат. 167130 РФ, МПК: G01В 3/00. Устройство для измерения диаметров деталей при токарной обработке/Анухин В. И., Любомудров С. А., Макарова Т. А.; заявлено 27.07.2015; опубл. 2016.

14. Грибанов Д.А., Макарова Т.А./ Применение индуктивных измерительных систем при контроле качества деталей/ Вестник ИНЖЕКОНА. Серия: технические науки. Сборник научных трудов. - Вып. 8. – СПб.: СПбГИЭУ, 2010 – С. 170-181.

15. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318

16. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 4. С. 100-104.

A.M. Gudkova, T.A. Makarova, S.A. Lubomudrov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, gudkova.am@yandex.ru

DEVELOPMENT OF A MEANS OF ACTIVE CONTROL OF INTERNAL SURFACES

Abstract

The article is devoted to the system of active control of turning. The existing schemes of control of internal surfaces by the contact method are considered. As a result, a bracket design is proposed using an inductive sensor with a digital output based on a patent, which makes it possible to control the part between passes during its processing. The share of marriage is expected to decrease.

Keywords: Quality assurance, turning, universal equipment, diametrical size, means of active control.

М.В. Хеук, К.Т. Аббасов, А.Н. Парфиевич, С.Р. Онысько
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ ПОЛИРОВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ Ø50 – 400 ММ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВАЛ» НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОМ СТАНКЕ МОД. 1М63

Аннотация

В работе рассмотрен процесс проектирования приспособления для полировки поверхностей с большой номенклатурой обрабатываемых наружных размеров и обоснование выбора различных конструктивных решений. Выполнен анализ применения такого рода приспособлений в производстве. Показана область применения, пути улучшения конструкции и возможность внедрения в производство. В результате проделанной работы, разработано приспособление, позволяющее совместить полировальные и шлифовальные операции, а также снизить необходимую номенклатуру станочного парка для мелкосерийного производства.

Ключевые слова: полирование, приспособление, механизм натяжения, система автоматического проектирования.

Введение

На машиностроительных предприятиях, в условиях мелкосерийного или единичного типа производства, необходимо увеличить универсальность оборудования для снижения стоимости готовой продукции. Однако, из-за малого объема выпуска, применения единичного или типового технологического процесса и широкой номенклатуры изделий обслуживать на предприятиях большое количество узкоспециализированных станков является нерациональным. Поэтому возникает востребованность в разработке технологической оснастки, позволяющей совмещать различные операции на одном оборудовании. При этом одними из самых дорогостоящими станочным парком являются станки, выполняющие шлифование и полирование поверхностей [1].

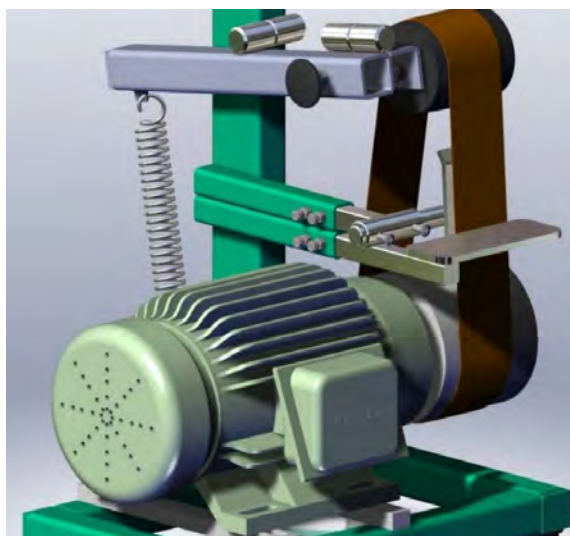
Полирование – отделочная операция обработки деталей для уменьшения шероховатости поверхности. При этом снимаются тонкие слои материала (порядка 0,01 – 0,03 мм), однако полированием невозможно исправить погрешности формы, полученные на предыдущих операциях. После выполнения обработки, параметр шероховатости R_a может быть (0,16 – 0,02) мкм, в зависимости от требований чертежа [2].

Механическое полирование поверхностей осуществляется при помощи абразивных порошков или притирочных паст, которые наносятся на полировальные круги, или абразивные ленты. Так, для полирования заготовок из стали используются порошки из электрокорунда и окиси железа; для полирования заготовок из чугуна – карбид кремния и окись железа; для полирования заготовок из алюминия и медных сплавов – окись хрома. Зернистость абразива, применяющегося для полирования, обычно составляет (3 – 80) и зависит от припуска на обработку. Порошки при этом смешивают со смесью воска, парафина, сала и керосина [3].

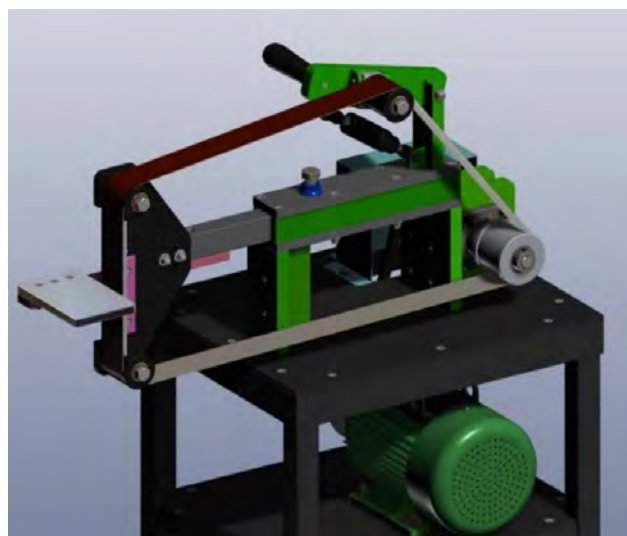
Целью данной работы послужила необходимость проектирования и разработки приспособления для полирования заготовок различной длины и диаметра с

получением параметра шероховатости порядка $Ra\ 0,08\ \mu\text{m}$ на предприятии ОАО «Кузлитмаш» Республики Беларусь.

Для этого был выполнен анализ существующих конструкций приспособлений (рисунок 1).



а)



б)

Рисунок 1 – Используемое оборудование: а) стойка с поджатием ленты; б) приспособление для торцевания заготовок ручным способом

Ввиду возможности использования большей зоны ленты и отсутствием поджатия ленты с обратной стороны, что вызывало бы дополнительное трение поверхности и быстрый износ подложки ленты, приводящее к частой ее замене, в качестве метода полирования была выбрана схема полирования на свободной ветви ленты.

Использование ленты обусловлено рядом преимуществ: постоянная скорость резания; эластичность и упругость ленты; отсутствие необходимости в балансировке и правке инструмента; большое рассеяние теплоты за счет большой рабочей поверхности.

Полирование будет осуществляться полировальной войлочной лентой с применением абразивной пасты по ГОСТ 12439-79.

Данное приспособление будет устанавливаться на токарно-винторезный станок 1М63 в резцедержатель, для быстрой установки и снятия оборудования. Наибольшее расстояние от оси центров до кромки резцедержателя – 320 мм. Высота оси центров над плоскими направляющими станины – 315 мм. Максимальная высота пластины, устанавливаемой в резцедержатель – 53 мм. Габариты проектируемого приспособления не должны превышать данные показатели станка [4].

Для установки приспособления в резцедержатель станка предлагается использовать брусок, аналогичный державке резца, закрепленной при помощи винтов в верхней части резцедержателя.

Компоновка приспособления показана на рисунке 2.

Для установки ленты предлагается использовать систему роликов: трех опорных, натяжного и приводного. Два опорных ролика необходимо разместить на одной вертикальной оси на относительно небольшом расстоянии друг от друга для обеспечения касания ленты с обрабатываемой деталью в точке (при идеальном

состоянии) и во избежание большого отклонения ленты при работе. Опорный ролик, расположенный сверху, необходим для предварительного натяжения ленты, так как изначально лента имеет непостоянство по длине, а в процессе работы происходит ее удлинение. Размещение вверху приспособления обусловлено удобством доступа для регулирования. Опорные ролики имеют цилиндрическую наружную поверхность с буртиками, для предотвращения смещения ленты.

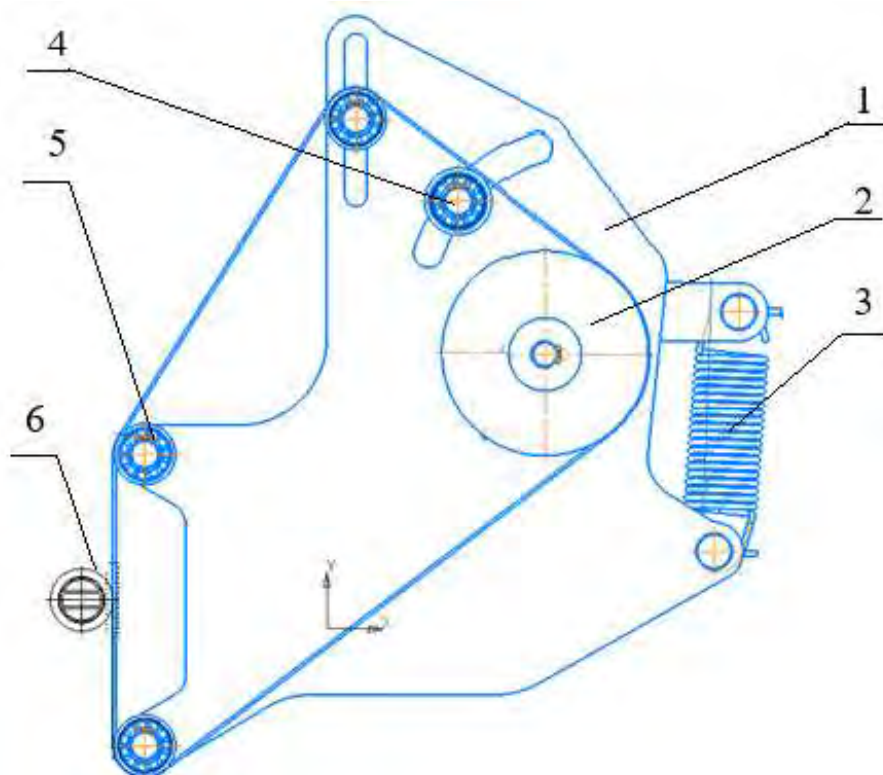


Рисунок 2 – Компоновка приспособления: 1 – корпус, 2 – приводной ролик, 3 – механизм натяжения, 4 – натяжной ролик, 5 – опорный ролик, 6 – заготовка

По мере работы ленты, её длина может увеличиваться до 5% по ГОСТ Р 58860-2020 [5], следовательно, необходимо предусмотреть ее систему натяжения. Механизм натяжения представляет собой рычаг, с установленным натяжным валом и роликом с одной стороны и пружины растяжения, прикрепленной к осям. Для натяжения ленты во время работы и предотвращения ее смещения, натяжной ролик необходимо выполнить бочкообразным. Все ролики следует располагать с внутренней стороны ленты, для исключения быстрого абразивного износа их поверхностей.

Натяжной ролик должен располагаться по внутреннему контуру ленты, так как при ее натяжении площадь контакта приводного ролика с лентой будет уменьшаться.

В приводном ролике необходимо предусмотреть шпоночный паз, боковая поверхность которого будет воспринимать крутящий момент от приводного вала при помощи шпонки. Данный ролик размещается в правой части приспособления, ввиду размеров токарного станка 1М63.

Электродвигатель передает крутящий момент на приводной вал через втулочно-пальцевую муфту для нивелирования осевых отклонений.

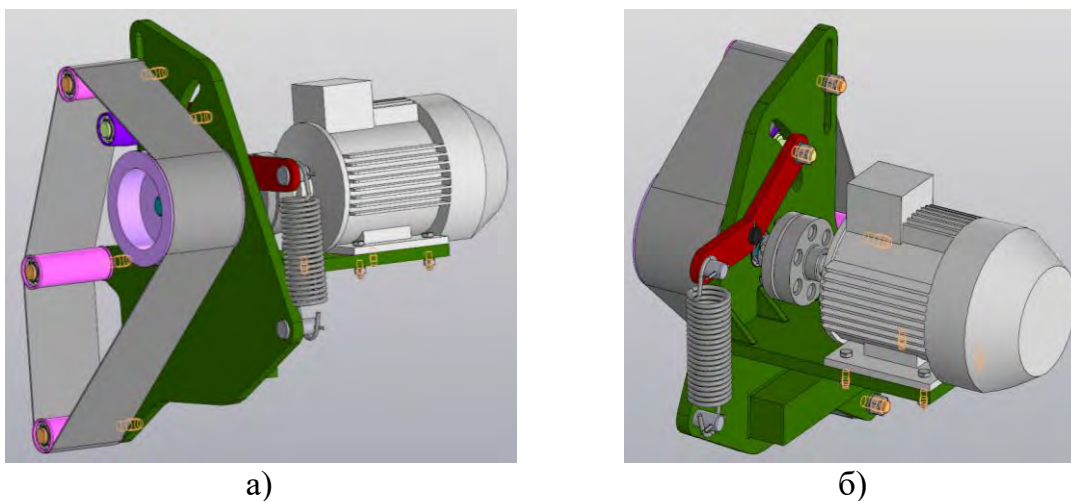
В качестве схемы крепления электродвигателя рассмотрим возможность установки на лапки, так как фланцевое крепление потребует использовать большее

пространство на плоскости корпуса и потребуется дополнительное увеличение габаритов для механизма натяжения ленты.

Методы

Для достижения поставленной цели использовалась современная система автоматического проектирования «КОМПАС-3D». С ее помощью была разработана концептуальная идея приспособления, просчитаны возможные положения узлов и механизмов, проведен анализ параметров массово-центровых характеристик и разработана конструкторская документация.

Для наглядности предложенного приспособления было выполнено 3D моделирование приспособления (рисунок 3) для дальнейшей разработки конструкторской документации и производству опытного образца.



а) б)
Рисунок 3 – 3D модель приспособления:
а) общий вид; б) механизм натяжения ленты

Результаты и обсуждение

В ходе испытаний были выявлены следующие узлы, которые возможно доработать и улучшить: добавить механизм осцилляции ленты, улучшающий качество процесса полирования благодаря изменению положения абразивных зерен и предотвращению их перемещения по одному пути. Кроме полирования, данная конструкция позволила частично использовать ее для процесса шлифования поверхности, ввиду схожего процесса работы и доступностью шлифовальных лент.

Заключение

Разработанная и представленная в данной работе конструкция приспособления может быть использована для машиностроительных предприятий с единичным и мелкосерийным типом производства для уменьшения количества используемых станков шлифовального типа.

В настоящее время ведутся разработки по совершенствованию конструкции приспособления и его внедрения в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов, К.Ф. Справочник технолога машиностроителя В 3 т. Т.1 - М. Машиностроение, 1973.

2. Антонюк, В.Е. Конструктору станочных приспособлений.: Справ. пособие. - Мн.: Беларусь, 1991. - 400с.: ил.

3. Абразивная обработка: наладка, режимы резания. 2-е изд., перераб. и доп. Справочник / под общей ред. А.А. Дьяконова – Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2012. - 388 с.

4. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 2 - 8-е изд., перераб. и доп. под ред. И.Н. Жестковой. - М.: Машиностроение, 2001. - 912 с.

5. Бутенко, А.Ф. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие / А.Ф. Бутенко, А.Б. Портаков. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. - 178 с.

M.V. Kheuk, K.T. Abbasov, A.N. Parfievich, S.R. Onysko
Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

A DEVICE FOR POLISHING CYLINDRICAL SURFACES Ø 50 – 400 MM OF "SHAFT" TYPE PARTS ON A UNIVERSAL TURNING AND SCREW-CUTTING MACHINE MOD. 1M63

Abstract

The paper considers the process of designing a device for polishing surfaces with a large range of processed external dimensions and the rationale for choosing various design solutions. The analysis of the use of such devices in production is carried out. The scope of application, ways to improve the design and the possibility of introduction into production are shown.

As a result of the work done, a device has been developed that allows combining polishing and grinding operations, as well as reducing the necessary range of machine tools for small-scale production.

Keywords: polishing, adaptation, tension mechanism, automatic design system.

Д.П. Гасюк, В.А. Косова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия, kosova.va@yandex.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ПОЗАКАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

В статье анализируется позаказный тип производства, исследуется необходимость оценки качества продукции и качества технологических процессов. Проводится анализ существующих подходов к оценке и применению свойства воспроизводимости. Предлагается методика оценки воспроизводимости технологических процессов, основанная на определении показателей, влияющих на процесс технологической подготовки производства. Подход, основанный на определении единичных показателей, позволит проводить оценку качества технологического процесса в условиях неопределённости межзаказного интервала.

Ключевые слова: Воспроизводимость технологического процесса, интервал между заказами, качество продукции, позаказное производство.

Введение

Этап разработки технологического процесса в ходе технологической подготовки производства оказывает существенное влияние на продолжительность и трудоёмкость процесса постановки продукции на производство [1 - 4]. На данном этапе закладывают базу для обеспечения таких свойств технологического процесса, как его точность и стабильность, реализация которых в процессе производства оказывает существенное влияние на качество производимой продукции.

Методы

Для достижения поставленной цели проведен анализ взаимосвязи понятий качества продукции и качества процесса, даны определения понятиям качества и воспроизводимости технологического процесса, разработана методика оценки воспроизводимости технологического процесса с использованием методов статистической оценки.

Результаты и обсуждение

В настоящее время распространение философии постоянного улучшения качества и более глубокое понимание качества как понятия, являющегося составной частью качества менеджмента и связанного с совокупностью свойств исследуемого объекта, позволяет судить о том, что понятие качества применимо не только к самому продукту, но и к процессам, которые реализуются для создания продукта, и тоже обладают совокупностью свойств, влияющих на достижение требуемого уровня качества создаваемого продукта. В данном случае на достижение требуемого уровня качества создаваемой продукции в ходе реализации технологического процесса существенное влияние оказывают свойства технологического процесса - его точность и стабильность. Выше изложенное позволяет судить о том, что, если технологический процесс имеет совокупность свойств, то по аналогии с определением качества

продукции представляется возможным выделить категорию качества технологического процесса. Следовательно, под качеством технологического процесса (ТП) будем понимать совокупность его свойств, степень реализации которых в условиях производства позволяет обеспечить требуемый уровень качества продукции. Данное определение качества процесса и его взаимосвязь с качеством продукции, достигаемым в ходе реализации ТП, позволяет судить о том, что, если не будет обеспечено качество ТП, то достичь требуемое качество продукции станет невозможно, как и достичь высокий уровень качества менеджмента. Проведенный анализ взаимосвязи качества продукции и качества технологического процесса приводит к смещению акцента с качества продукции на качество технологического процесса. Качество ТП первично. Для обеспечения постоянного повышения качества продукции необходимо постоянно повышать качество ТП её изготовления. Взаимосвязь понятий в общем виде изображена на рисунке 1.

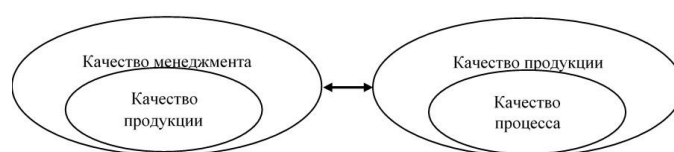


Рисунок 1 – Взаимосвязь понятий «качества»

При этом необходимо учитывать, что каждому типу производства применимы разные методики оценки и повышения качества продукции и процессов ее создания. На сегодняшний день в машиностроении наметилась тенденция перехода от производства массового продукта к производству продукции на основе заказов, отражающих конкретные требования потребителей [5]. Данные изменения условий производства продукции, которые отразились на подходах получения и выполнения требований разных заказчиков, привели к возникновению позаказного типа производства продукции.

Позаказный тип производства - это производство, в котором объем и номенклатура партий, а также повторяемость их изготовления зависит от требований конкретного заказчика [6].

В процессе анализа позаказного типа производства авторы выделили следующие факторы, которые необходимо учитывать в начале процесса создания продукции: индивидуальные требования заказчика в каждом заказе; неопределённость объёма партии заказа; неопределённость продолжительности времени между заказами.

В данных условиях позаказного производства важную роль в обеспечении качества продукции играет качество ТП её изготовления.

При рассмотрении технологических процессов как объекта управления с позиций процессного подхода, необходимо определить перечень показателей качества процесса для оценки эффективности их выполнения [7].

В новых условиях позаказного производства появились новые факторы, оказывающие существенное влияние на свойства ТП. В первую очередь, фактор, связанный с высокой степенью неопределённости продолжительности времени между заказами, и, влияющий на степень сохранения свойств точности и стабильности ТП в условиях длительного перерыва в его не востребованности. Данное обстоятельство требует принимать меры по обеспечению (воспроизведению)

требуемой степени свойств точности и стабильности ТП при существенных временных перерывах между заказами на продукцию.

В статистических методах управления качеством продукции широко используется понятие воспроизводимости. Методика оценки индексов воспроизводимости процессов приведена в ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Показатель воспроизводимости процесса – мера собственной изменчивости процесса [8]. Перед расчетом данного показателя необходимо убедиться, что процесс находится в статистически управляемом состоянии с использованием контрольных карт Шухарта. Данный показатель активно применяется на практике [9, 10] как способ управления процессами, позволяющий оценивать изменчивость процессов и, как следствие, сокращать затраты на контроль продукции. Однако в данном случае воспроизводимость является свойством, в основе которого заложен контроль качества продукции и оценка параметров продукции в границах поля допуска.

Практика работы в рамках позаказного типа производства указывает на то, что при постановке продукции на производство, необходимо определить возможность использования существующего ТП для выполнения полученного заказа. При этом факторы неопределённости выявили необходимость выделения свойства ТП, которое и позволило бы оценивать возможность применения ТП от заказа к заказу – свойство воспроизводимости.

Воспроизводимость ТП – свойство сохранять точность и стабильность исполнения ТП при длительных временных перерывах между заказами. Свойство воспроизводимости целесообразно оценить через показатель воспроизводимости.

Значение показателя воспроизводимости определяется как вероятность того, что при перерыве между заказами сохранится возможность выполнения заданного технологического процесса без потери его качества.

Чем больше временной интервал между заказами, тем меньше вероятность того, что заданный ТП возможно использовать при выполнении заказа. Таким образом, в процессе работы вероятность воспроизводимости ТП изменяется в пределах от 1 до 0.

На показатель воспроизводимости, с одной стороны, влияет интервал времени между заказами $T_{мз}$ – период времени между заказами продукции, после которого необходимо проводить мероприятия по подготовке производства и корректировке ТП. С другой стороны, показатель воспроизводимости зависит от количества требуемых изменений, которые необходимо внести в ТП для обеспечения заданного уровня качества продукции.

Согласно ГОСТ Р 15.301-2016 подготовку и освоение производства, проводят с целью обеспечения готовности производства к изготовлению и выпуску (поставке) вновь разработанной (модернизированной, модифицированной) либо выпускавшейся ранее другой организацией продукции [11].

Решение вопросов, связанных с постановкой продукции на производство, чаще всего зависит от объемов поступающих заказов и их периодичности [12]. Если перерыв между заказами небольшой и соотносится с продолжительностью ТП либо с временем между периодическими испытаниями продукции, то можно полагать, что выбранный ТП обеспечивает заданный уровень качества продукции. При длительном перерыве между заказами вероятность того, что потребуется полная переработка ТП и использование существующего ТП нецелесообразно, возрастает. Соответственно, воспроизводимость ТП падает.

В качестве основных мероприятий по подготовке производства и корректировке ТП стоит выделить следующее: обеспечение оборудованием; обеспечение производства необходимым персоналом; поиск и обеспечение производства новыми материалами и комплектующими изделиями; необходимость внесения корректировок в действующую технологическую документацию [13 - 18]. Данные мероприятия влияют на показатель воспроизводимости. Степень влияния зависит от Тмз и выражается через соответствующие значения единичных. Виды показателей и формулы для расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Единичные показатели, характеризующие воспроизводимость ТП

№	Вид показателя	Определение и формула для расчета показателя
1	Показатель использования оборудования	Представляет собой отношение количества нового оборудования N_{nov} , которое необходимо задействовать в ТП, к общему количеству оборудования, которое используется в данном ТП N_{ob} : $P_1 = \frac{N_{nov}}{N_{ob}} \quad (1)$
2	Показатель подготовки персонала	Представляет собой отношение количества нового (неаттестованного) персонала N_{NP} к общему количеству персонала, задействованного в выполнении ТП N_{OP} : $P_2 = \frac{N_{NP}}{N_{OP}} \quad (2)$
3	Показатель проработанности документации	Представляет собой отношение количества вносимых изменений в технологическую документацию N_{ID} (количество извещений об изменениях) к общему количеству документации ТП N_{OD} : $P_3 = \frac{N_{ID}}{N_{OD}} \quad (3)$
4	Показатель использования материала и комплектующих	Представляет собой отношение количества новых материалов и комплектующих N_{NMK} к общему количеству материалов и комплектующих, используемых в ТП N_{MK} : $P_4 = \frac{N_{NMK}}{N_{MK}} \quad (4)$

Вероятность воспроизводимости ТП P'_i по каждому из показателей определяется статистической оценкой:

$$P'_i = 1 - P_i, \quad (5)$$

где P_i - значение показателей, при $i = 1 \dots 4$

Таким образом, вероятность воспроизводимости ТП P_{BC} выражается следующей формулой:

$$P_{BC} = 1 - \prod_{i=1}^N P'_i \quad (6)$$

Чем больше интервал между заказами Тмз, тем меньше вероятность воспроизводимости ТП. Если вероятность воспроизводимости ТП близка к 1, значит внесение изменений в ТП не требуется, технологическую подготовку производства

проводить не целесообразно. Если вероятность воспроизводимости ТП близка к 0, значит требуется полный пересмотр ТП.

Прогнозируемый характер изменения вероятности воспроизводимости ТП P_{BC} от продолжительности временного интервала между заказами - $T_{мз}$ приведен на рисунке 2.

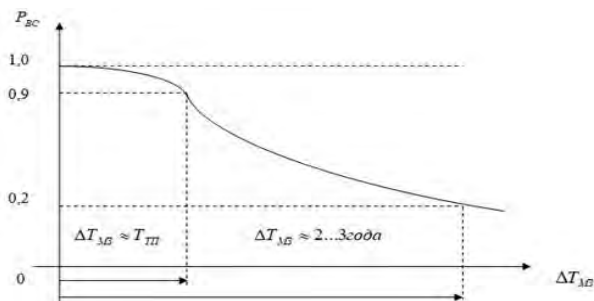


Рисунок 2 – Изменение показателя воспроизводимости P_{BC} от $T_{мз}$

Трудоемкость выше указанных единичных показателей также зависит от $T_{мз}$. Поэтому при расчете воспроизводимости ТП необходимо выделить три интервала $T_{мз}$: первый интервал – $T_{мз}$, равный временному интервалу заданного ТП; второй интервал – $T_{мз}$, равный интервалу 2-3 года; третий интервал – $T_{мз}$ более 3 лет.

В зависимости от типа $T_{мз}$ определяются веса показателей, влияющих на время технологической подготовки производства. Например, при первом интервале $T_{мз}$, в первую очередь, целесообразно рассмотреть переход на новые материалы и комплектующие. При этом не понадобится дополнительная настройка оборудования и аттестация персонала. При третьем интервале $T_{мз}$ наиболее трудоемкими факторами станут обучение и аттестация персонала, а также внесение корректировок в технологическую документацию. Вес показателей в каждом случае определяется методом попарных сравнений с помощью экспертной оценки

Заключение

Основными преимуществами использования расчета вероятности воспроизводимости ТП являются следующие:

- значение показателя учитывает факторы, влияющие на качество технологического процесса при перерывах между заказами.

- достаточно простая интерпретация полученного значения показателя позволяет судить о возможности запуска производства по разработанному ранее технологическому процессу.

- значение показателя может быть использовано при расчетах в более сложных методиках выбора рационального варианта технологического процесса.

Таким образом, анализ новых условий зарождения и развития в отечественном машиностроении позаказного производства позволил выявить новые факторы, влияющие на качество ТП, следовательно, и на качество изготавливаемой продукции и их взаимосвязи. Фактор неопределённости временного перерыва между заказами потребовал для сохранения качества ТП наделение его новым свойством - воспроизводимости. В условиях позаказного производства возникает объективная необходимость мониторинга данного свойства в интересах обеспечения требуемого уровня качества продукции. Выше изложенная методика позволяет проводить оценку данного свойства и его влияние на качество технологического процесса, а,

следовательно, и на качество продукции в новых условиях позаказного производства продукции машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

2. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.

3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

5. Косова, В.А. К вопросу анализа разработки технологических процессов машиностроительных предприятий / Косова В.А., Гасюк Д.П. - Текст : электронный // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2021. - №2 - С. 655-658. - URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44895083_88593118.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

6. Гасюк, Д.П. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях / Д.П. Гасюк, В.А. Косова. - // Текст : электронный // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - ISSN 2223-0807. - С. 341-355. - URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/id22-39.pdf/download/id22-39.pdf> (дата обращения: 27.10.2022).

7. Кравченко, Е.Г. Методика оценки качества технологических процессов / Кравченко Е.Г., Забарина Т.Ю., Степанов А.А. - Текст : электронный // Современные материалы, техника и технологии. - 2016. - №1(4) - С. 118-121. - URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25516808_45982644.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

8. ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса.- Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 36 с.

9. Клячкин В.Н. Оптимизация многомерного статистического контроля рассеяния показателей технологического процесса / Клячкин В.Н., Алексеева А.Ю. – Текст : электронный // Программные продукты и системы. - 2021. - Т.35 - №2 - С. 215-221. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-mnogomernogo-statisticheskogo-kontrolya-rasseyaniya-pokazateley-tehnologicheskogo-protsesta/viewer> (дата обращения: 25.10.2022).

10. Лунина Ю.А. К вопросу о применении контрольных карт и индексов воспроизводимости/ Лунина Ю.А., Галуза Д.В., Зинина М.С., Соловьева Е.А. – Текст : электронный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. –

2010.-Т.35-№4(4)-С.787-790.-URL:

<http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/20104787790.pdf> (дата обращения: 25.10.2022).

11. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство.- Москва : Стандартинформ, 2018. - 16 с.

12. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Коханова Н.М., Малькова А.Л. Выбор структуры производственных функций на основе синтеза безальтернативных статистических гипотез // Вестник Российской таможенной академии. 2008. № 4. С. 74-79.

13. РД 50-532-85. Методические указания. ЕСТПП. Аттестация технологических процессов/- Москва : издательство стандартов, 1986. - 57 с.

14. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 4. С. 100-104.

15. Тебекин А.В., Сауренко Т.Н., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.

16. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Богоева Е.М., Веселко А.А., Сысуев С.Ю. Модель и метод комплексной стандартизации сложных технических систем // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 2. С. 20-29.

17. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.

18. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

D. P. Gasyuk, V.A. Kosova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
kosova.va@yandex.ru

A METHODOLOGY OF ASSESSING THE ENGINEERING PROCESS REPEATABILITY UNDER CONDITIONS OF MAKE-TO-ORDER PRODUCTION

Abstract

The article offers an analysis of the make-to-order type of production with respect to the quality assessment of both the output product and the engineering process. A study in the existing approaches to assessing and applying the condition of repeatability is provided. The proposed methodology of assessing the engineering process repeatability is supported by establishing the parameters that affect the process of the engineering preparation of the production. The approach based on the determination of individual parameters will contribute to the assessment of the engineering process under conditions of make-to-order production with uncertain time intervals between orders.

Keywords: Performance of the technological process, order cycle, product quality, make-to-order production.

Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В. Яковицкая
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, l_ekaterina_1@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ОТВЕРСТИЯМИ ПРИ СВОБОДНОЙ ГИБКЕ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация

Ключевым фактором успешного производства гнутых изделий является разработка технологического процесса свободной гибки при листовой штамповке, обеспечивающий заданную точность размеров, форму отверстий, которые располагаются в готовом изделии. Кроме того, важным условием получения высококачественных изделий является использование точной (расчетной) развертки заготовки. В связи с этим нами были рассмотрены вопросы автоматизации проектирования технологического процесса, исключая этап обработки опытного образца на гибочном станке. Получение номограмм зависимости расположения отверстия от линиигиба, дающих определить условия обеспечения требуемой геометрии отверстия, предоставит избежать возможность брака.

Ключевые слова: свободная гибка, качество детали, изменение формы, номограммы, автоматизация, точность гибки

Введение

Согласно ГОСТ 15467-79 технико-экономическое понятие «качество продукции», в отличие от философского понятия «качество», охватывает только те свойства продукции, которые связаны с возможностью удовлетворения продукцией определенных общественных или личных потребностей в соответствии с ее назначением. К основным факторам, лимитирующим долговечность и надежность изделий (эксплуатационные характеристики качества) относятся: повреждение поверхностей изделий, деформации детали, которые могут увеличивать контактные напряжения до предельных значений. Качество и надежность деталей напрямую зависят от точности геометрических значений изделий. Сокращение погрешностей при изготовлении изделий повышает точность, а значит повышает качество производства в целом [1 - 9].

Полученные результаты в данной работе позволяют в производственных условиях проектировать технологию свободной гибки листовых материалов различной толщины с расположенными на них отверстиями, которая исключает предварительную обработку на этапе экспериментальной подготовки штамповки к серийному изготовлению изделий, а также позволяет технологу правильно и быстро определить условия выполнения операции гибки, при которых обеспечивается изготовление бездефектных деталей.

Методы

Представленная в работе модель проектирования технологического процесса выполнена с использованием САЕ программ, которая позволяет повысить уровень автоматизации и эффективности проектирования технологических процессов

листовой штамповки. Исследованы параметры технологического процесса и факторы, влияющие на качество получаемых деталей свободной гибкой.

Результаты и обсуждение

При операции гибки могут возникать дефекты, причинами которых являются недостаточная пластичность металла, несвоевременная обработка рабочих поверхностей оснастки, неправильный расчет возможных утонений металла при гибке металла, отсутствие учета обратного пружинения металла [10, 11].

Нами было проведено исследование при использовании программного обеспечения Metamotion Flux, которое представляет собой программу, использующую алгоритмы гибочной операции, учитывающую в расчете К-фактор, физико-механические свойства материала и используемую оснастку [12].

Целью экспериментальных исследований, направленных на изучение изменения геометрической формы и установление предельных расстояний расположения центра отверстий, расположенных на детали от линиигиба. В качестве материала исследования был выбрана углеродистая Сталь 3 и нержавеющая сталь AISI 320. Толщина листа выбрана 1,5 мм.

Исследованию подлежала деталь, состоящая из двух отгибов (полок) под углом 90 градусов с расположенными на них отверстиями. На рисунке 1 представлен чертеж детали №5, а на рисунке 2 представлена развертка листовой заготовки для детали №5. Данные рисунки иллюстрируют геометрию деталей, а также схему расположения отверстия от линиигиба и его диаметр. В ходе проведения экспериментов изменяли расстояния центра отверстия от линиигиба в пределах 0-6,2мм, а диаметр отверстия от 0 до 10мм. В процессе опытной штамповки было изготовлено 310 деталей. После проведения штамповки на каждой детали изучали форму отверстия и измеряли его диаметр. Раскрытие матрицы выбиралось с учетом толщины металла и при условии получения минимальной полки с правильной формой отверстия.

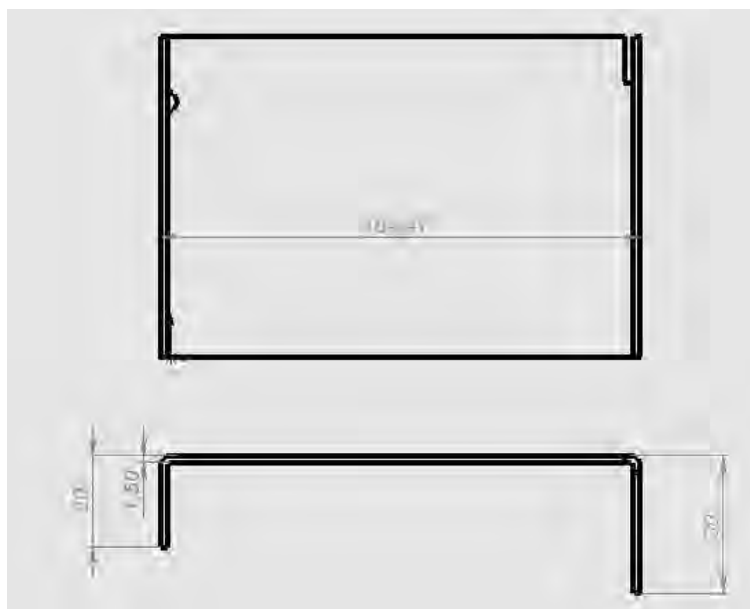


Рисунок 1 – Чертеж детали №5.

По результатам опытной штамповки получены данные измерений отверстий для всех деталей. На основе вышеприведённых данных производился анализ выходных параметров. На рисунке 3 приведен фрагмент расчета программы для

детали №7. Видно, что если центр отверстия диаметром 5 мм, отстоящем от линиигиба на расстоянии 0,2 мм, то изменение геометрии отверстия не наблюдается после гибочной операции.

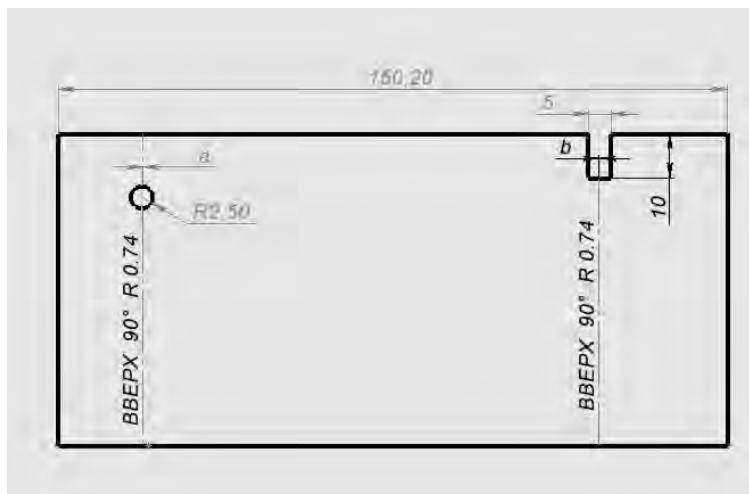


Рисунок 2 – Чертеж развертки исходной заготовки.

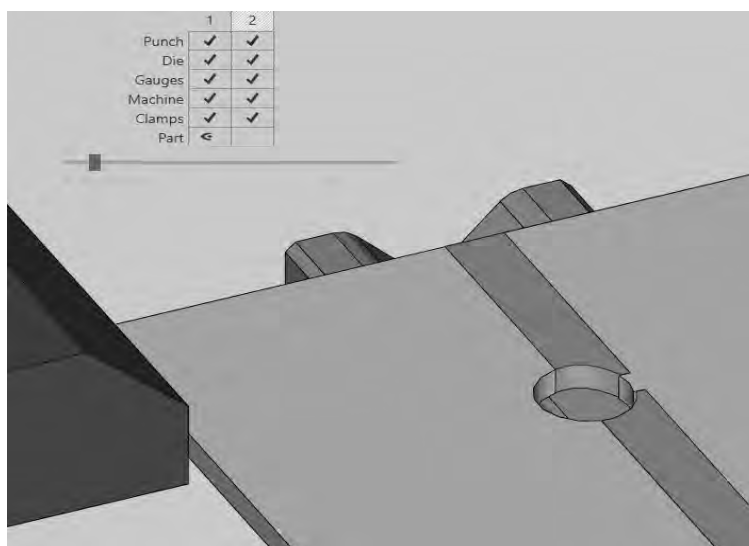


Рисунок 3 – Фрагмент расчета программы MetamationFlux технологического процесса для детали №7

На рисунке 4 приведен фрагмент расчета программы для детали №8. Видно, что если центр отверстия диаметром 5 мм, отстоящем от линиигиба на расстоянии 1,6 мм, то изменение геометрии отверстия наблюдается после гибочной операции.

На рисунке 5 приведена номограмма, построенная по результатам экспериментов, которая отражает технологические возможности получения качественных и дефектных деталей при свободной гибке деталей на которых имеются отверстия в зависимости от расстояния расположения отверстия от линиигиба и диаметра отверстия. На построенной номограмме имеются две области, указывающие условия при которых можно получить бездефектные (качественные) детали и дефектные. Номограмма может служить для прогнозирования качества изготовления детали на этапе предварительного проектирования технологического процесса гибки.

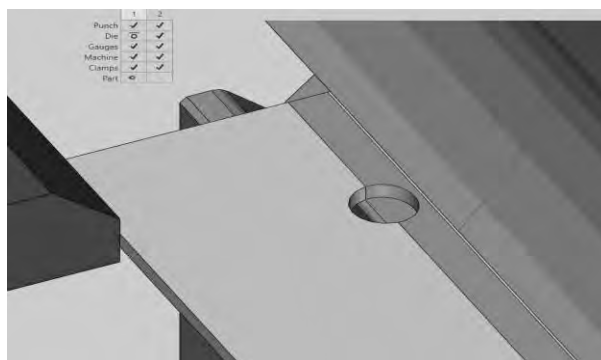


Рисунок 4 – Фрагмент расчета программы MetamotionFlux технологического процесса для детали №8

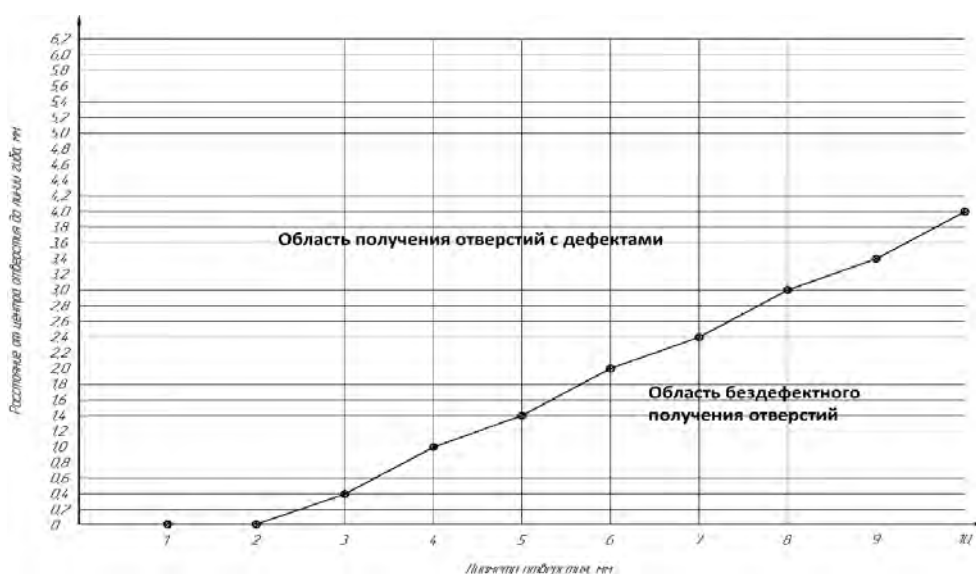


Рисунок 5 – Номограмма определения качества деталей при свободной гибке в зависимости расстояния расположения отверстия от линиигиба и диаметра отверстия. Сталь Ст3 с толщиной листовой заготовки 1,5 мм

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать номограмму, с помощью которой можно на этапе проектирования техпроцесса свободной гибки заранее определить возможность образования дефектов, и исключить возможность изготовления бракованных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
2. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

4. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.
5. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 4. С. 100-104.
6. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.
7. Тебекин А.В., Сауренко Т.Н., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Эволюционная модель прогноза частных показателей инновационных проектов (на примере технических инноваций)// Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 6. С. 55-61.
8. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.
9. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.
10. Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки: учеб. пособ. для вузов / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 480 с.
11. Жарков В.А. Перспективы. экономии металла в листоштамповочном производстве. Кузнечно-штамповочное производств. - 1991. - №12. - С.7-11
12. Сайт программного обеспечения MetamationFlux: [Электронный ресурс]. URL: <https://metamation.com/flux-offline-bending-software/> (Дата обращения: 15.09.2022).

E.L. Levashova, M.M. Radkevich, M.V. Yakovickaya
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia,
l_ekaterina_l@mail.ru

STUDY OF THE QUALITY OF A PART DEPENDING ON THE LOCATION OF HOLES IN SHEET METAL WITH AIR BENDING

Abstract

A key factor in successful production is the creation of a air bending process in order to increase the accuracy of the calculation of the development and eliminate possible hole deformations during free bending. Therefore, the following research tasks were set: to increase the automation of the creation of the technological process, excluding the stage of testing a prototype on the machine. Create diagram of holes relative to the bend line to calculate the conditions for the formation of hole deformations during air bending. The data should be taken into account when developing drawings for manufacturability in order to avoid possible defect.

Keywords: air bending, part quality, deformations, automation, bending accuracy.

МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ В ДИСКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Аннотация

В работе рассматриваются профильные пазы, для крепления турбинных лопаток. На примере паза диска газовой турбины большой мощности, имеющего елочный профиль описываются методы формообразования: электроэрозионная обработка; протягивание, фрезерование, и производится сравнительный анализ с указанием преимуществ и недостатков.

Ключевые слова: замковая часть лопатки, диск газовой турбины, обработка профильных пазов.

Введение

Конструктивный элемент, соединяющий диск газовой турбины с хвостом лопатки называется замковой частью. Замковая часть со стороны диска – профильный паз, имеющий различную геометрию, на рис. 1 представлены некоторые типы форм.

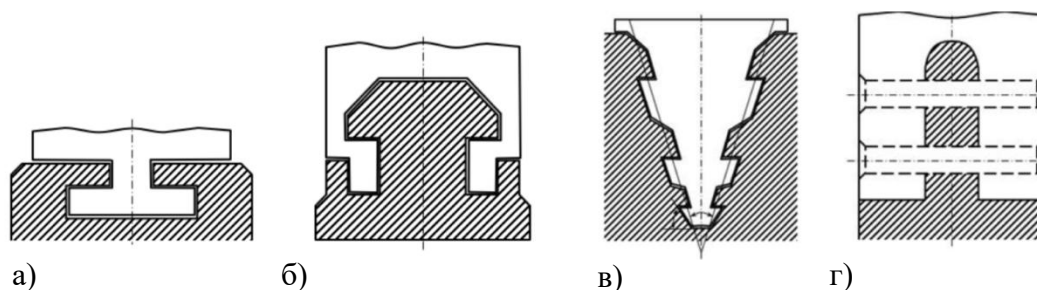


Рисунок 1 – Виды замковых частей: а) Т-образный тип;
б) Грибовидный тип; в) Ёлочный тип; г) Вильчатый тип

Выбор замковой части осуществляется после проведения расчетов на прочность лопатки, которые зависят от ее длины и испытываемой нагрузки. При использовании Т-образного типа крепления (при проведении ремонтных работ) конструкция не позволяет производить замену одной лопатки, что влечет за собой демонтаж всей конструкции.

Наиболее удобными для обслуживания являются конструкции с вильчатым типом, которые устанавливаются в паз и закрепляются сверху с помощью замков.

Самый распространенный и надежный тип крепления – елочный. Елочное крепление может состоять из нескольких ярусов, в которых пары зубьев, выдерживают центробежную нагрузку в несколько тонн, опираются на выступы паза. Изготовление такого профиля крепления требует высокой точности, так как из-за неравномерного распределения нагрузки возможно появление усталостных трещин.

Эти поверхности относятся к наиболее нагруженным и ответственным элементам газотурбинного двигателя. [1, с.59]

Так как в большинстве современных газовых турбинах используется технологически сложный профиль – елочный, рассмотрим методы его формообразования.

Профильные пазы в дисках газовых турбин можно получить с помощью:

- Электроэрозионной обработки;
- Фрезерования;
- Протягивания.

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Выбор способа обработки зависит от технического оснащения производства, требований к поверхностному слою, точности размеров, геометрии профиля паза и типа производства [2 - 8].

На рис. 2 указан профильный паз одной из ступени газовой стационарной турбины большой мощности, проанализировав который, можно сделать вывод о высоких конструкторских требованиях, которые необходимо достичь в процессе производства. Профиль паза был выбран в качестве наиболее технологически сложного в турбине.

Анализ технологичности

Геометрия паза обеспечивает доступ режущего инструмента ко всем поверхностям. Присутствуют глубокие закрытые зоны. Для контроля заданных требований точности размеров, формы и взаимного расположения необходимо применение концевых мер, специальных калибров и шаблонов. Для контроля шероховатости поверхностей возможно применение профилометра. Обеспечивается надежное и удобное базирование при обработке: конструкция детали и назначенные конструкторские базы позволяют соблюсти данное требование.

Основные технологические задачи

Точность размеров

Линейные размеры:

- Допуск размера ($762,6^{+0,10}$ мм) от оси до конструкторской базы равен 0,1 мм и находится между IT7 и IT8;

- Допуск размера ($15,382\pm 0,02$ мм) между верхней поверхностью уклона верхнего яруса и верхней поверхностью уклона среднего яруса равен 0,04 мм и находится между IT8 и IT9;

- Допуск размера ($30,764\pm 0,02$ мм) между верхней поверхностью уклона верхнего яруса и верхней поверхностью уклона нижнего яруса равен 0,04 мм и находится между IT8 и IT9;

- Допуск размера ($44,038^{+0,1}$ мм) между конструкторской базой и поверхностью дна паза равен 0,1 мм и соответствует IT10;

- Допуск размера ($8,932^{+0,062}$ мм) между конструкторской базой и началом радиусного перехода нижней поверхности уклона верхнего яруса равен 0,062 мм и находится между IT10 и IT11;

- Допуск размера ($24,732^{+0,088}_{-0,026}$ мм) между конструкторской базой и началом радиусного перехода нижней поверхности уклона среднего яруса равен 0,114 мм и находится между IT10 и IT11;

- Допуск размера ($46,168_{-0,12}$ мм) между началом радиусного перехода поверхности вершины паза и конструкторской базой равен 0,12 мм и находится между IT10 и IT11;

- Допуск размера ($44,954^{+0,20}$ мм) между впадинами шейки верхнего яруса равен 0,2 мм и находится между IT11 и IT12;

- Допуск размера ($34,801^{+0,20}$ мм) между впадинами шейки среднего яруса равен 0,2 мм и находится между IT11 и IT12;

- Допуск размера ($31,638^{+0,20}$ мм) между поверхностями стенок паза равен 0,2 мм и находится между IT11 и IT12;

- Допуск размера ($24,709^{+0,20}$ мм) между впадинами шейки нижнего яруса равен 0,2 мм и находится между IT11 и IT12;

- Допуск размера ($21,150^{+0,20}$ мм) между выступами шейки среднего яруса равен 0,2 мм и находится между IT11 и IT12;

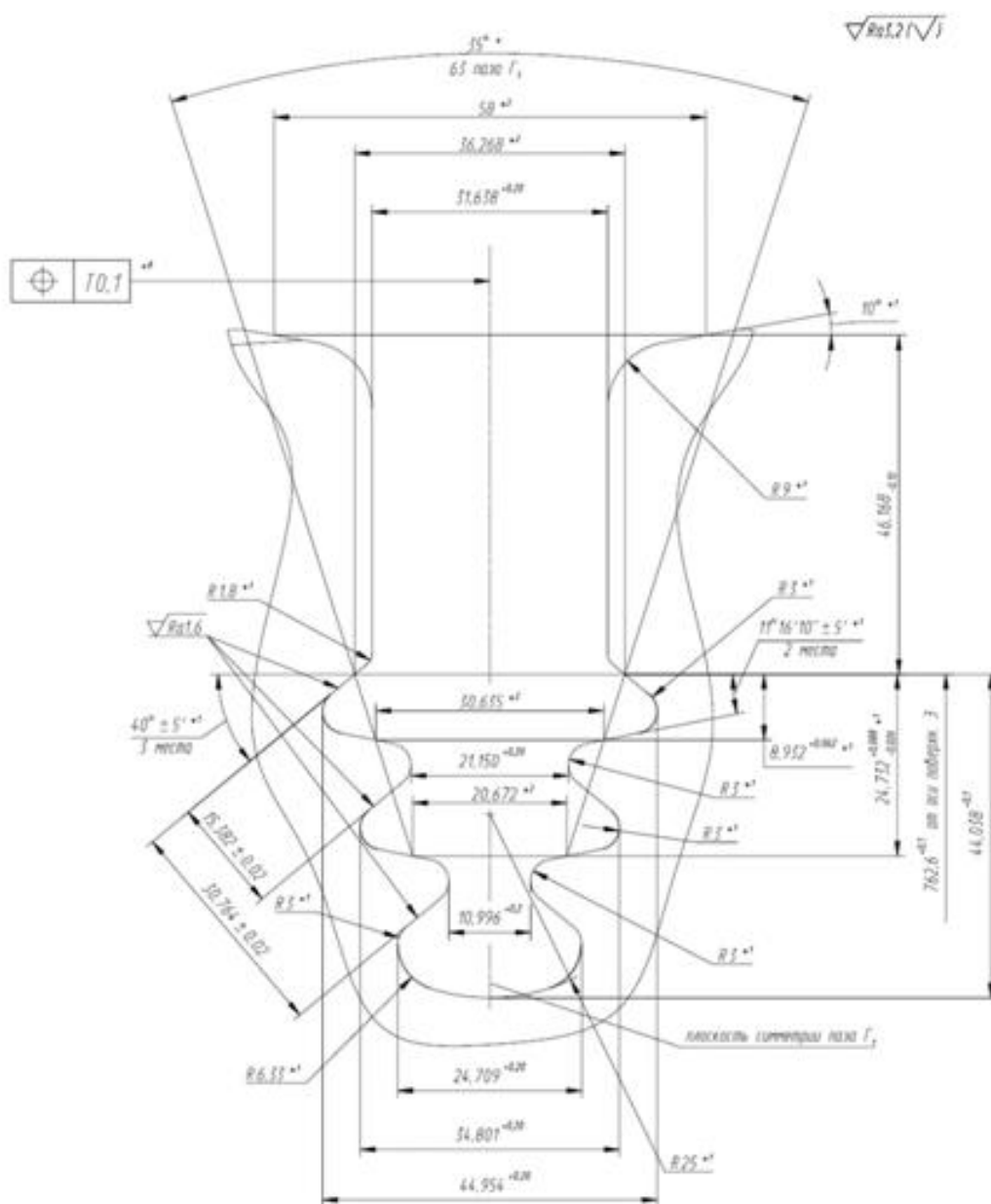


Рисунок 2 – Профильный паз елочного типа

- Допуск размера ($10,996^{+0,20}$ мм) между выступами шейки нижнего яруса равен 0,2 мм и находится между IT12 и IT13;

- Допуски размеров с неуказанными предельными отклонениями на чертеже соответствуют ГОСТ 30893.1-т.

Диаметральные размеры:

- Отсутствуют.

Радиальные размеры:

- Допуски размеров с неуказанными предельными отклонениями на чертеже соответствуют ГОСТ 30893.1-т.

Угловые размеры:

- Допуск размера ($40^{\circ}\pm 5'$) между конструкторской базой и верхней поверхностью уклона верхнего яруса равен $10'$ и соответствует 6 степени точности;

- Допуск размера ($11^{\circ}16'10''\pm 5'$) между конструкторской базой и нижней поверхностью уклона верхнего яруса равен $10'$ и находится между 5 и 6 степенью точности;

- Допуски размеров с неуказанными предельными отклонениями на чертеже соответствуют ГОСТ 30893.1-т;

Точность формы

Особых требований к точности формы не задано, это означает, что точность формы поверхностей не должна превышать 60% от поля допуска на размер.

Точность расположения

Позиционный допуск оси симметрии профильного паза в диаметральном выражении равен 0,1 мм.

Физико-механические свойства материала детали материала поверхностных слоев детали

В качестве материала заготовки для изготовления диска используется сталь 6NiCrMoV145 Mod.

Механические свойства при комнатной температуре представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Механические свойства

Категория прочности	Предел текучести, Н/мм ²	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	Отн. удлинение, %	Отн. сужение, %	Работа удара, Дж	Переходная температура хрупкости, °С
КП 800	800-900	960-1080	14	45	100	≤ -50

Химический состав стали 6NiCrMoV145 Mod представлен в табл. 2 с указанием массовой долей элементов в процентах.

Таблица 2 – Содержание элементов

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	As	Sb	Sn
0,25	не более								не более			
-					1,50	0,38	3,30	0,08				
0,30	0,04	0,04	0,003	0,004	-	-	-	-	0,010	0,008	0,002	0,005
					1,80	0,48	3,70	0,15				

Шероховатость поверхностей

Требования к высоте микронеровностей обработанных поверхностей:

- Верхняя поверхность уклона верхнего яруса имеет шероховатость $R_a = 1,6$ мкм;
- Верхняя поверхность уклона среднего яруса имеет шероховатость $R_a = 1,6$ мкм;
- Верхняя поверхность уклона нижнего яруса имеет шероховатость $R_a = 1,6$ мкм;
- Остальные поверхности выполняются с шероховатостью не более $R_a = 3,2$ мкм.

Сравнение методов обработки

Электроэрозионная обработка – это обработка, включающая в себя разрушение поверхности, для придания заданной формы ввиду действия электрического разряда, возникающего между электродом и заготовкой.

Преимущества электроэрозионной обработки:

- Высокое качество обработанной поверхности;
- Возможность осуществлять работу с материалами, имеющими высокую твердость;
- Возможность получать геометрию сложной формы;
- Проволока, используемая в электроэрозионной обработке значительно дешевле, чем инструмент для механической обработки. [9, с. 129]

Недостатки электроэрозионной обработки:

- Необходимость проектирования специального станка с большим столом, для закрепления заготовки (диаметр заготовки диска более 1600 мм);
- В поверхностном слое при высоких режимах обработки (по результатам металлографического анализа) образуются рыхлые наросты, которые не превышают 3 мкм. [10]. Слой с наростами представляет собой дефектную структуру, контролировать которую можно подбором режимов, при которых его величина минимальна [11];
- Низкая производительность обработки;

Достижимые технические возможности при электроэрозионной обработке представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Технические возможности электроэрозионной обработки

Параметр	Значение
Точность размеров, мкм	5
Шероховатость, мкм	0,1

Фрезерование – способ механической обработки поверхностей многолезвийным инструментом – фрезой, которая имеет вращательное движение.

Преимущества фрезерной обработки:

- Высокое качество обработанной поверхности;
- Высокая производительность обработки;
- Универсальность оборудования, на котором производится обработка;
- Возможность многократной переточки инструмента;
- Возможность получать геометрию сложной формы;

Недостатки фрезерной обработки:

- Необходимость проектировать специальный инструмент, для каждого профиля паза;

- Многоступенчатая обработка с использованием большого количества инструментов, который необходимо привязывать (определять значения вылетов фрез по осям и заносить полученные значения в управляющую программу станка) перед обработкой.

Достижимые технические возможности при электроэрозионной обработке представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Технические возможности фрезерной обработки

Параметр	Значение
Квалитет	7
Шероховатость, мкм	0,8

Протягивание – способ механической обработки поверхностей многолезвийным инструментом – протяжкой, заключающийся в продвижении инструмента вдоль изделия. [12]

Преимущества протягивания:

- Высокая производительность;
- Высокое качество обработанной поверхности;
- Высокая стойкость инструмента;

Недостатки протягивания:

- Необходимость проектировать специальный инструмент, для каждого профиля паза;
- Отсутствие универсальности;
- Долгие подготовительные работы привязке инструмента;
- Сложность переточки инструмента;
- Многоступенчатая обработка с использованием большого количества инструментов.

Достижимые технические возможности при электроэрозионной обработке представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Технические возможности протягивания

Параметр	Значение
Квалитет	7
Шероховатость, мкм	0,2

Заключение

Рассмотренные в данной работе методы обработки профильных пазов в дисках газовых турбин могут быть использованы в качестве производственного решения. Все три метода формообразования: электроэрозионная; протягивание, фрезерование позволяют выдержать заданные технические требования. Выбор способа обработки зависит от типа производства, технологического оснащения, финансовых и временных возможностей.

Метод электроэрозионной обработки позволяет получить профиль с минимальными затратами, но с большими временными потерями.

Метод протягивания является самым дорогим методом, менее универсальным, но самым производительным. Целесообразно применять при обработке больших

партий деталей, а именно в крупносерийном и массовом производстве (из-за высокой стоимости оборудования и инструмента), например, в авиастроении.

Метод фрезерования является менее производительным чем протягивание, но более производительным, чем электроэрозионная обработка, так же метод является универсальным и использовать фрезерное оборудование можно для различных работ помимо обработки пазов.

Следовательно, в рамках единичного и мелкосерийного производства метод фрезерования является наиболее предпочтительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов Г.Д., Расчет и проектирование новой конструкции сборной протяжки для скоростного протягивания деталей газотурбинного двигателя / Г.Д. Петухов// Master'sjournal: сб. статей. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. - М.: ООО «Навигатор», 2014. - С. 59-63.

2. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях// Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

3. Гасюк, Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. – 2019. – С. 31–36.

4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

5. Гасюк Д.П., Ларькин В.В., Косова В.А., Романов А.А. Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 10-18.

6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

7. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.

8. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

9. Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 3-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых (11-12 декабря 2018 года), в 6-х томах, Том 6. Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: ЗАО Университетская книга, 2018, - 338 с.

10. Артамонов Б.А., Волков Ю.С. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки: в 2 ч. Ч. 2. Модели процессов электроэрозионной обработки. Проволочная вырезка. – М., 1991. – 144 с.

11. Кабалдин Ю.Г., Сариллов М.Ю., Биленко С.В. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта. – Комсомольск-на- Амуре, 2007. – 191 с.

12. Вульф А.Н. Резание металлов.- М. Машиностроение. 1973.

N.A. Molchanov^{1,2}, S.A. Lyubomudrov¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
nimo_95@mail.ru

²ООО «Mechanical Engineering», St. Petersburg, Russia

METHODS FOR PROFILE GROOVING IN GAS TURBINE DISCS

Abstract

The paper considers profile grooves for fastening turbine blades. On the example of a disk groove of a gas turbine of high power, having a fir-tree profile, the methods of shaping are described: electroerosive processing; broaching, milling, and a comparative analysis is made, indicating the advantages and disadvantages.

Keywords: blade lock part, gas turbine disk, processing of profile grooves.

Namboodri Tanuj
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, tanuj.namboodri@gmail.com

PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS USING AI

Abstract

Surface roughness is the factor that plays important role in performance of product, increasing demand of product, raise the question on manufacturing technology, Fuzzy logic is used to determine the surface roughness, Experimental data was compared with predicted data from AI, and it is found that predicted data reliable.

Keywords: Surface Roughness, Fuzzy Logic, Artificial Intelligence, Truth Tables, Fuzzy Operator, Machining.

Introduction

In manufacturing, Engenderment with CNC machines is ascending, from minuscule scale manufacturing industries to immensely colossal scale, increasing demand of product withal raise the question of productivity, with hand work the productivity cannot be incremented efficaciously, however utilizing the computer we can increment the productivity at an exponential rate. Utilizing AI to optate manufacturing process is an astute & updated way to increment the engenderment with the quality, surface roughness is a paramount factor in determining the copacetic performance of a workpiece in areas as diverse as tribology, surface coatings, microfluidics and biocompatibility [1]. It is very costly to control precise roughness and to achieve high grade surface roughness will additionally increase the cost of manufacturing ineluctably will increment the cost of the product. To decrease the product value surface roughness should be controlled, however experimentation can be expensive and takes a lot of time, for prediction of surface roughness Fuzzy logic can be used, Fuzzy logic works on the degree of truth [2], normally answers are True or False, But in Fuzzy logic, answers could be 10% True 90% False or anything else. [3, p1] Fuzzy Logic based on the following, Degree of Truth, Value between 0 and 1 and Multi value.

Methodology

The analytical data (Table 1) from the research [4] was considered, Finish cut of aluminum material, $D = 6.0$ mm, No. of flutes = 4, HSS tool cutter, Analytical result for aluminum plate.

Table 1 – Analytical data of finish cut of aluminum material

Input	n_1	n_2	n_3
Cutting speed (V_c) ($m\ min^{-1}$)	15.24	20	30.48
Feed (f_2), ($mm\ tooth^{-1}$)	0.29	0.50	0.35
Spindle speed (N) ($rev\ min^{-1}$)	808.51	1061.03	1617.01
Feed rate (f) ($mm\ min^{-1}$)	937.87	2122.07	2263.82

Based on data (Table 1) Fuzzy Logic operator was structured to predict the surface roughness of the finish cut of aluminum material.

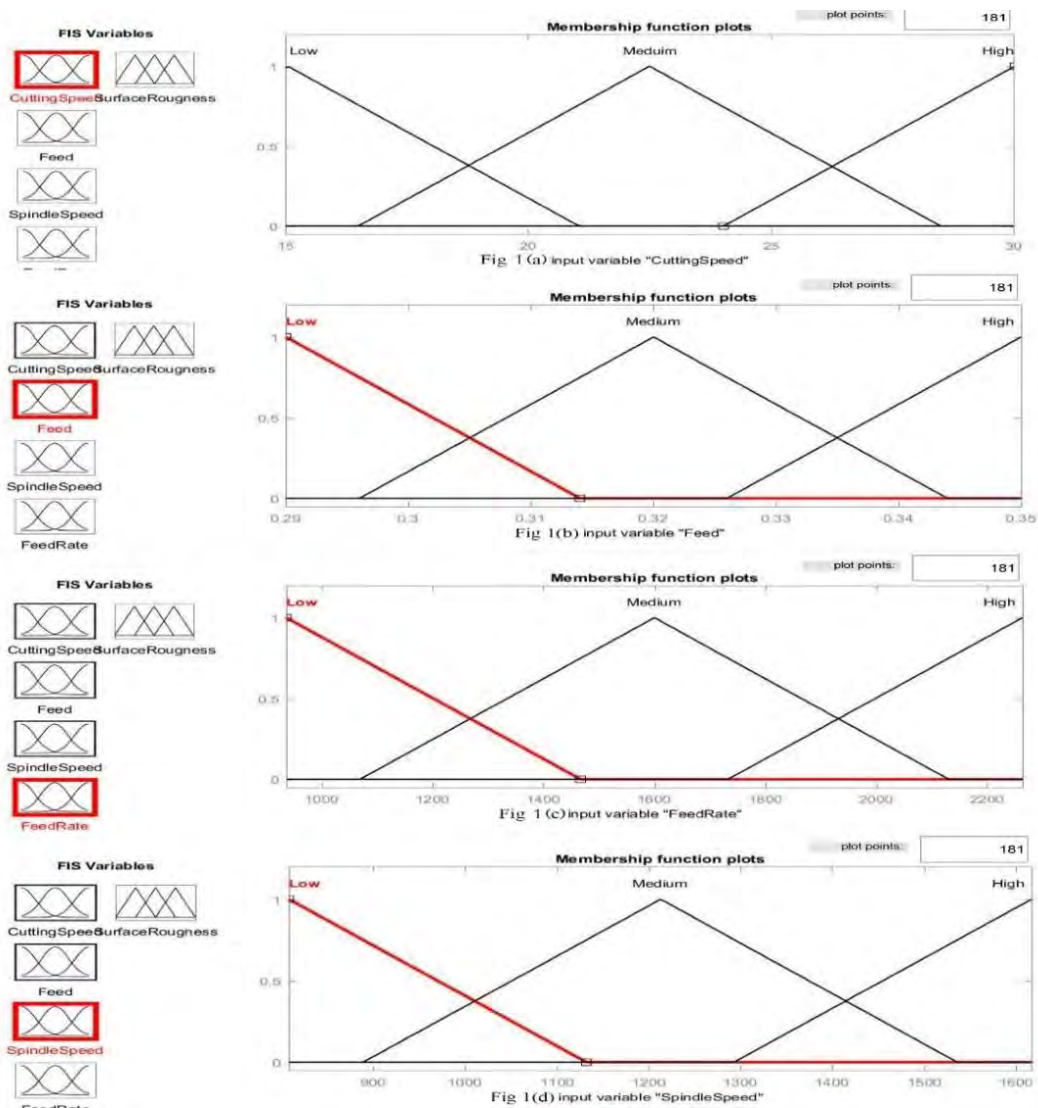


Figure 1 – Representation of Membership Function, Fig 1(a) Cutting Speed, Fig 1(b) Feed, Fig 1(c) Feed Rate, Fig 1(d) Spindle speed

Membership function represents linguistic hedge, for concentration $A^k = [\mu_A(X)]^k$ Where $k > 1$, For Dilation $A^k = [\mu_A(X)]^k$, Where $K < 1$, Membership function for Cutting Speed, Feed, Spindle Speed & Feed rate are defined as Low, Medium, High, and triangular membership function was used build the Figure (1), For representation of Surface Roughness Membership function was defined as High Grade for low surface roughness, Medium Grade and Low Grade for high surface roughness (Figure 2).

Rules: 3 rules are created to accommodate Fuzzy Operator.

1. If (Cutting Speed is Low) and (Feed is Low) and (Spindle Speed is Low) and (Feed Rate is Low) then (Surface Roughness is High Grade) means low.
2. If (Cutting Speed is Medium) and (Feed is High) and (Spindle Speed is Medium) and (Feed Rate is High) then (Surface Roughness is Low Grade) means high.
3. If (Cutting Speed is High) and (Feed is Medium) and (Spindle Speed is High) and (Feed Rate is High) then (Surface Roughness is Medium Grade).

Analytical data and rules are created to build AI system, to receive predicted value of surface roughness.

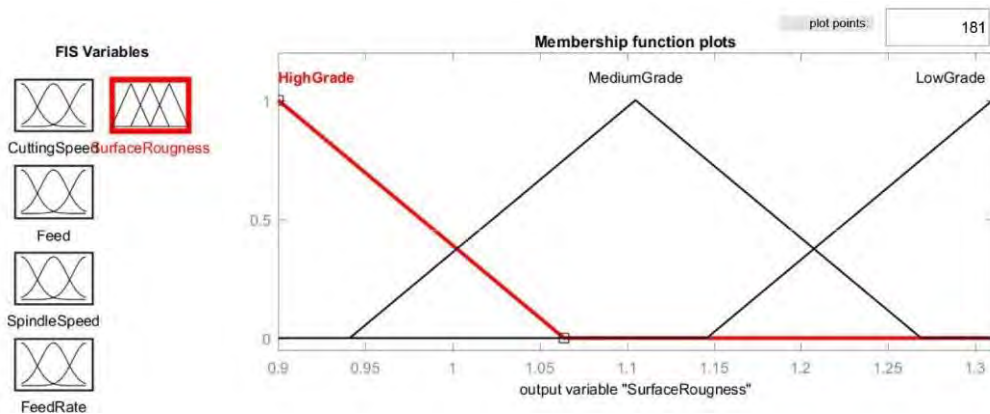


Figure 2 – Membership Function Representation of Surface Roughness.

Model: Simulink model was structured to validate the value of surface roughness, in figure, Feed, cutting speed, Spindle, Feed Rate are Input, Fuzzy logic controller is the AI which will predict the surface roughness at various speed, Display is output which shows us predicted value.

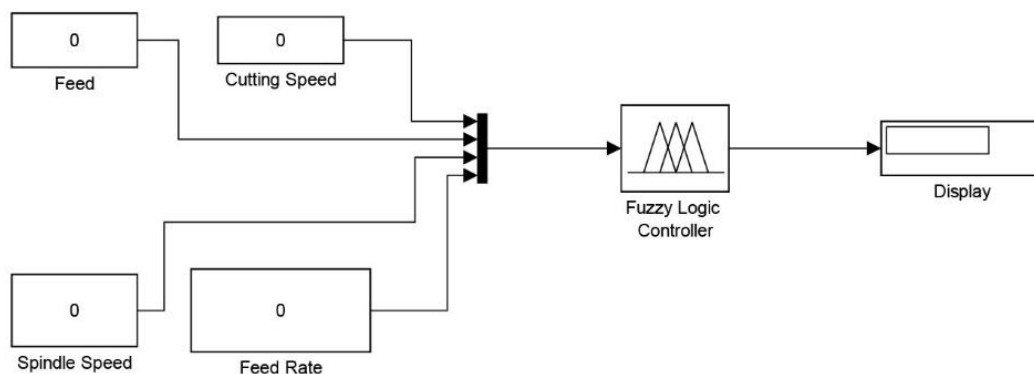


Figure 3 – Simulink model to predict surface roughness.

Comparison of result: True & analytical value was taken from the experiment [4]. In comparison of results from analytical and predicted value, AI predicted value is more precise than analytical.

Table 2 – Comparison between Predicted, True and Analytical Value.

Value	n_1	n_2	n_3
Predicted	1.13	2.61	1.17
True	1.23	2.63	1.29
Analytical	0.95	2.67	1.31

Conclusion

AI is reliable and more accurate to predict the surface roughness of manufactured products, using this method we can easily change input data like cutting speed, Feed, Feed Rate, and Spindle Speed, and receive output as Surface Roughness, it will save time and manufacturing cost.

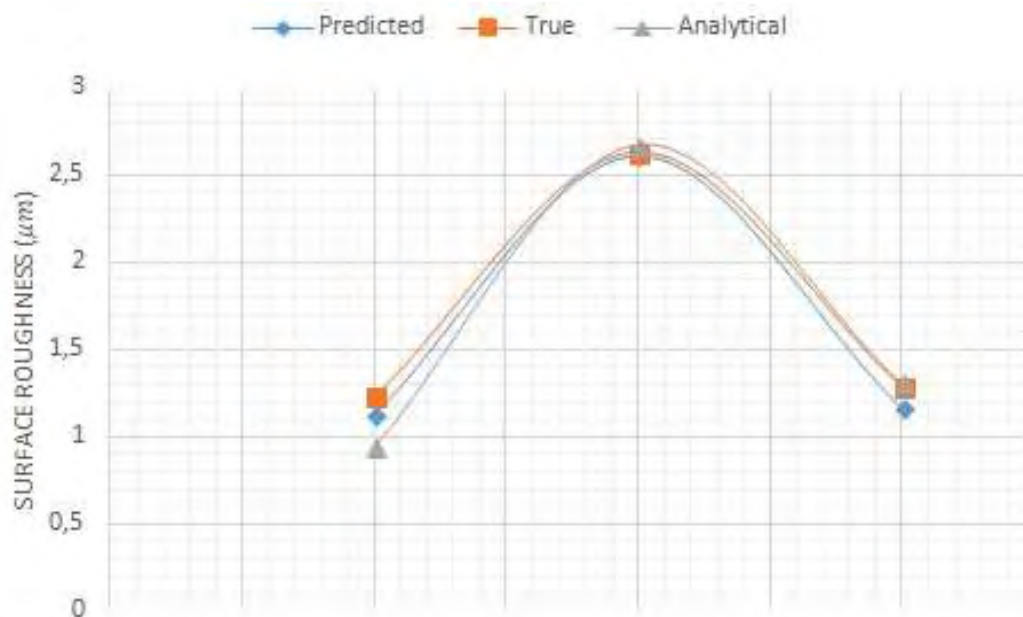


Figure 4 – Comparison of Surface Roughness Predicted, True and Analytical.

REFERENCES

1. Li, Dongqing, ed. Encyclopedia of microfluidics and nanofluidics. Springer Science & Business Media, 2008.
2. Namboodri Tanuj, Fuzzy Logic: An Application in Energy Conservation.
3. Rosario, Albérico Travassos, and Joanna Carmo Dias. "Fuzzy Logic: An Application into Marketing Strategy." (2022).
4. Abdullah, A. B., L. Y. Chia, and Z. Samad. "The effect of feed rate and cutting speed to surface roughness." Asian Journal of Scientific Research 1.1 (2008): 12-21.

Н. Танудж

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, tanuj.namboodri@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ AI

Аннотация

Шероховатость поверхности механического изделия играет важную роль в эксплуатационных характеристиках. Растущий спрос на продукцию ставит вопрос о технологии производства. В этой статье вводится нечеткая логика для определения шероховатости поверхности. Экспериментальные данные сравниваются с прогнозируемыми данными от искусственного интеллекта, и выясняется, что прогнозируемые данные надежны.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, нечеткая логика, искусственный интеллект, таблицы истинности, нечеткий оператор, механическая обработка.

Н.Н. Попок, С.А. Портянко, Е.М. Тихон,
В.С. Анисимов, Р.С. Хмельницкий, Г.И. Гвоздь
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Республика Беларусь, e.tikhon@psu.by

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ СТРУЖКИ И ПОТОКОВ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ СКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Рассмотрены математические и компьютерные модели конструкций режущих инструментов, учитывающие образование стружки и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды в процессе резания, даны диапазоны оптимальных значений параметров стружко-потокоотводящих канавок инструментов, приведены конструкции 3D-прототипов режущих инструментов из пластиковых материалов и результаты их исследований в жидкой и сыпучей средах.

Ключевые слова: 3D-прототипирование, режущий инструмент, стружкообразование, смазочно-охлаждающая технологическая среда, поток, угол наклона режущей кромки, угол схода стружки.

Введение

В связи с интенсификацией лезвийной обработки материалов и, прежде всего, увеличением скорости резания [1] требуется оптимизация параметров режущих инструментов, обеспечивающих однонаправленность схода стружки и потоков смазочно-охлаждающих жидкостей и газов, отводящих до 95% образующейся в зоне резания теплоты. Учитывая сложный и скоростной характер протекающих при этом процессов и трудности, в связи с этим, экспериментальных исследований, наиболее приемлемым является применение математического моделирования и 3D-прототипирования конструкций режущих инструментов с учетом образования стружки и потоков жидкости и газа.

Анализ проведенных в этом направлении исследований показывает, что получены математические зависимости для определения угла схода стружки и наклона режущих кромок с учетом деформационных и динамических характеристик процесса резания [2, 3]. Также установлены зависимости и предложены модели обтекания жидкостными и газовыми потоками неподвижных и подвижных (вращающихся) тел [4]. Однако полученные зависимости, во-первых, не учитывают скоростной характер обработки – частота вращения режущих инструментов до 40 тысяч мин⁻¹, во-вторых, не позволяют установить диапазоны изменения параметров наклона режущих кромок инструмента, которые бы обеспечивали однонаправленность схода стружки и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), в-третьих, в этих зависимостях не учитывается существующее противоречие, связанное с сопротивлением обрабатываемого материала режущему инструменту и необходимостью одновременного обеспечения

обтекания конструктивных элементов потоками жидкостей и газов, что позволило бы, в конечном итоге, наиболее эффективно отводить теплоту из зоны резания.

В данных исследованиях предложены математические зависимости, учитывающие одновременно параметры направления схода стружки и обтекания режущих инструментов потоками жидкостей и газов, компьютерные модели, а также модели (прототипы) режущих инструментов, полученные 3D-печатью из пластиковых материалов, позволяющие экспериментально проверить теоретически установленные диапазоны изменения угла наклона стужко-потокоотводящих канавок режущих инструментов.

Основная часть

Рассмотрим схемы схода стружки и потоков смазочно-охлаждающих жидкостей и газов при наиболее сложных видах обработки материалов-фрезерованием и растачиванием.

На рисунке 1 показаны торцовая фреза (1, а) и расточная головка (1, б), осуществляющие главное движение резания (вращение) D_r и обрабатывающие материал заготовки в движении подачи D_s . Режущая пластина, установленная в корпусах режущих инструментов, имеет угол наклона режущей кромки главной λ и вспомогательной λ_1 . При обработке материала, образующаяся стружка сходит по передней поверхности режущей пластины и кромках, отклоняясь на угол схода стружки η_c . Поток СОТС в движении D_{Π} направляется передней поверхностью и режущими кромками по вектору скорости \vec{W} .

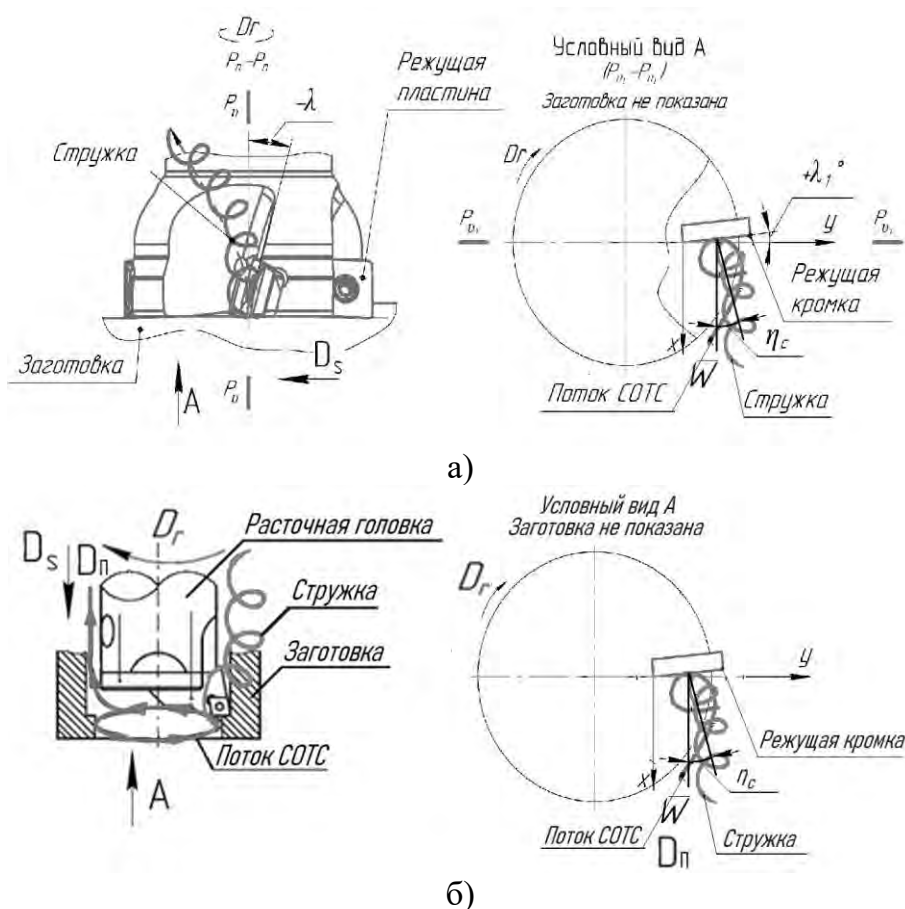


Рисунок 1 – Схемы схода стружки и потоков смазочно-охлаждающих жидкостей и газов при фрезеровании (а) и растачивании (б)

Для определения параметров формы и расположения канавок в режущих инструментах, отводящих стружку и СОТС, представленных на рисунке 1, используются известные из теории резания формулы для определения угла схода стружки: $\operatorname{tg}\eta_{ci} = \operatorname{tg}\lambda_i \cdot \cos\gamma_i$ [2], и из теории аэро-гидродинамики - формулы, связывающие изменение параметров препятствия (∂y и S) с характеристиками (∂W и F) и свойствами (μ) обтекающей его жидкости: $\partial y = \mu \cdot \partial W \cdot S / F$ [4].

Сход стружки при температуре в зоне скоростного резания представляется как процесс, протекающий в вязко-текучей среде, образованной СОТС и приконтактными слоями обрабатываемого материала и инструмента. В этих условиях процессы сдвига в твердых телах и распределение напряжений в потоке жидкости аналогичны [5].

После математических преобразований формулы для расчета η_{ci} и ∂y приведены к виду [6]:

$$\eta_{ci} = \arctg \left[\cos\gamma_i \cdot \operatorname{tg}(\nu \pm \arccos \left[\frac{N \cdot \cos\nu \cdot \cos\theta}{P_z \cdot \cos(\theta + \gamma_i)} \right]) \right], \quad (1)$$

$$\partial y = \frac{\mu \cdot \partial \vartheta_c \cdot S \cdot \cos\nu \cdot \cos\theta}{P_z \cdot \cos(\lambda_i - \nu) \cdot \cos(\theta + \gamma_i)}, \quad (2)$$

в которых учитываются наряду с геометрическими параметрами лезвия (угол наклона режущей кромки λ_i и передний угол γ_i); динамические (главная составляющая P_z и нормальная N силы резания) и деформационные (скорость схода стружки $\vartheta_c = \vartheta / k_l$, где ϑ - скорость резания, $\theta = \arctg(P_x / N_{yz})$ и $\nu = \arctg(P_y / P_z)$ - вспомогательные углы, k_l - коэффициент укорочения стружки) характеристики и параметры процесса резания, а также динамическая вязкость СОТС μ и площадь поверхности препятствия (пластины режущей) S .

Алгоритм совместного решения этих уравнений включает определение угла схода стружки η_{ci} через угол наклона режущей кромки λ и передний угол γ лезвия инструмента, скорости резания ϑ и скорости схода стружки ϑ_c , действующей силы резания P_z , а также изменения координаты ∂y нормальной к линейной скорости среды, связанного с углом наклона λ_i , вязкостью технологической среды μ , скоростью потока W , площадью препятствия S и силой сопротивления среды F .

С точки зрения теории резания с увеличением абсолютных значений угла наклона режущей кромки λ_i нормальная сила N уменьшается, причем ее значения тем меньше, чем больше значения переднего угла γ_i . Уменьшение N способствует увеличению η_{ci} , угол η_{ci} также возрастает при увеличении λ_i . При увеличении соотношений P_x/P_z и P_y/P_z нормальная сила несколько возрастает, что необходимо учитывать при выборе значений λ_i и η_{ci} (рисунок 2, а,б).

С увеличением скорости схода стружки ϑ_c (потока W) и площади поверхности пластины режущей (препятствия) S , а также уменьшения N (силы сопротивления F) увеличение угла λ_i приводит к снижению значений координаты ∂y и его влияние тем больше, чем больше скорость схода стружки ϑ_c и скорость потока W . При этом установлен диапазон изменений значений $\lambda_i = 35-55^\circ$, при котором координата ∂y принимает минимальные значения (рисунок 2, в,г).

Для проверки рекомендаций и уточнения размерных параметров стружко-потокоотводящих канавок режущих инструментов, полученных на основе математических зависимостей, было рассмотрено компьютерное моделирование работы сборных торцовых фрез при их обтекании потоками воздуха и жидкости с использованием программных продуктов SolidWorksFlowSimulation и Cinema 4D.

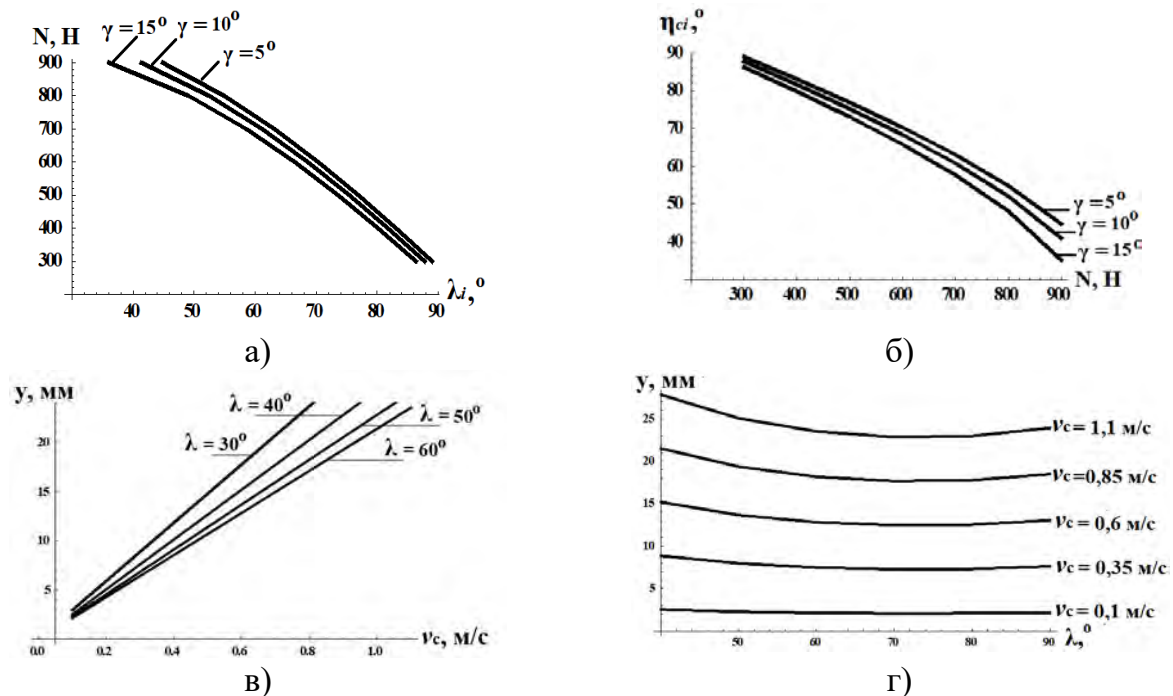


Рисунок 2 - Зависимости параметров режущих инструментов от характеристик процесса резания и СОТС: а, б - углов соответственно наклона режущей кромки λ_i и схода стружки η_{ci} от силы резания N при различных значениях переднего угла γ_i ; в, г - координаты препятствия (режущей кромки) y от соответственно скорости схода стружки (потока) v_c при различных λ_i и угла наклона режущей кромки λ_i при различных v_c

В SolidWorks была создана трехмерная модель режущего инструмента, выбрана метрическая система, вид моделирования (вращение), скорость перемещения потоков жидкости и воздуха и другие граничные условия. Фрагменты результатов компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез представлены в таблице 1.

Анализ результатов исследований показывает, что увеличение частоты вращения сборной торцовой фрезы приводит к увеличению концентрации воздушных потоков. Характер распределения потоков воздуха для сборных торцовых фрез различный. Для сборной торцовой фрезы № 1 характерно распределение потоков воздуха по форме поверхности модуля корпусного фрезы, т. е. торообразное. Причем при частоте 1000 мин^{-1} и 10000 мин^{-1} максимальная концентрация потоков воздуха наблюдается у торца и на периферии сборной торцовой фрезы, что способствует более эффективному стружко-потокоотводу от модуля корпусного сборной торцовой фрезы. Для сборной торцовой фрезы № 2 характерно «разлетание» потоков воздуха по параболическим кривым, особенно при малых значениях частоты вращения (до 100 мин^{-1}), что снижает эффективность охлаждения модулей корпусных. Таким образом, рекомендованные по результатам математических расчетов параметры

стружко-потокоотводящих канавок с большими значениями угла их наклона подтверждаются компьютерным моделированием.

Для компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез в жидкой среде был использован плагин «RealFlow» программы Cinema 4D. Метод позволяет моделировать взаимодействие частиц между собой, которые в зависимости от расстояния могут «слипаться» или «отталкиваться». Каждая частиц имеет свою массу и так называемую «длину сглаживания», которая определяет расстояние, на котором частицы или притягиваются, или отталкиваются.

В таблице 2 представлены фрагменты результатов компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез № 1 и 2 в среде СОТС.

Таблица 1 – Фрагменты компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез в потоках воздуха

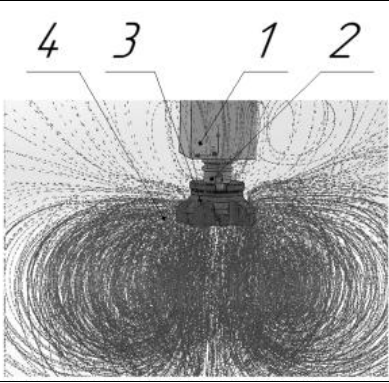
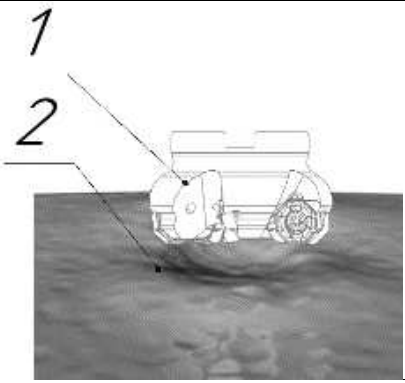
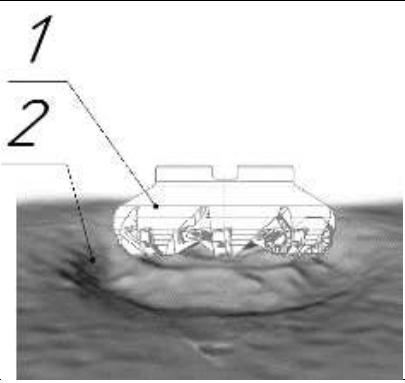
Обозначение сборной торцовой фрезы	
PP NSA065-12-20 (№1)	FF FWX D066-05-22-08 (№2)
	
<p>1 - шпиндель вертикально-обрабатывающего центра; 2 - хвостовик; 3 - сборная торцовая фреза; 4 - траектория движения частиц воздуха</p>	

Таблица 2 – Фрагменты компьютерного моделирования работы сборных торцовых фрез в потоках жидкости

Обозначение сборной торцовой фрезы	
PPNSA065-12-20 (№ 1)	FF FWX D066-05-22-08 (№ 2)
	
<p>1 - сборная торцовая фреза; 2 - область взаимодействия (образования) «воронки»</p>	

Для сборных торцовых фрез в положении «над средой» характерно образование «воронки» со стороны торцовой поверхности, причем для сборной торцовой фрезы № 1 – она наибольшая по диаметру, что свидетельствуют о более эффективном охлаждении торцовой поверхности этой сборной торцовой фрезы по сравнению со сборной

торцевой фрезой № 2. Для сборной торцевой фрезы № 1 в положении «в среде» диаметр воронки больше, а степень разбрызгивания меньше, чем у сборной торцевой фрезы № 2, что свидетельствует о более плавной работе и более равномерному захвату канавками потоков жидкости у сборной торцевой фрезы № 1.

С учетом рекомендаций моделирования спроектированы и изготовлены макеты сборных режущих инструментов с различной формой корпусов и расположением стружко-потокоотводящих канавок (рисунок 3).

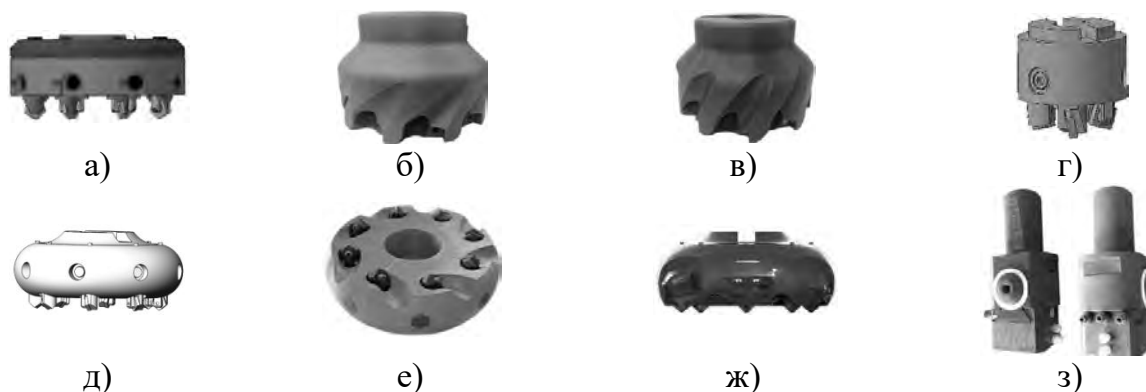


Рисунок 3 - Макеты сборных торцевых фрез в форме диска (а), диска и конуса (б и в), цилиндра (г), тора (д-ж) и расточной головки в форме цилиндра (з)

Экспериментальные исследования работы сборных торцевых фрез и расточных головок в жидкой и сыпучей средах в сопоставлении с зарубежными аналогами показали, что также, как и при компьютерном моделировании с торцевой стороны фрезы образуется воронка, в которую направлены потоки среды, потоки захватываются стружко-потокоотводящими канавками и направляются в разработанных сборных торцевых фрезах на периферию, а во фрезах фирмы «Seiko» (Япония) – к оси вращения фрезы. Периферийный отвод потоков свидетельствует об оптимальных значениях параметров геометрической формы и расположения стружко-потокоотводящих канавок и характеризует более эффективное охлаждение разработанных сборных режущих инструментов. На рисунке 4 для примера представлены фрагменты исследования работы макетов в сыпучей и жидкой средах.

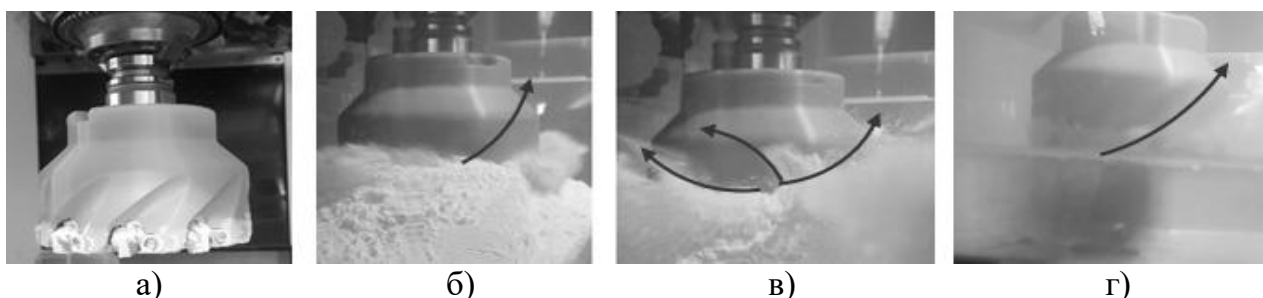


Рисунок 4 - Фрагменты исследования работы сборной торцевой фрезы в средах: а - макет сборной торцевой фрезы из пластикового материала; б, в - распределение потоков в сыпучей среде; г - распределение потоков в жидкой среде

Заключение

Получены математические и компьютерные модели режущих инструментов, учитывающие условия образование стружки и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды, с использованием которых установлены оптимальные

значения угла наклона режущих кромок в пределах 35-55°, обеспечивающие однонаправленность схода стружки и потоков СОТС и эффективный отвод теплоты из зоны резания.

С использованием результатов моделирования на 3D-принтерах отпечатаны экспериментальные образцы торцовых фрез и расточных головок из пластиковых материалов, проведены их исследования в жидкой и сыпучей средах, подтверждены диапазоны оптимальных значений параметров и выработаны рекомендации по проектированию высокоточных металлических режущих инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоскоростная обработка [электронный ресурс]. Режим доступа: www.insoftmach.ru/HSC.html. – Дата доступа: 24.10.2017.

2. Бобров, В. Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В. Ф. Бобров. - Москва : Машгиз, 1962. - 152 с.

3. Попок, Н. Н. Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, В. А. Анисимов // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. - 2020. - №10. - С. 28-34.

4. Белоцерковский, С. М. Трехмерное отрывное обтекание тел произвольной формы / С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ, В. Н. Котовский, Р. М. Федоров. - М. : Центр. аэродинам. ин-т им. Н. Е. Жуковского, 2000. - 260 с.

5. Некрасов, Р. Ю. Теплофизика и гидравлика в технологических системах нефтегазового оборудования: учебник / Р. Ю. Некрасов, Л. К. Габышева, У. С. Путилова и др. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. - 172 с.

6. Попок, Н. Н. Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, Е. М. Тихон, В. С. Анисимов // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. - 2021. - № 1 (9). - С. 27-36

N.N. Popok, S.A. Portsyanko, E.M. Tikhon, V.S. Anisimov, R.S. Khmialnitski, H.I. Hvozdz
Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus,
e.tikhon@psu.by

MATHEMATICAL MODELING AND 3D PROTOTYPING OF CUTTING TOOL STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT CHIP FORMATION AND LUBRICANT-COOLING TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT FLOW DURING HIGH-SPEED PROCESSING OF MATERIALS

Abstract

Mathematical and computer models of cutting tool designs are considered, taking into account the chips and lubricating-cooling technological environment flows in the cutting process. the ranges of optimal values for the parameters of the tools chip-flux grooves are given. 3D-prototypes of cutting tools made of plastic materials, their research results in liquid and loose media are given.

Keywords: 3D prototyping, cutting tool, chip formation, lubricating-cooling technological environment, flows, cutting edge angle, chip flow angle.

М.А. Рабыко, А.Н. Юманова, В.М. Шеменков
Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь, belay-marina@yandex.by

ВЛИЯНИЕ ПРИКАТОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Аннотация

В работе рассмотрены высокочастотные колебания тока в тлеющем разряде с прикатодным магнитным полем и связанные с ними процессы упрочнения вещества катода. В результате проделанной работы, определено предпочтительное значение индукции магнитного поля, находящееся в пределах 30 – 60 мТл.

Ключевые слова: тлеющий разряд, инструментальная сталь, упрочнение, скин-эффект.

Введение

В условиях сложной экономической ситуации, которая в последние годы сложилась мире, одной из наиболее важных и ключевых задач, стоящих на многих предприятиях, особенно машиностроительного профиля, является конкурентоспособность продукции, которая напрямую зависит от эффективности всего производства.

Повышение эксплуатационных характеристик технологической оснастки из штамповых сталей является важной задачей, решение которой позволяет обеспечивать рост производительности труда, экономии дорогостоящих и дефицитных инструментальных материалов, энергии и трудовых ресурсов.

Методы

Для достижения поставленной цели использовали широкий спектр современного оборудования. Измерение магнитной индукции проводились по стандартной методике универсальным миллитесламетром МТУ-1. Для исследования высокочастотных колебаний плазмы тлеющего разряда в процессе обработки образцов использовался осциллограф цифровой АКИП-4122/2.

Результаты и обсуждение

Плазма – состояние вещества, в котором коллективные процессы играют весьма важную роль. Среди большего числа волновых и колебательных мод плазмы рассмотрим подробнее высокочастотные колебания тока в тлеющем разряде и связанные с ними процессы упрочнения вещества катода.

В работах [1 - 4] с помощью осциллографирования плазмы тлеющего разряда было установлено, что зондовый сигнал повторяет форму тока на выходе выпрямителя. Для двухполупериодной схемы эта форма синусоидальная, но на начальном участке каждой синусоиды наблюдаются высокочастотные (≈ 100 кГц) колебания (рисунок 1). Зависимость амплитуды этих колебаний от напряжения носит колокообразный характер с максимумом, положение которого определяется величиной разрядного тока.

Установленные зависимости ВЧ-составляющей сигнала от параметров разряда позволяют связать появление ВЧ-импульсов с разрывом тока тлеющего разряда и его

переходом в режим ВЧ-колебаний вследствие нарушения критерия стационарности Бома [5]. ВЧ-колебания катодного падения потенциала плазмы, горячей в нестационарном режиме, способны вызывать импульсное течение ионного тока. В таком случае поверхность катода (облучаемого изделия) подвергается не стационарной, а импульсной (“пакетной”) бомбардировке потоками ускоренных ионов. Частота их соударений с поверхностью определяется условиями формирования ВЧ-колебаний плазмы, а также характеристиками ионов. Природу этих колебаний в [6] объясняют нестабильностью при переходе от таунсендовского к тлеющему разряду.



Рисунок 1 – Осциллограммы частоты горения тлеющего разряда

На основании полученных данных была выведена гипотеза, что влияя магнитным полем на частоту горения тлеющего разряда и уменьшая ее можно увеличить глубину упрочненного слоя. На основании выдвинутой и подтвержденной в статьях [2 - 4] гипотезы следует, что использование тлеющего разряда с прикатодным магнитным полем позволяет сформировать большую глубину упрочненного слоя (рисунок 2).

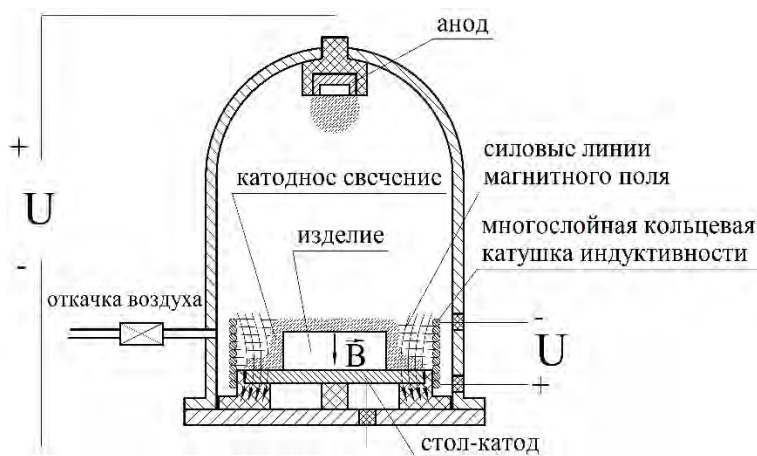


Рисунок 2 – Схема установки для реализации процесс

В качестве источника, создающего прикатодное магнитное поле, в способе упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого материала может выступать кольцевая катушка индуктивности, которая позволяет сформировать прикатодное магнитное поле с необходимой магнитной индукцией (рисунок 3) [7, 8].

Ширина области катодного падения колеблется в пределах до 0,110 м, на основании этого и из конструктивных характеристик вакуумной камеры были выбраны некоторые параметры кольцевой катушки индуктивности, такие как высота катушки $h=0,07$ м и внутренний диаметр $d_{вн} = 0,25$ м. Так же были определены следующие условия:

Катушка не должна касаться стенок вакуумной камеры.

1 Катушка должна иметь возможность формирования разной величины индукции магнитного поля.

2 Катушка должна работать без принудительного охлаждения, в противном случае значительно увеличиваются расходы на процесс упрочнения. А также существенно увеличиваются габаритные размеры катушки индуктивности из-за создания эффективных каналов охлаждения.

3 Необходимо обеспечить баланс между затратами на производство, эксплуатацию и обслуживание катушки и экономической эффективностью процесса упрочнения.

На основании выведенных условий был выполнен расчет кольцевой катушки индуктивности (рисунок 3).

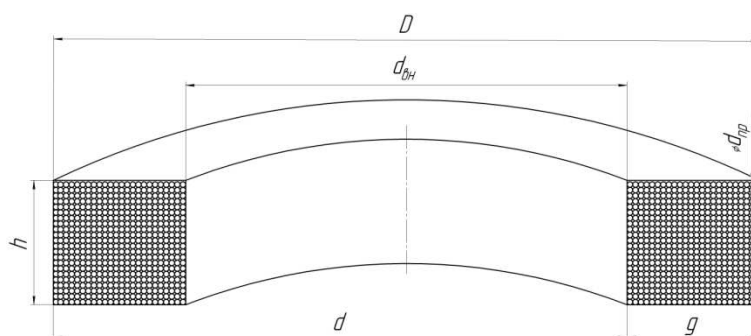


Рисунок 3 – Кольцевая катушка индуктивности

Рассчитав основные параметры и приняв в учет геометрические параметры вакуумной камеры для проведения исследования и упрочнения, была спроектирована классическая кольцевая катушка индуктивности с многослойной обмоткой.

Для контроля температуры внутри кольцевой катушки индуктивности был вмонтирован термодатчик, используя который были построены зависимости разогрева катушки от времени ее работы (рисунок 4).

На основании представленных результатов установлено, что индукция магнитного поля оказывает существенное влияние на частоту горения тлеющего разряда до значений 55-60 мТл. Дальнейший рост индукции магнитного поля не приводит к значительным изменениям частоты горения тлеющего разряда (рисунок 5).

Выводы

Ионный поток на катод при развитии колебаний приобретает импульсный характер, при этом растет максимальная кинетическая энергия ионов, от которой зависит глубина упрочнения поверхности. Проанализировав полученные данные

видно, что дальнейшее повышение индукции магнитного поля не приводит к существенному изменению частоты горения тлеющего разряда, а следовательно, предпочтительно применять следующие параметры упрочнения: частота горения разряда 85 – 90 кГц, область давлений 2 - 3 Па при индукции магнитного поля 30 - 60 мТл, с напряжением $U = 100$ В и силой тока $I = 10$ А, при котором возникающий нагрев кольцевой катушки индуктивности является приемлемым и не приводит к ее разрушению, она может работать более длительное время, необходимое на упрочнение.

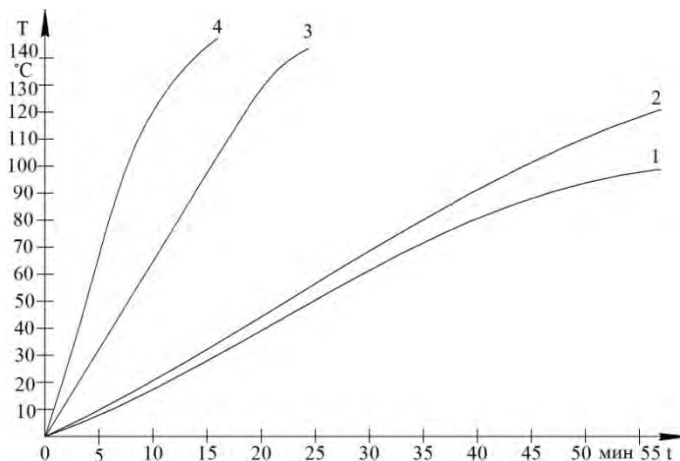
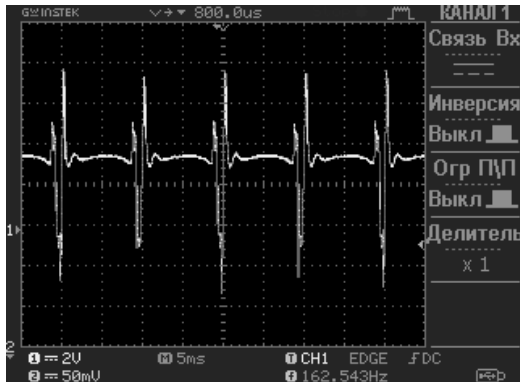
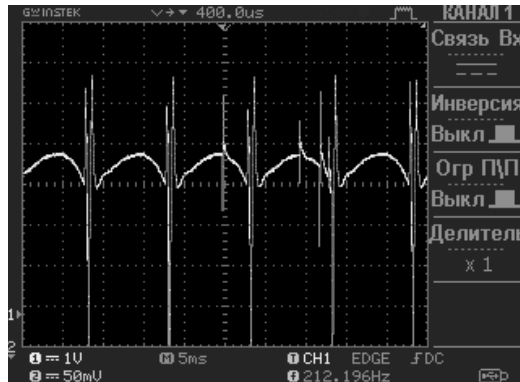


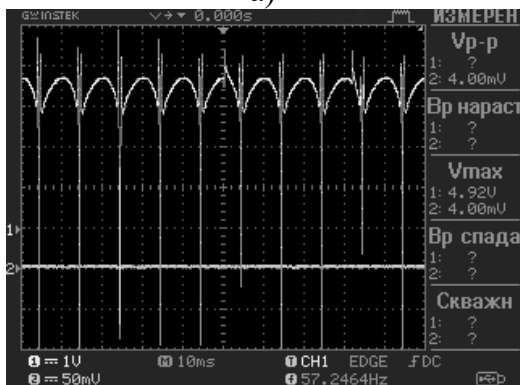
Рисунок 4 – График зависимости разогрева кольцевой катушки индуктивности от времени ее работы: 1 – $B=30-35$ мТл; 2 – $B=55-60$ мТл; 3 – $B=70-75$ мТл; 4 – $B=80-85$ мТл



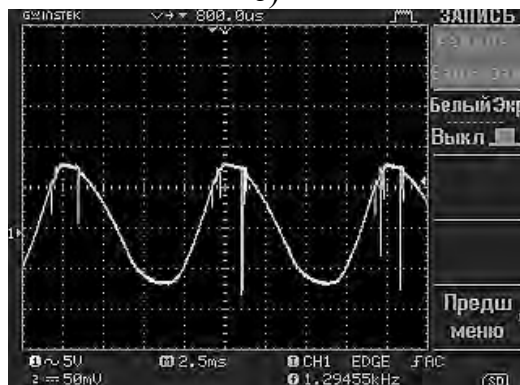
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Осциллограммы частоты горения тлеющего разряда: а) индукция магнитного поля 30-35 мТл, б) индукция магнитного поля 55-60 мТл,

в) индукция магнитного поля 70-75 мТл, г) индукция магнитного поля 80-85 мТл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Природа и механизм модификации материалов на большую глубину при обработке низкоэнергетической плазмой тлеющего разряда / И. М. Неклюдов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2005 – № 4. – С.17-27.
2. Шеменков, В. М. Формирование модифицированных поверхностных слоев у инструментальных сталей тлеющим разрядом/ В. М. Шеменков, И. И. Маковецкий // Научно методический журнал: Вестник Белорусско-Российского университета № 3(68), Могилев, 2020 г – С. 109 – 117.
3. Шеменков, В. М. Структурно-фазовое преобразование материалов тлеющим разрядом / В. М. Шеменков, Ф. М. Трухачев, И. И. Маковецкий // Вестник Объединенного института высоких температур. – 2019. – Т. 2. - С. 12 – 18.
4. Елисеева, А. Н. Влияние частоты тока на глубину его течения в металлических изделиях при импульсном ионно-плазменном воздействии / А. Н. Елисеева, В. М. Шеменков // Материалы Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». Могилев, 2021. С. 49-50
5. Bohm criterion failure and periodic oscillations of the plasma sheath in nonstationary plasmas / Ya. Z. Slutsker [et al] // Strong Microwaves in Plasmas /. Ed. A.G. Litvak. – Nizhny Novgorod: Inst. Appl. Phys. RAS, 2003. – Vol. 2. – P. 537-547.
6. Сафронов, Е. А. Неравновесность плазмы тлеющих разрядов в атомарных и молекулярных газах атмосферного давления: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 /Сафронов Евгений Александрович. –Минск, 2011. – 185 с.
7. Рабыко, М. А. Структурно-фазовое модифицирование штамповых сталей обработкой тлеющим разрядом в магнитном поле / М. А. Рабыко, В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева // Научно методический журнал: Вестник Белорусско-Российского университета № 2, Могилев, 2022 г – С. 23 – 31.
8. Патент № 19126 Республика Беларусь, МПК С 23С 14/38. Способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого материала / В.М. Шеменков, М.А. Белая (BY) - № 19126; заявл. 05.04.2013; опубл. 30.12.2013. -3 с.

М.А. Rabyka, H.N. Yumanova, Y.M. Shemenkov
Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, belay-marina@yandex.by

INFLUENCE OF THE NEAR-CATHODE MAGNETIC FIELD ON THE COMBUSTION FREQUENCY OF THE GLOW DISCHARGE

Abstract

The paper considers high-frequency current oscillations in a glow discharge with a near-cathode magnetic field and related processes of hardening of the cathode material. As a result of the work done, the preferred value of the magnetic field induction was determined, which is in the range of 30 - 60 mTl.

Keywords: glow discharge, tool steel, hardening, skin effect.

Д.Н. Шабалин, И.И. Козарь, Т.А. Ларионова, И.С. Михайлова, А.В. Рябова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, E-mail: shadmit@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТОКАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ НАИВЫСШЕЙ ЗАГРУЗКЕ СТАНКОВ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

Аннотация

Цифровизация вносит свои коррективы планирования производства. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) значительно увеличивают производительность процессов и снижают затраты времени на смену режущего инструмента. Возникает необходимость переосмыслить подход к производственным процессам и максимально задействовать оборудование с повышенной производительностью. В данной статье будет представлена управляющая программа (УП) для одного установа токарной операции для токарного станка с ЧПУ.

Ключевые слова: программирование станков с ЧПУ, технология машиностроения, оборудование с повышенной производительностью.

Введение

Прогрессивные предприятия в области машиностроения оснащены станками с числовым программным управлением (ЧПУ). Возникает необходимость максимального задействования производственных мощностей этих станков.

В отличие от аналоговых станков, станки с числовым программным управлением позволяют автоматически менять инструмент. Это является основным фактором, который сокращает время производства. Автоматическая смена инструмента исключает неточность установки резцов, вызванную человеческим фактором [1].

Еще одним преимуществом в пользу уменьшения времени производства является многоступенчатая обработка и смена режимов резания. Универсальные станки с аналоговым управлением не позволяют безостановочно перемещать резец по координатам, образуя ступени на обрабатываемой поверхности. В станках с числовым программным управлением резцу задается траектория движения и безостановочная смена режимов резания, что позволяет за один проход описывать контур детали [2].

При грамотном проектировании токарных операций на станках с ЧПУ можно значительно увеличить производительность при производстве, уменьшить время на переналадку станков и выставление инструмента. Создание автоматизированного конвейера из станков ЧПУ позволит сократить время на перенос заготовок и уменьшить простой станков [3 - 10].

Цель: продемонстрировать процесс многоступенчатой обработки детали с помощью токарного станка с ЧПУ.

Методы

Задача: подрезать торец (поверхность 1), проточить начерно и начисто контур (поверхности 2, 3, 5, 6), прорезать канавку под выход шлифовального круга [11]

(поверхность 4) и расточить отверстие [12] (поверхность 7) согласно чертежу, рисунок 1.

Решение поставленной задачи предлагается получить с помощью токарного станка с ЧПУ. Для этого будет написана УП на стойке FANUC-0iT [13].

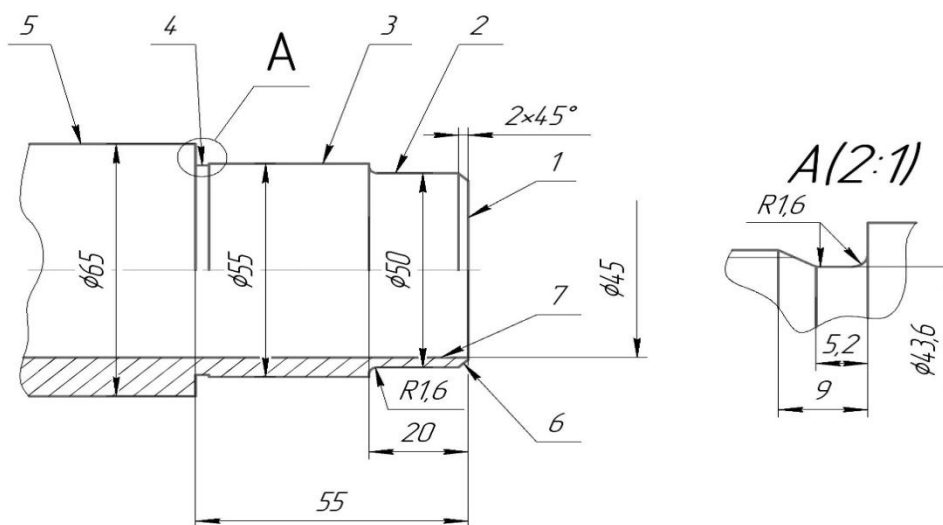


Рисунок 1 – Эскиз обрабатываемой поверхности

Результаты

Поставленная задача будет решаться путем написания кода программы. В нем будут заданы необходимые режимы резания, смена режущего инструмента и траектория его перемещения.

Процесс поэтапной обработки разделен на несколько технологических переходов (таблица 1).

Таблица 1 – Технологические переходы

Номер технологического перехода	Наименование технологического перехода
1	Подрезка торца
2	Растачивание отверстия
3	Черновое точение
4	Чистовое точение
5	Прорезка канавки

Каждый технологический переход требует своего режима резания. Подача на оборот задается из рекомендуемого диапазона значений и зависит от обрабатываемого материала, диаметра заготовки и глубины резания, а скорость резания в большей мере зависит от материала режущего инструмента и подачи [14].

Для программирования станка с ЧПУ необходимо задавать частоту вращения шпинделя и минутную подачу.

Расчет частоты вращения шпинделя с заготовкой производится по формуле (1):

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d}, \quad (1)$$

где V — скорость вращения шпинделя, м/мин; d — диаметр обрабатываемого участка вала, мм.

Расчет минутной подачи производится по формуле (2):

$$F = nS, \quad (2)$$

где n — частота вращения шпинделя, об/мин; S — подача на оборот, мм/об.

Скорость резания для чернового точения и подрезки торца принимается $V = 50$ м/мин, а подача — $S = 0,2$ мм/об. Тогда частота вращения и минутная подача рассчитываются по формулам (3) и (4):

$$n_{\text{черн}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 50}{\pi \cdot 65} = 244,4 \approx 245 \text{ об/мин} \quad (3)$$

$$F_{\text{черн}} = nS = 245 \cdot 0,2 = 49 \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \quad (4)$$

Скорость резания для чистового точения принимается $V = 100$ м/мин, а подача — $S = 0,075$ мм/об, тогда частота вращения и минутная подача находятся по формулам (5) и (6):

$$n_{\text{чист}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 100}{\pi \cdot 65} = 489,7 \approx 490 \text{ об/мин} \quad (5)$$

$$F_{\text{чист}} = nS = 490 \cdot 0,075 = 36,8 \approx 37 \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \quad (6)$$

Скорость нарезания канавки принимается $V = 40$ м/мин, подача — $S = 0,075$ мм/об, частота вращения и минутная подача находятся по формулам (7) и (8):

$$n_{\text{канав}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 40}{\pi \cdot 55} = 231,5 \approx 232 \text{ об/мин} \quad (7)$$

$$F_{\text{канав}} = nS = 232 \cdot 0,075 = 17,4 \approx 17 \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \quad (8)$$

После расчета режимов резания задаем режущий инструмент и код для программы. Код резца в программе состоит из буквы Т с двумя позициями, первая позиция — номер инструмента, вторая — номер корректора.

Задаем инструменты в соответствующем порядке технологических переходов.

1 T0101 — токарный черновой резец с радиусом при вершине $r=0,8$ мм, глубина резания 2 мм;

2 T0202 — расточной резец с радиусом при вершине $r=0,2$ мм, глубина резания 1 мм;

3 T0303 — токарный чистовой резец с радиусом при вершине $r=0,2$ мм, глубина резания 0,4 мм;

4 T0404 — канавочный резец шириной $b=3$ мм, глубина резания 0,1 мм;

Код программы с комментариями соответствующих переходов представлен ниже.

Программа состоит из кадров с нумерацией, начинающейся с N010.

O1234 — название программы

N010G21G98G18G40G80 – кадр с подготовительными функциями, включающий метрический ввод данных, скорость подачи в миллиметрах в минуту, выбор рабочей плоскости XZ, отмена компенсации радиуса режущей кромки инструмента, отмена цикла обработки соответственно;

N020G28U0W0 – кадр отвода резцедержателя в референтную точку (точка крайнего положения резцедержателя);

N030T0101 – вызов черного резца;

N040S245F49M3M8 – кадр, задающий режимы резания: частота вращения и подача, а также вращение шпинделя по часовой стрелке и включение охлаждения;

N050G0X72Z3 – перемещение в запрограммированную точку с максимальной скоростью;

N060G94Z0X-10 – цикл подрезки торца;

N070G28U0W0 – кадр отвода резцедержателя в референтную точку (точка крайнего положения резцедержателя);

N080T0303 – вызов расточного резца;

N090S245M3M8 – кадр, задающий режимы резания: частота вращения, а также вращение шпинделя по часовой стрелке и включение охлаждения;

N100G0X30Z3 – перемещение в запрограммированную точку с максимальной скоростью;

N110G85X34Z-90R2 – параметры растачивания отверстия (1-ый проход) с заданием глубины резания и отскоком на рабочем ходу соответственно;

N120X38 – 2-ой проход растачивания отверстия;

N130X42 – 3-ий проход растачивания отверстия;

N140X45 – 4-ый проход растачивания отверстия;

N150T0101 – вызов черного резца;

N160G0Z1 – перемещение в запрограммированную точку с максимальной скоростью;

N170G71U2R1 – параметры черного точения с заданием глубины резания и отскоком на рабочем ходу соответственно;

N180G71P180Q250W0.4U0.8 – цикл продольного (чернового) контурного точения с номерами кадров начала и конца описания контура, а также вторичное перемещение по координате X и вторичное перемещение по координате Z соответственно;

N190G0X46Z0 – перемещение резца в запрограммированную точку с максимальной скоростью;

N200G1Z-2X50 – перемещение резца на рабочем ходу под углом 45°– точение фаски;

N210G1Z-20 – линейная интерполяция (точение вдоль координаты Z);

N220G1X55 – линейная интерполяция (точение вдоль координаты X);

N230G1Z-55 – линейная интерполяция (точение вдоль координаты Z);

N240G1X65 – линейная интерполяция (точение вдоль координаты X);

N250G1Z-115 – линейная интерполяция (точение вдоль координаты Z);

N260G1X72Z2 – линейная интерполяция (точение вдоль координаты X) и отскок на рабочем ходу;

N270G28U0W0 – кадр отвода резцедержателя в референтную точку (точка крайнего положения резцедержателя);

N280T0202 – вызов чистового резца;

N290S490F37 – кадр, задающий режимы резания – частота вращения шпинделя и подача;

N300G0X72Z1 – перемещение резца в запрограммированную точку с максимальной скоростью;

N310G70P180Q250 – цикл чистовой контурной обработки с номерами кадров начала и конца описания контура;
N320G28U0W0 – кадр отвода резцедержателя в референтную точку (точка крайнего положения резцедержателя);
N330T0404 – вызов канавочного резца;
N340S232F17M3 – кадр, задающий режимы резания: частота вращения и подача, а также вращение шпинделя по часовой стрелке;
N350G0Z-55X67 – перемещение резца в запрограммированную точку с максимальной скоростью;
N360G1X54 – линейная интерполяция по координате X;
N370G1X56Z-54 – перемещение резца на рабочем ходу под углом 45° – точение фаски;
N380G28U0W0 – кадр отвода резцедержателя в референтную точку (точка крайнего положения резцедержателя);
N390M5M9 – кадр с остановом шпинделя и выключением подачи охлаждения;
N400M2 – конец программы.

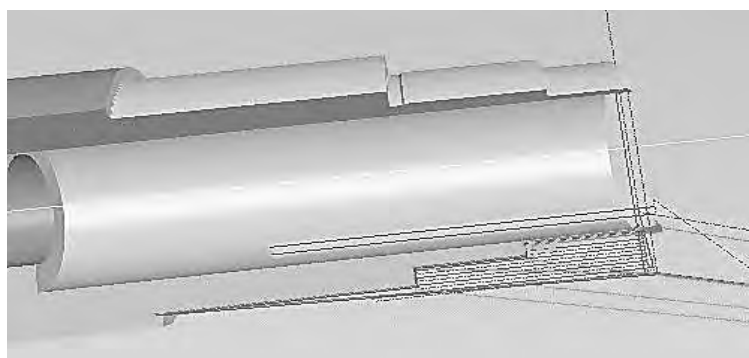


Рисунок 2 – Обработка по УП

Заключение

В результате работы был написан код для технологического перехода токарной операции станка с ЧПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д. Н. Шабалин, И. И. Козарь, И. С. Михайлова, Н. А. Беликова. Цифровизация фрезерной технологической операции применением оборудования с ЧПУ // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: сборник научных трудов. – СПб, 2022. -С. 88-94.
2. А. В. Рябова, Д. Н. Шабалин, И. И. Козарь, М. С. Шульга. Цифровизация токарной операции за счет применения оборудования с ЧПУ // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: сборник научных трудов. – СПб, 2022. - С. 94-100.
3. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
4. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
6. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.
7. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
8. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.
9. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.
10. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.
11. ГОСТ 10549-80. Выход резьбы. Сбеги, недорезы, проточки и фаски. – М.: Издательство стандартов, 2003.
12. ГОСТ 23270-89. Трубы-заготовки для механической обработки. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 1996.
13. Шабалин Д. Н., Хрусталева И. Н., Четвериков И. А., Бровкина Я. Ю. Программирование станков с числовым программным управлением: учеб. пособие. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. С74 Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. —М.: Машиностроение, 1986. 496 с., ил.

D.N. Shabalin, I.I. Kozar, T.A. Larionova, I.S. Mikhailova, A.V. Ryabova
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia,
shadmit@yandex.ru

APPLICATION OF MODERN APPROACHES TO THE DESIGN OF TURNING OPERATIONS WITH THE HIGHEST LOADING OF MACHINES WITH INCREASED PRODUCTIVITY

Abstract

Digitalization brings its own adjustments to production planning. Computer Numerical Control (CNC) machines significantly increase the productivity of processes and reduce the time spent on changing cutting tools. There is a need to rethink the approach to production processes and maximize the use of equipment with increased productivity. This article will present a control program (NC) for one setting of a turning operation for a CNC lathe.

Keywords: CNC machine tool programming, mechanical engineering technology, high performance equipment.

Т.А. Макарова, А.В. Рябова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, makarovata2004@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРА МАШИНОСТРОЕНИЯ СПБПУВ УСЛОВИЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация

Модернизация производств машиностроения является непрерывным процессом, который порождает спрос на квалифицированные кадры. Подготовка инженера должна проходить в условиях развивающихся цифровых технологий и соответствовать уровню технического оснащения предприятий.

В данной статье проанализирован рынок труда и спрос на специалистов в области машиностроения. Результатом исследования служит вывод, на сколько современное высшее образование задействует цифровые технологии при обучении, а выпускники востребованы на машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: цифровые технологии, высшее инженерное образование, образовательная программа, машиностроение.

Введение

В Послании Федеральному собранию 4 декабря 2014 года Президент России Владимир Путин обозначил Национальную технологическую инициативу (НТИ) одним из приоритетов государственной политики. Данная инициатива подразумевает программу мер по поддержке развития в России перспективных отраслей, которые в течение следующих 20 лет могут стать основой мировой экономики и обеспечат переход России на новый технологический уклад.

Основоположником теории технологических укладов считается российский ученый-экономист Н. Д. Кондратьев [1]. Его теория утверждает, что научно-технический прогресс развивается путем смены технологических укладов по циклам длительностью 50–70 лет. В обозримом будущем мировая экономика совершит переход на первый постиндустриальный шестой технологический уклад. Для этого должны произойти серьезные изменения в структуре управления, организации и техническом оснащении предприятий всех областей.

НТИ предусматривает создание сетевой структуры Фабрик Будущего – это определенный тип системы бизнес-процессов, способ комбинирования бизнес-процессов [2]. Фабрики Будущего состоят из трех частей: цифровые, умные и виртуальные. Сфера изучения студентами машиностроителями – первая и вторая части. Для того, чтобы формировать Фабрики Будущего, отбирая лучшие в мире технологии с добавлением собственных интеллектуальных ноу-хау, необходимо иметь место, где их можно было бы опробовать на практике, в среде, отвечающей реальным условиям. Для этих целей дорожной картой «Технет» в 2017–2019 гг. предусмотрен запуск трех испытательных полигонов (Test Beds). Один из этих полигонов создан на базе первого в России Института передовых производственных технологий (ИППТ) СПбПУ.

Основой технологического развития производства, определяющее конкурентоспособность, в настоящее время является использование цифровых

промышленных технологий для создания автоматизированных производственных процессов на базе безлюдной технологии. В связи с этим подготовка студентов выходит на новый уровень комплексного подхода проектирования технологического процесса изготовления изделий. Рассматривается уже изготовление не одного изделия, а его жизненный цикл – Компьютерно-интегрированное производство, в котором задействованы CALS-технологии (Computer Aided Acquisition and Life-Cycle Support). CALS-технологии — современные информационные технологии, обеспечивающие автоматизированную поддержку решений на отдельных этапах жизненного цикла изделий (ЖЦИ), а также информационную интеграцию всех его этапов. На рисунке 1 представлена схема жизненного цикла изделий.



Рисунок 1 – Жизненный цикл изделий

Модернизация в области машиностроения начинается с подготовки специалистов на базе высших учебных заведений, с внедрения новых образовательных программ, направленных на изучение современных цифровых производств [3 - 6]. Под цифровым производством понимается наличие цифровой модели и поддерживающих ее IT-систем, позволяющих описать это производство в форме, пригодной для автоматизированной обработки. Модель должна отражать состояние системы в реальном времени и состояние производства достаточно точно для управления. Необходимо иметь алгоритмы управления, механизмы осуществления управления, механизмы контроля.

Анализ рынка труда

РТУ МИРЭА и Head Hunter провели совместное исследование, по итогам которого был составлен рейтинг наиболее востребованных профессий на Российском рынке труда за три года [7]. Первое место по количеству вакансий занимает менеджер по продажам, а второе – инженер. По данным онлайн-рекрутинга Head Hunter, в 2019 году было размещено 270 тысяч вакансий для инженеров, в 2020 году – 301 тысяча, а за первые месяцы 2021 года уже набиралось 96 тысяч.

Крупные компании машиностроительной отрасли, такие как Камаз, Урал АЗ и Силовые машины выдвигают ряд аналогичных требований для кандидатов на должности инженеров-технологов и инженеров-конструкторов. Помимо высшего технического образования, необходимо умение работать с ЕСКД и ЕСТД, знание технологических процессов производства деталей машин. Преимущество получают кандидаты, которые уверенно владеют персональным компьютером, имеют опыт работы с САД (Computer Aided Design) и САМ (Computer Aided Manufacturing)

системами. На предыдущий опыт работодатель обращает всё меньше внимания, отдавая предпочтение молодым специалистам.

Сайт по поиску работы SuperJob проводил исследования в сентябре 2022 года на тему востребованности молодых специалистов [8]. По результатам опроса работодателей была выявлена тенденция роста приема молодых специалистов в промышленной области на 2 процентных пункта по сравнению с предыдущим годом. Исследования показали, что 65% работодателей готовы принимать молодых специалистов без опыта. Рейтинг профессий, на которые респонденты сайта чаще всего принимают специалистов без опыта, возглавляет направление инженерно-технических специальностей.

Исследование рынка труда позволяет сделать вывод, что существует спрос на инженеров, навыки которых находятся на уровне современного цифрового оснащения предприятий. Как обстоят дела с предложением, где и как готовят будущих инженеров – машиностроителей?

Высшее образование на базе СПбПУ и задействование цифровых технологий

На данный момент в Санкт-Петербурге 3 высших учебных заведения, которые готовят бакалавров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», одним из которых является Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Данная образовательная программа направлена на подготовку специалистов в области машиностроения, способных решать следующие задачи:

1. Создавать передовые цифровые технологии: разрабатывать системы комплексных технологических решений, обеспечивающие в кратчайшие сроки проектирование и производство конкурентоспособной продукции нового поколения от стадии исследования и планирования, когда закладываются базовые принципы изделия, и заканчивая созданием цифрового макета, «цифрового двойника», опытного образца или мелкой серии («безбумажное производство», «всё в цифре»).

2. Разрабатывать системы компьютерных моделей как новых проектируемых изделий, так и производственных процессов.

3. Использовать CALS-технологии для цифровизации всего жизненного цикла изделий (от концепт-идеи, проектирования, производства, эксплуатации, сервисного обслуживания и до утилизации).

Я, Рябова А.В., являюсь студентом первого курса магистратуры направления «Технология автомобилестроения», в прошлом году защитила диплом по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». В данной статье будет рассмотрен процесс становления инженера машиностроения в условиях развивающихся цифровых технологий, обучающегося в политехническом университете Петра Великого.

Обучение на инженерной специальности подразумевает работу с большим количеством числовой информации. Одной из наиболее используемых студентами программ является система компьютерной алгебры Mathcad [9]. Программа используется для математического моделирования и расчета кинематических цепей. Её освоение позволило обрабатывать экспериментальные данные в кратчайшие сроки, строить графики на основе полученных зависимостей. В учебной программе предмета «Вычислительная математика» студенты учатся решению линейных и нелинейных уравнений различными методами и с помощью встроенных функций,

экстраполяции и интерполяции экспериментальных данных. На рисунке 2 представлен фрагмент программы для интерполяции дискретных данных в Mathcad.

С первого курса студенты начинают работать в САД программах, которые используют всё дальнейшее обучение для моделирования и оформления конструкторской и технологической документации. В учебной программе предмета «САПР» происходит ознакомление с программой КОМПАС - 3D [10]. Результатом обучения студенты осваивают основы твердотельного и листового моделирования, создания ассоциативных чертежей, владеют интерфейсом программы. Почему изучается только одна САД система? Потому что при уверенном использовании и знании функционала одной системы для автоматического проектирования с легкостью можно перейти на другую, например, на AutoCad, Inventor, Solid Works или другие. На рисунке 3 изображена сборка муфты, выполненная на лабораторной работе по дисциплине «САПР»: каждый студент получает индивидуальное задание по разработке сборочной единицы. Лабораторная работа направлена на освоение моделирования сборок, на ознакомление встроенными библиотеками стандартных изделий программы КОМПАС 3D.

Моделирование и создание чертежей осваиваются параллельно. Например, на дисциплине «Детали машин и основы конструирования» студенты проектируют и чертят сборочный чертеж редуктора по индивидуальному заданию, используя модуль КОМПАС 2D.

На старших курсах у студентов машиностроения появляются профильные предметы, в программу которых входит изучение станков и основ организации производства. В условиях модернизации и замещения универсальных станков с аналоговым управлением на станки с числовым программным управлением (ЧПУ) возникает необходимость владения САМ системами. В рамках предмета «Программирование станков с ЧПУ» студенты обучаются M- и G- кодированию [11]. Итогом прохождения образовательного курса является курсовой проект, в котором прописан код для обработки детали на симуляторе токарного и фрезерного станков на стойке Fanuc. На рисунке 4 представлен пример симуляции обработки вала.

Проектирование технологических процессов – одна из основных задач инженера-машиностроителя. Для удобства создания технологических карт существуют различные программные обеспечения, которые автоматизируют этот процесс. В рамках дисциплины «САПР технологических процессов» рассматривается создание технологического процесса с использованием программы Вертикаль и TRProject.

Программа Вертикаль считается одной из самых популярных и удобных среди технологов. Технологический процесс формируется автоматически и сохраняется в удобный формат чтения. Пользователь выбирает режущий инструмент, измерительный инструмент, оснастку и станки, задает режимы резания. В каталоге программы прописаны варианты технологических переходов, типовые операции, которые нужно выбрать и расположить в правильной последовательности для обработки конкретной детали. Итогом работы является написанный технологический процесс, начиная от раскроя заготовки, заканчивая готовым изделием.

Помимо использования программного обеспечения для непосредственной работы будущего инженера всё обучение сопровождается курсами, размещенными на электронных площадках СДО (Система дистанционного обучения) и Открытое образование. Записанные видеоматериалы и размещенные тестовые задания позволяют проходить обучение в любое удобное время и из любого удобного места.

В условиях санкций большинство инженерных ПО перестали предоставлять лицензии пользователям из России. Некоторые продукты не имеют аналогов на российском рынке и это является большим ударом по отрасли. Список используемых программ сильно сократился и предприятия вынуждены переучивать своих сотрудников в экстренном порядке. К каким проблемам это приведет в будущем?

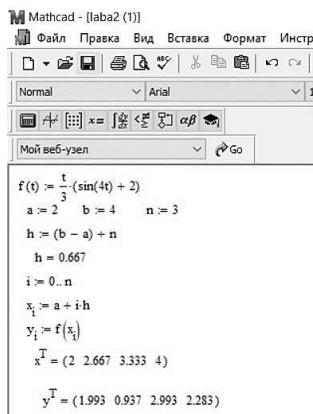


Рисунок 2 –
Фрагмент
программы для
интерполяции
дискретных данных
в Mathcad

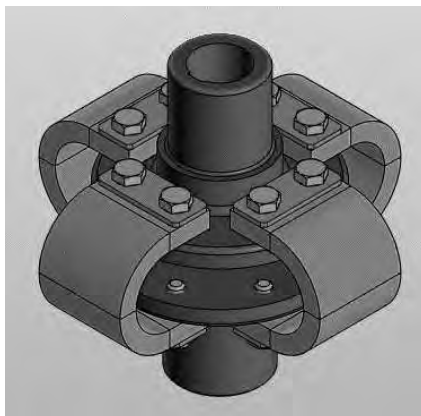


Рисунок 3 – 3D модель
муфты

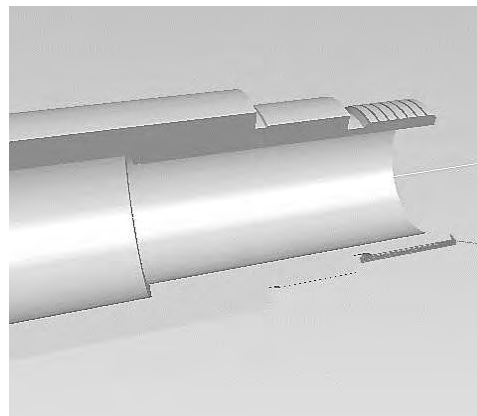


Рисунок 4 – Установ для
токарной операции

Осваивание программы даже небольшим предприятием является сложной задачей, на которую будут затрачены месяцы. Обучение сотрудников приведет к простоям и увеличению времени на решение задач. Снижение производительности скажется на экономике всего предприятия. Программы-аналоги имеют уменьшенный функционал или недостаточно отлаженный процесс работы, что тоже негативно скажется на производительности и качестве продукции.

Выводы

Невозможно подготовить востребованного инженера машиностроения без изучения и применения цифровых технологий. За четыре года обучения на бакалавриате студент СПбПУ получает достаточное количество знаний и навыков, чтобы стать сотрудником машиностроительного предприятия на должности инженер-технолог или инженер-конструктор. Статистика 2022 года показывает, что 9 из 12 выпускников моей группы уже работают по профессии, в том числе и я.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев Н. Д., Опарин Д. И. Большие циклы конъюнктуры: Доклады и их обсуждение в Институте экономики. - 1-е изд. - М., 1928. - 287 с.
2. Многоуровневая структура фабрик будущего // Национальная технологическая инициатива. URL: <https://technet-nti.ru/article/fabriki-buducshego>. (Дата обращения: 23.10.2022).
3. Гасюк Д.П. Особенности и направления развития системы подготовки специалистов в области машиностроения в условиях импортозамещения и цифровизации экономики россии // Инновационные идеи в

машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 4-12.

4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Лихачева О.А. Методика апостериорной оценки эффективности деятельности научных и научно-педагогических подразделений высших учебных заведений // Вестник Российской таможенной академии. 2014. № 1. С. 27-32.

5. Ефимова А.Б., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Методика оценки качества образовательного процесса // Современные проблемы науки и образования во внутренних войсках МВД России: сборник научных трудов научно-педагогического состава Санкт-Петербургского военного института внутренних войск МВД России. Санкт-Петербург, 2015. С. 98-101.

6. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

7. Эксперты назвали одну из наиболее перспективных профессий // Российская газета. URL: https://rg.ru/2021/03/25/eksperty-nazvali-odnu-iz-naibolee-perspektivnyh-professij.html?utm_source=mirea&utm_medium=link&utm_campaign=news. (Дата обращения: 20.10.2022).

8. Производственные предприятия стали чаще принимать на работу молодых специалистов без опыта // SuperJob. URL: <https://www.superjob.ru/research/articles/113658/proizvodstvennyye-predpriyatiya-stali-chasche-prinimat-na-rabotu-molodyh-specialistov-bez-opyta/>. (Дата обращения: 20.10.2022).

9. Mathcad Student and Educator Portal: официальный сайт. – URL: <https://www.mathcad.com/en/education>. (Дата обращения: 20.10.2022).

10. Компас 3D: официальный сайт. – URL: <https://kompas.ru/>. (Дата обращения: 20.10.2022).

11. Рябова А.В., Шабалин Д.Н., Козарь И.И., Шульга М.С. Цифровизация токарной операции за счет применения оборудования с ЧПУ // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: сборник научных трудов. - СПб, 2022. - С. 94-100.

Т.А. Makarova, A.V. Ryabova
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
makarovata2004@gmail.com

FORMATION OF A SPbPU MECHANICAL ENGINEER IN THE CONDITIONS OF DIGITAL TECHNOLOGIES

Abstract

The modernization of the production of mechanical engineering is a continuous process that generates a demand for qualified personnel. Training should take place in a digital environment and meet the requirements of the technical equipment of enterprises.

This article analyzes the labor market and the demand for specialists in the field of mechanical engineering. The result of the study is the conclusion of how much higher education has grown due to the use of digital technologies in teaching, and graduates are in demand at machine-building enterprises.

Keywords: digital technologies, higher engineering education, educational program, mechanical engineering.

Ши Шуанюань, С.В. Михайлов, Д.Н. Шабалин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, bravoshi@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Аннотация

Выполнен анализ технологических способов стружкодробления при резании пластичных материалов на токарных станках с ЧПУ. Показано, что известные методы дробления стружки в процессе резания можно разделить на естественные и искусственные. Наиболее простым и в достаточной мере эффективным является способ управления формой стружки путем подбора оптимальных режимов резания и геометрии стружкозавивающих элементов инструмента. Предлагаемые рекомендации по созданию и использованию пластин со сложной формой передней поверхности преимущественно базируются на использовании производственного опыта и экспериментальных исследований. Эмпирический подход не позволяет выработать четкие представления об областях применения известных методов для конкретных технологических операций.

Ключевые слова: Резание материалов, вид стружки, режимы резания, стружкодробление.

Введение

К числу наиболее острых проблем, возникающих при резании материалов на станках с ЧПУ относится проблема управления формообразованием и дроблением стружки. Стружка, неблагоприятная с точки зрения ее удаления из зоны резания и от станка, является фактором, резко снижающим эффективность и надежность автоматизированной механической обработки.

Управление стружкообразованием при резании металлов сводится к формированию таких стружек, при которых: стружка не создает препятствий для автоматических перемещений узлов станка; форма, размеры и направление оси спирали стружки не препятствуют автоматизации установки заготовки и снятия обрабатываемой детали со станка, а также оперативного контроля процесса обработки; исключается контакт стружки с обработанными поверхностями детали на чистовых операциях; отсутствует влияние стружки на преждевременный выход режущего инструмента из строя, стружка занимает минимальный объем пространства, имеет стабильную форму при постоянных режимах резания. Многообразные требования, предъявляемые к процессу образования стружки, вытекают из условия обеспечения наибольшей эффективности процессов резания, отвода, транспортировки и переработки стружки.

Рассматривая существующие формы стружки с позиции удобства ее отвода из зоны резания и от станка, предпочтение, как правило, отдают прерывистой, раздробленной на мелкие части стружке, занимающей минимальный объем пространства. Предельная длина завитой спирали стружки не должна превышать 100 мм.

Проблема выбора наиболее рационального технологического способа стружкодробления при резании пластичных материалов групп P,M,S относится к числу важных, актуальных проблем [1,2,3].

Типы и формы стружек

Все многообразие стружек, образующееся при резании металлов, можно свести к четырем известным типам – сливной, суставчатой, элементной, надлома. При резании пластичных материалов образуются в основном первые два типа стружек; обработка резанием хрупких материалов сопровождается формированием элементной стружки или стружки надлома. По мере изменения условий резания один тип стружки может переходить в другой. При увеличении твердости и прочности, т.е. снижении пластичности обрабатываемого материала, сливная стружка переходит в суставчатую и элементную. Увеличение подачи для пластичных материалов приводит к изменению типа стружки от сливной к элементной. Глубина резания на формирование типа стружки влияния не оказывает. Для большинства углеродистых и легированных конструкционных сталей с увеличением скорости резания стружка последовательно изменяется от элементной или суставчатой к сливной. При обработке жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов, напротив, с увеличением скорости резания сливная стружка переходит в элементную. Из геометрических параметров наиболее сильное влияние оказывает передний угол режущего инструмента. С увеличением переднего угла элементная стружка при резании пластичных материалов превращается в суставчатую, а затем в сливную.

С точки зрения удаления стружки от станка и ее переработки наиболее благоприятным типом является элементная стружка. Однако резание при образовании такой стружки протекает с циклическим изменением силы резания и контактных нагрузок на инструменте, что приводит к возникновению вибраций в зоне обработки и снижению работоспособности инструмента.

Рассматривая формы стружек с позиции удобства ее отвода из зоны резания и от станка, предпочтение, как правило, отдают прерывистой, раздробленной на мелкие части стружке, занимающей минимальный объем пространства. Однако, с точки зрения самого процесса резания, образование непрерывной сливной стружки способствует большей устойчивости процесса резания, что благоприятно сказывается на работоспособности инструмента и качестве обрабатываемых деталей (рис.1).

Выбор оптимальных условий обработки требует компромиссного решения и ориентирован на образование относительно длинных отрезков стружки компактной формы, удовлетворяющей требованиям конкретного вида производства, конструкции станка, степени его автоматизации и т. п. Например, при работе на универсальном оборудовании в качестве основного требования, определяющего удовлетворительный отвод стружки, принимают стабильное завивание ее в спираль малого диаметра без ограничения длины. Для условий автоматизированного производства оптимальной формой стружки являются спиральные отрезки длиной 30...80 мм, хорошей – дробленая в виде колец и полуколец, удовлетворительной – мелкодробленая.

Современные способы получения благоприятной формы стружки

При естественном дроблении стружки ее разрушение происходит в результате деформации о естественные препятствия, возникающие на пути движения стружки. Искусственное дробление предусматривает использование устройств или приспособлений, которые обеспечивают разрушение или разделение стружки (рис.2).





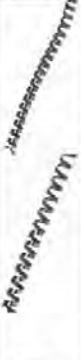

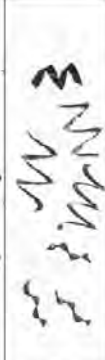
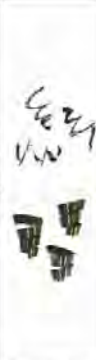

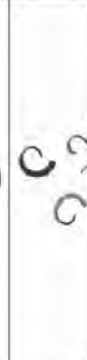

										
Ленточная прямая	Путаная	Непрерывная спиральная			Прерывистая спираль			Дробленая		
		Плоская винтовая	Винтовая	Цилиндрическая Винтовая	Цилиндрическая	Спиральная, винтовая	Коническая спираль	Плоская спираль	Крупная	Мелкая
Неудовлетворительная форма стружки		Удовлетворительная			Хорошая			Удовлетворительная		Неудовлетворительная
Благоприятная форма стружки										

Рисунок 1 – Производственный классификатор стружки



Рисунок 2 – Способы получения БФС

Наиболее простыми и в достаточной мере эффективными являются способы естественного стружкодробления путем подбора оптимальных режимов резания, геометрии и формы рабочих поверхностей инструмента.

Способность стружки к естественному завиванию и разрушению зависит от многих факторов. Необходимыми условиями стружкодробления являются обеспечение стабильности формы стружки при постоянных режимах резания, устойчивый контакт стружки с препятствием, высокая жесткость стружки и малая гибкость. Механизм влияния технологических условий резания на эти факторы сложен, и несмотря на многочисленные исследования, изучен недостаточно полно.

Несмотря на развитие естественных способов управления формой стружки, по-прежнему острой остается проблема надежного стружкодробления при обработке

вязких материалов, подобных чистым алюминию или меди и низкоуглеродистой или нержавеющей стали. Если обрабатываемый материал и возможные диапазоны изменения параметров режима резания и геометрии инструмента не обеспечивают надежного стружкодробления, то применяют искусственные способы. К числу искусственных способов можно отнести кинематические способы (дискретное и вибрационное резание), стружкоразрушающие способы путем механического или теплового воздействия на стружку (динамические стружколомы, мельницы, отрывные валки, барабаны, высоконапорные струи СОТС, электроискровое пережигание стружки и др.), способы физико-технического воздействия на обрабатываемую деталь (изменение механических свойств поверхности резания, нарушение целостности поверхности резания), химические способы (изменение химического состава стали).

Общим недостатком искусственных способов дробления стружки является увеличение трудоемкости обработки, ухудшение условий работы инструмента и оборудования, снижение качества обработанных поверхностей, использование специальных устройств, снижающих возможности станка. Поэтому большинство из них не нашли широкого практического применения. Среди развивающихся методов этого направления следует отметить кинематические методы стружкодробления с периодическим изменением режимов резания в процессе обработки деталей (рис 3).

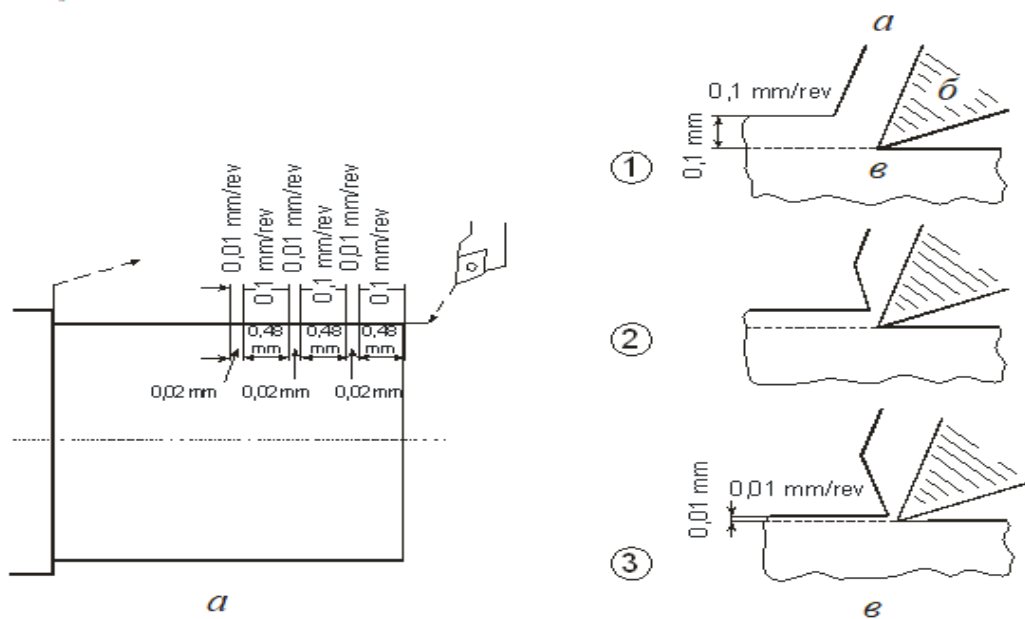


Рисунок 3 – Закон изменения подачи (а) и схема изменения толщины стружки (в), обеспечивающие стружкодробление при точении на станке с ЧПУ:
а – стружка, б – инструмент, в – заготовка

Метод сравнительно просто реализуется на токарных станках с ЧПУ и многоцелевых станках. Оптимальный алгоритм периодического замедления подачи или скорости резания позволяет не только обеспечить удовлетворительное стружкодробление, но и способствует уменьшению шероховатости обработанной поверхности. В качестве такого алгоритма, при резании алюминиевых сплавов, углеродистой и нержавеющей стали со скоростями от 140 до 500 м/мин, глубиной резания 0,05 мм предложено применять циклическое уменьшение подачи от 0,1 мм/об на длине 0,48 мм до 0,01 мм/об на длине 0,02 мм (рис 2). При этом, по данным авторов стойкость инструмента практически не изменяется, а

производительность обработки уменьшается незначительно. Принудительное стружкодробление на станках с ЧПУ не требует установки дополнительных механических или электронных устройств.

К недостаткам способа можно отнести увеличение затрат на наладку оборудования [4 - 12], повышенный износ исполнительных органов станка вследствие увеличения динамических нагрузок. Важно отметить, что эффективность способа динамического стружкодробления в значительной мере зависит от формы, образующейся при резании стружки. Следовательно, решение задач естественного и искусственного стружкодробления становится возможным лишь при наличии математических выражений, связывающих форму и направление движения стружки с геометрией инструмента, режимами резания, физико-механическими свойствами обрабатываемого и инструментального материалов.

Заключение

Выполненный анализ технологических способов стружкодробления позволяет оценить целесообразность и эффективность применения известных способов управления формой стружки при резании пластичных материалов на токарных станках с ЧПУ. Метод стружкодробления необходимо рассматривать в сочетании с обрабатываемым материалом, режимами резания и соответствующими параметрами стружколома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фэн Гаоту, Йе Ли. Анализ причин и решений ненадежного стружкодробления режущих инструментов. CNKI:SUN:ZDLB.0.2006-08-017.
2. Бурдин. П.В., Михайлов С.В. Оптимизация токарной обработки материалов по критерию наименьшей себестоимости с учетом стружкодробления / Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Инновационные идеи в машиностроении" ИИМ-2022, – С-П 24–26 мая 2022 г./под ред. д. техн.наук, проф. А. А. Поповича, д. техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С 19-24.
3. Михайлов С. В. Компьютерное прогнозирование и системный анализ причинно-следственных связей процессов образования, завивания и дробления сливной стружки / С. В. Михайлов. – Кострома: изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. – 159.
4. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
5. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.
6. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.

7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

8. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.

9. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.

10. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.

11. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.

12. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

Shi Shuangyuan, S.V. Mikhailov, D.N. Shabalin
Peter the Great St. Petersburg Polutechnic University, Saint Petersburg, Russia
bravoshi@yandex.ru

Abstract

The study of the type of chips and their method of crushing during cutting processing on the machine. Comparison of the effect on chip breaking under different cutting conditions. Investigation of suitable chipbreaker parameters for chip breaking.

Keywords: Type of chips, cutting mode, chip breaking.

С.Н. Степанов, И.Н. Хрусталева, С.С. Степанов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, stepanov56@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО БЛОКА ЦИЛИНДРОВ, С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос повышения износостойкости рабочей поверхности алюминиевых блоков цилиндров при использовании технологии микродугового оксидирования. Проведен анализ нескольких сплавов опытных образцов и описана технология микродугового оксидирования. Также проведены исследования на опытных плоских малогабаритных образцах в масляной ванне в определенном диапазоне температур и определены такие характеристики как: весовой износ образца и контробразца, погрешность определения весового износа, суммарный линейный износ. Была дана оценка качества покрытия, получаемого методом микродугового оксидирования на различных алюминиевых сплавах, с учетом его триботехнических свойств в паре с верхним поршневым кольцом.

Ключевые слова: блок цилиндра, алюминий, микродуговое оксидирование, качество покрытия.

Введение

При создании моноблоков цилиндров из алюминиевых сплавов наибольшее внимание уделяется улучшению износостойкости и противозадирных свойств рабочей поверхности цилиндров при работе в парах с поршневыми кольцами и алюминиевой юбкой поршня, а также механических свойств алюминиевого сплава в условиях высоких тепловых и механических нагрузок.

Следует отметить, что работы по созданию износостойкой рабочей поверхности алюминиевых гильз цилиндров проводятся достаточно давно. Например, фирма Mahle ведет эти работы уже более 50 лет. При этом особая интенсивность проведения таких работ различными фирмами наблюдается в последнее десятилетие.

Основное применение микродугового оксидирования нашло там, где требуется высокая износостойкость деталей и, при этом, износостойкость контртела не лимитируется. Главные ограничения в широком применении этого метода были обусловлены трудностями в поддержании стабильности процесса при обработке большого количества деталей (прежде всего, из-за изменения свойств электролита в процессе работы) и при обработке крупногабаритных изделий (появление неоднородности и неустойчивости процесса) [1, 2].

Методика исследования

В качестве исследуемых объектов были выбраны блоки цилиндров автомобиля ВАЗ 2110 из алюминиевых сплавов с упрочнением поверхности методом микродугового оксидирования.

Ниже приведены некоторые сведения об исследованных в работе сплавах.

Сплав АК6М2 – литейный сплав, используется в АО «АВТОВАЗ» для изготовления головок блоков цилиндров, относится к группе доэвтектических силуминов.

Сплав АК9 – литейный сплав, относится к группе доэвтектических силуминов.

Сплав В124 – литейный сплав, используется в АО «АВТОВАЗ» для изготовления крышек статора РПД, относится к группе доэвтектических силуминов.

Сплав АК12ММгН – литейный сплав, относится к группе эвтектических силуминов.

Сплав ВАЛ-10 – литейный авиационный бескремнистый высокопрочный и жаропрочный сплав; обладает плохими литейными свойствами.

Сплав АК4-2ч – деформируемый авиационный сплав с высокой стабильностью мех. свойств при длительной работе при высоких температурах (175...200°С) и относительно низким КЛР.

Основа технологии микродугового оксидирования состоит в том, что алюминиевую деталь помещают в щелочной электролит, содержащий пирофосфат-ионы ($P_4O_7^{-4}$), и ведут процесс анодного осаждения при постоянном или повышаемом по мере утолщения покрытия напряжении до контролируемого прекращения пробоя слоя покрытия [3-5].

Триботехнические испытания проводили по основной методике на созданном в Лаборатории трения и смазочных материалов ОИСиСМ ИЦ (ОАО АвтоВАЗ) специализированном стенде. Стенд специально модернизирован для проведения испытаний пары «кольцо – цилиндр», в результате чего появилась возможность проведения испытаний на плоских малогабаритных образцах в масляной ванне в диапазоне температур 110°...320°С).

Для триботехнических испытаний на «Специализированном стенде с возвратно-поступательным движением образцов» изготавливались образцы двух типов:

- плоские образцы 25x9x2,5 (мм³) из материала гильзы цилиндра: серийного (чугун Gh 190) или алюминиевый сплав с покрытием по технологии фирмы «ТОРСЭТ»;

- контрообразцы - сегменты серийного поршневого кольца (чугун ВЧ60, покрытый гальваническим хромом).

Определялись следующие характеристики износа. Весовой износ образца и контрообразца – на аналитических весах ВЛР-200. Погрешность определения весового износа – 0,17 мг с доверительной вероятностью 90%. Линейный износ образца и контрообразца – путем измерения на инструментальном микроскопе ИМЦ150*50,Б геометрических параметров пятен износа с последующим пересчетом для разделения составляющих износа кольца и гильзы (см. ниже). Инструментальная погрешность определения геометрических параметров пятен износа при доверительной вероятности $P=0,997$ – 5 мкм; при $P=0,8$ – 2 мкм. Суммарный линейный износ определялся с помощью датчика перемещений с точностью 0,01 мм. Тем самым мы определили, какой материал наиболее подходит для наших испытаний.

В основной части работы решалась задача оценки качества покрытия, получаемого методом микродугового оксидирования на различных алюминиевых сплавах, с учетом его триботехнических свойств в паре с верхним поршневым кольцом, то есть в условиях нормального механо-химического износа.

Дополнительные исследования МФЛ проводились с помощью оборудования Micromet-II, НЕОРНОТ 32. Были проведены замеры геометрии слоев,

проанализированы химический состав и микроструктуры образцов при различных нагрузках.

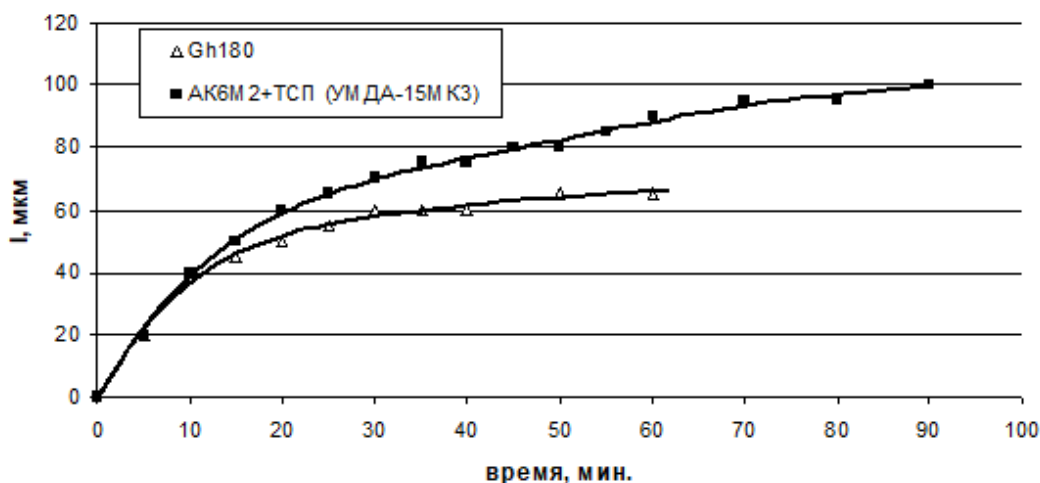


Рисунок 1 - Изменение суммарного износа от времени испытания сопряжения «верхнее компрессионное кольцо цилиндра».

Результаты и обсуждения

Результаты исследования показали, таким образом, на качество покрытия можно эффективно влиять путем изменения структуры сплава, например, путем термической обработки, поверхностного деформирования или их сочетания. При этом представляется принципиально возможным создание покрытия с заданной пористостью и волнистостью границы раздела «металл-покрытие» за счет изменения структуры одного и того же материала.

Приведенные результаты целенаправленного исследования подтвердили этот вывод и позволили разработать технологию упрочнения поверхности алюминий-кремниевых сплавов, включающую предварительное формирование определенной структуры и последующее микродуговое оксидирование.

Выводы

1. Режимы ТО алюминиевого сплава АК6М2 сильно влияют на качество покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования. При этом изменяется толщина, твердость, пористость, однородность, адгезия и когезия. Более качественное покрытие образуется на более качественно подготовленной поверхности.

2. Основным механизмом влияния на качество микродугового оксидирования - покрытия при изменении режима ТО, является изменение формы, размеров и распределения частиц кремния в структуре сплава.

3. По совокупности параметров наилучшими свойствами из числа исследованных обладают образцы АК6М2 с МДО-покрытием после термообработки по режимам Т6 (4) и Т6 (8).

4. Износостойкость пары и, особенно, серийных колец со слоем гальванического хрома сильно зависит от шероховатости образцов с покрытием методом микродугового оксидирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов Е.А. Влияние детонационных покрытий на механические свойства изделий // Автоматическая сварка. 2004.№ 6. С. 56-57.
2. Степанов С.Н. Изучение влияния алюминия на адгезию нержавеющей стали при газопламенном напылении / С.Н. Степанов, Т.А. Ларионова, С.С. Степанов // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 591-598. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.11
3. Бороненков В.Н. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности: Монография / В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2012. 268 с.
4. Krasnyy V. Increase of Wear and Fretting Resistance of Mining Machinery Parts with Regular Roughness Patterns /V.Krasnyy, V.Maksarov, J.Olt // 27 th DAAAM International Symposium, 26-29 October 2016, Mostar, Bosna. 2016. Vol. 27. № 1.P. 151156.DOI:10.2507/27th.daaam.proceedings.023.
5. Khafizov I.I. Influence of roughness on operational properties of details / I.I. Khafizov, I.G. Nurullin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2018 (ISTC-IETEM-2018), 5-7 December 2018, Kazan, Russia. 2019. Vol. 570. № 1. P. 012048. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012048.

S.N. Stepanov, I.N. Khrustaleva, S.S. Stepanov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
stepanov56@mail.ru

INCREASED WEAR RESISTANCE OF ALUMINIUM BLOCK CYLINDERS USING MICRO-ARC TECHNOLOGY OXYGENATING

Abstract

The article considers the issue of increasing the wear resistance of the working surface of aluminum cylinder blocks when using the microarc oxide technology. Several alloys of prototypes were analyzed and the technologic of microarc oxidation was described. Studies were also carried out on experimental flat small-sized samples in an oil bath in a certain range of themes and the following characteristics were determined: weight wear of the sample and the sample, error in determining weight wear, total linear wear. The quality of the coating obtained by microarc-sitting on various aluminum alloys was assessed, taking into account its tribotechnical properties in tandem with the upper piston ring.

Keywords: cylinder block, aluminum, micro-arc oxidation, coating quality.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ ПРУЖИНЫ ГИДРОЗАМКА ПОДЪЕМНИКА АВТОМОБИЛЬНОГО

Аннотация

Выявлены дефекты у пружин гидрозамка. Рекомендован способ упрочнения пружины с применением операции контактного заневоливания.

Ключевые слова: повышение ресурса пружин, упрочнение пружин, контактное заневоливание.

Актуальность

В машиностроении и в технике передовых стран всё чаще применяются пружины, работающие при больших скоростях нагружения с соударениями витков, а также пружины, нагружаемые до соприкосновения витков при значительной, но сравнительно малоцикловой статической нагрузке. Неблагоприятные условия при их эксплуатации приводят к остаточным деформациям, к снижению несущей способности пружин, к развитию скрытых дефектов металла и к их разрушению, что снижает надёжность и безопасность механизмов и машин.

На основании данных комплексного анализа деятельности предприятия ООО КПК «Автокрансервис» можно сделать вывод, что существующая технология замены гидрозамков не обеспечивает требуемого ресурса изделия из-за неудовлетворительного качества пружин (Рисунок 1). В результате проведённого в лаборатории предприятия исследования выявлены закалочные макро- и микротрещины витков пружин. Кроме этого, пружины были недоотпущены. Это свидетельствует о недостаточном контроле качества исполнения операций технологического процесса.

В связи с этим на предприятии возникла необходимость повышения ресурса пружин гидрозамков.

Результаты и обсуждение

Гидрозамок устанавливается на гидроцилиндре выносных опор подъемника автомобильного ВС-28. Состоит гидрозамок (Рисунок 2) из корпуса 2, двух крышек 1 и 6, двух поршней 3 и 7, угольника 4, штока 5, двух пружин 8 и 9, базовой планки 10. Стандартные изделия – манжета 12 и кольцо 11. Гидрозамок работает в среде масла.

Основным дефектом гидрозамка является поломка или осадка пружины 8. Пружина 9 изготовлена из патентированной (упрочненной) проволоки и имеет большой ресурс, к тому же она воспринимает меньшую нагрузку.

В условиях ремонтных предприятий пружины, в случае осадки, могут быть восстановлены [1, 2]. Для повышения ресурса следует ввести операцию упрочнения и испытания пружин перед сборкой.

Для выбора способа упрочнения пружин определим соотношение нагрузки на пружину в изделии и силы сжатия её до соприкосновения витков.

Рабочее давление на пружину в изделии 160 атмосфер (15691200 Па). Отсюда определена сила, действующая на пружину $P_{раб} = 11085,83 \text{ Н}$.



Рисунок 1 – Поломка пружины гидравлического замка на подъемнике

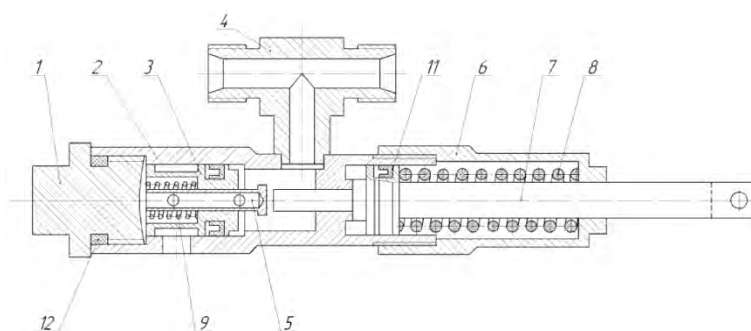


Рисунок 2 – Гидрозамок подъемника автомобильного

Силу сжатия пружины до соприкосновения витков P_3 , Н, определим по выражению (1.1), характеризующему пружину в области больших перемещений, где строго разграничены её начальные и конечные параметры [4]

$$P_3 = \frac{4 \times \cos^2 \alpha_0}{D_0^2} \times \left[C \times (\sin \alpha - \sin \alpha_0) - B \times \sin \alpha \times \left(1 - \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right) \right], \quad (0.1)$$

где α, α_0 – соответственно углы наклона витков пружины в свободном состоянии и сжатой, град.; D_0 – средний диаметр пружины, м; C – жесткость пружины при кручении, $\text{Н} \times \text{м}^2$; B – жесткость пружины при изгибе, $\text{Н} \times \text{м}^2$.

$$P_3 = \frac{4 \times \cos^2 7^\circ 31'}{0,025^2} \times \left[\begin{array}{l} 13,03 \times (\sin 5^\circ 17' - \sin 7^\circ 31') - \\ -10,21 \times \sin 5^\circ 17' \times \left(1 - \frac{\cos 7^\circ 31'}{\cos 5^\circ 17'} \right) \end{array} \right] \quad (0.2)$$

$$P_3 = 3137,77 \text{ Н.}$$

Проведенные расчеты показывают, что рабочая нагрузка, действующая на пружину в изделии $P_{раб}$, в 3,54 раза превышает силу сжатия пружины до соприкосновения витков P_3 . Так как пружины гидрозамок работают при статической нагрузке, приводящей к дополнительному сжатию пружины по линии контакта витков, то для них рекомендуется применять операцию контактного заневоливания [1]. При правильном назначении величины нагрузки контактного заневоливания склонные к поломке пружины - поломаются, а склонные к осадке - осядут сверх допустимой величины. Это гарантирует непопадание таких пружин на сборку. При замене статического заневоливания контактным [3] нагрузку заневоливания следует назначать $Q = 10P_3, Q = 31378 \text{ Н}$.

Выводы

Для повышения ресурса высоконагруженных пружин рекомендуется применять контактное заневоливание. Контактное заневоливание заключается в том, что после сжатия пружины до соприкосновения витков к пружине прикладывается дополнительная осевая нагрузка, приводящая к сжатию витков по линии контакта. Благодаря этому в месте контакта витков образуются ленточки упрочнённого

металла, а на поверхности витков и в витках пружины возникают сложные остаточные напряжения, обуславливающие осевую осадку пружины.

Эффективность контактного заневоливания объясняется изменением механических свойств материала пружин. При этом повышаются показатели прочностных свойств, в то же время несколько снижаются показатели пластических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Землянушов Н.А. Теоретическое исследование влияния дробемётной обработки на осадку пружин подвески автотранспортных средств при восстановлении / Н.А. Землянушов, Н.Ю. Землянушнова // Мир транспорта и технологических машин. – 2019. – № 3 (66). – С. 26-33.

2. Землянушнова Н.Ю. Испытание технологии и устройств для восстановления пружин из закаливаемой проволоки / Н.Ю. Землянушнова, Ю.М. Тебенко, Н.А. Землянушов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2013. – № 1 (117). – С. 28–31.

3. Землянушнова Н.Ю. Классификация и испытание пружин / Н.Ю. Землянушнова, Ю.М. Тебенко. – Вестник машиностроения. 2002. № 5. С. 8-13.

4. Пономарёв С.Д. Расчёт упругих элементов машин и приборов / С.Д. Пономарёв, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 324 с.

S.A. Lyubomudrov¹, O.T. Turabaev^{1,2}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

¹St. Petersburg, Russia, turabaev.ot@edu.spbstu.ru, turabaev.orzumurod@mail.ru

²ОООКПК «Avtokranservis», Stavropol Territory, Stavropol city, Russia

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE SPRING HARDENING METHOD HYDRAULIC LOCK OF THE CAR LIFT

Abstract

Defects in the springs of the hydraulic lock have been revealed. A method for strengthening the spring using the contact capturing operation is recommended.

Keywords: increasing the resource of springs, hardening of springs, contact bondage

Т.У. Умаров¹, О.К.Яцкевич², З.Н.Мухиддинов¹

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан,
tolibjonumarov@umail.com

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Белоруссия,
mtools@bntu.by

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Аннотация

В данной статье рассматривается стабильности эксплуатационных свойств осевых инструментов. Стойкость инструмента в этом случае рассматривается как время безотказной работы, с заданной вероятности Р. Исходя из этого авторами на основании промышленных статических исследований и математического анализа доказано, что возможно 5-6 кратная экономия инструмента с одновременным снижением их стоимости на инструментальных материалах.

Ключевые слова: Надежность, осевая инструмент, твердосплавное, стойкость, стабильность, коэффициент вариации, качество точности, работоспособность, гарантированная стойкость, наработки на отказ, стоимость изготовления.

Введение

Обработка отверстий сверлением является одной из самых распространенной операций в технологическом процессе механической обработки изделий, а объем применяемого сверлильного инструмента превышает даже объем применяемых токарных резцов.

Одним из важных вопросов теории резания металлов является обрабатываемость резанием, зависящая от большого числа факторов. Так, рассеивание стойкости инструментов примерно на 50%, объясняется вариацией эксплуатационных параметров даже при их соответствии требованиям ГОСТИрованных стандартов. Среди основных количественных эксплуатационных показателей качества инструмента важнее место занимает надежность и долговечность, определяющие экономичность технологии механической обработки. В связи с этим большое значение для практики приобретает изучение вопросов взаимосвязи эксплуатационной надежности режущих инструментов с технико-экономическими характеристиками технологического процесса и учета воздействия на них реальных производственных факторов при различном уровне их вариаций.

Внедрение методов статистического контроля качества и надежности должно быть более широким, чем в настоящее время и базироваться на экспресс оценках параметров качества металлорежущего инструмента с применением компьютерных технологии, программное обеспечение которых обеспечивает расчет рациональных конструкций инструментов и условий их эксплуатации по имитационным моделям технологических операций. Однако ускоренные испытания в производственных условиях часто проводятся не для определений показателей надежности, а для быстрого сравнительного анализа различных вариантов конструкций и технологий, не ставя перед собой задачу оптимизации по технико-экономическим параметрам. Поэтому разработка методологии выбора и обоснование численных значений

нормируемых показателей надежности для конкретных производственных условий эксплуатации металлорежущего инструмента представляет собой важную многофакторную проблему, требующую для своего решения большого объема информации о предполагаемых условиях эксплуатации.

Методы

Применяемость в промышленных условиях инструментов, выполненных по новым технологиям, определяется стабильностью условий их эксплуатации, то есть надежностью проведения технологической операции. Исследования свойств твердосплавных покрытий с промежуточными медно-никелиевыми пленками, выполненными по электроимпульсным технологиям, показывают, что наряду с высокой износостойкостью им присущи повышенная хрупкость и большая чувствительность к резким циклическим изменениям температуры и нагрузки. Практически стабильность эксплуатационных свойств инструментов с покрытиями можно характеризовать средним квадратичным отклонением σ или коэффициентом вариации $VarT$ стойкости. Стойкость инструмента в этом случае рассматривается как время безотказной работы с заданной вероятностью p , которая для металлообрабатывающего инструмента должна быть не ниже 0,9.

Результаты и обсуждение

Промышленные испытания сверл различных конструкций показывают [1] что стабильность стойкости инструмента, у которого $VarT \leq 0,2$ можно признать хорошей. При $VarT 0,2..0,35$ стабильность стойкости можно считать удовлетворительной. Когда коэффициент вариации выходит за пределы 0,5 технологический процесс необходимо считать нестабильным [2] и принимать меры к улучшению показателей стойкости применяемых инструментов.

Статистическая оценка, проверенная на зависимость (1) гарантийной стойкости

$$T_p = T(1 - V_h K_{var}) \quad (1)$$

показала, что при увеличении средней стойкости T в 2,5...3 раза величина гарантийной стойкости $T_{0,9}$ увеличилась в 1,5...2 раза.

Реально на практике для таких инструментов, как сверла, которые предназначены для размерной обработки в пределах 12-14 квалитетов точности это означает 5-6 кратную экономию расходов на инструмент.

Недостаточность оценки работоспособности инструмента только по среднему значению приводит к завышению значений средней стойкости. Рекомендуемые диапазоны скоростей резания определяются из условий, что нормативная стойкость при обработке сталей, равна средней стойкости инструментов при работе на выбранном технологическом режиме. В этом случае коэффициенты вариации стойкости инструментов хотя и имеют низкие значения, но довольно ощутимо влияют на реальную среднестатистическую стойкость, и при большой производственной программе данное положение необходимо учитывать.

Величина гарантийной стойкости $T_{0,9}$ как правило, ниже средней стойкости T . При обработке нержавеющей стали реальная стойкость снижается на 25... 35%. Если при выборе режимов обработки необходимо гарантировать стойкость инструмента с заданным уровнем вероятности p , то скорость резания можно определить из зависимости:

$$U_p = U(T_p / T_n)^m, \quad (2)$$

где: T_n - нормативный период стойкости; U - нормативная скорость резания; m - показатель относительной стойкости: для стали 0,2...0,35;

Статистическая проверка работоспособности партии быстрорежущих сверл обычного исполнения и с износостойкими покрытиями показала, что при увеличении средней стойкости в 5 раз для сверл с покрытиями, гарантийная стойкость возрастает в 2,5...3 раза, вследствие значительного снижения коэффициента вариации. Экономичность замены обычных сверл на сверла с покрытиями, в этом плане, не всегда удается определить, т.к. с явным повышением уровня надежности также повышается стойкость инструмента.

При обработке отверстий сверлением требуется комплексный подход для оценки степени применимости в технологии данного вида инструмента или возможности его модернизации на основе закона Стоимости Цикла Службы (СЦС). Концепция СЦС включает в себя оптимизацию полной стоимости и определение его элементов – в основном таких, как уровень надежности инструмента, стоимость его изготовления и стоимость эксплуатации. Аксиомные требования заключаются в том, что чем больше надежность, тем меньше будет затрат на эксплуатацию инструмента. Однако будет значительно возрастать стоимость его изготовления. С учетом показателей надежности, возможность использования данного конкретного типа сверлильного инструмента можно выразить соотношением:

$$A = v/(v + r)100\% \quad (3)$$

где: v - среднее значение наработки на отказ; r - среднее время на замену и подготовку нового инструмента.

Соответственно, чем меньше соотношение r/v , тем выше возможность использования инструмента.

На рисунке 1 показана схема, характеризующая соотношение степени надёжности и суммарной стоимости цикла службы инструмента. Стоимость изготовления будет растущей функцией от параметров надежности и исходящей функцией от среднего эксплуатационного времени.

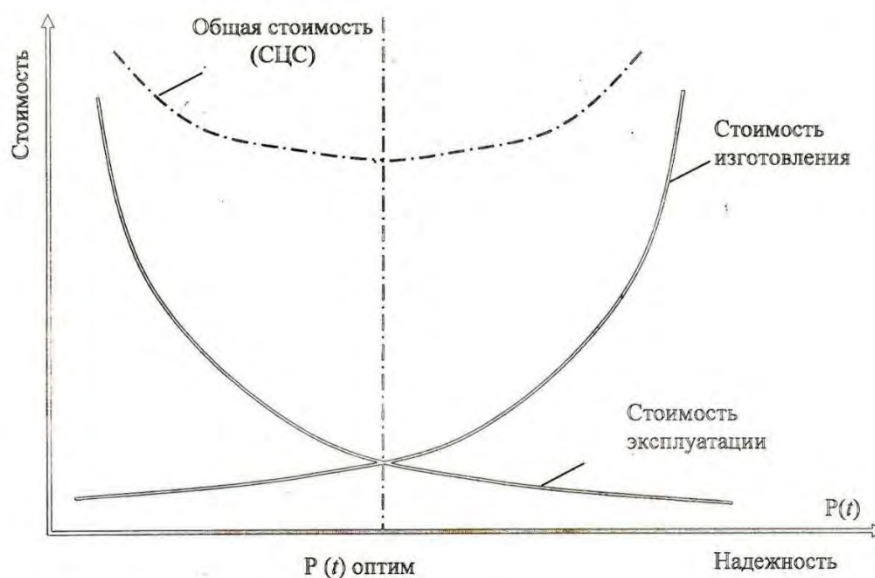


Рисунок 1 – Соотношение степени надежности и суммарной стоимости цикла службы инструмента

Заклучение

Поскольку повышение уровня надежности, т.е. улучшение качества инструментов, приводит к снижению внутрипроизводственных расходов и повышению стоимости изделия, то существует минимум общей стоимости цикла службы, которая и определяет достаточный по выбранной технологии уровень надежности для конкретного предприятия. Разработана методология определений значений параметров надежности осевого инструмента: гарантийной стойкости T_p и ресурса R_p с заданной вероятностью безотказной работы при наличии заданной системы ограничений на технико-экономические параметры технологического процесса и эксплуатации инструмента в условиях распределения твердости заготовок в партии по различным законам распределения.

Выведены расчетные уравнения для нахождения уровня эксплуатационной надежности в зависимости от законов распределения твердости обрабатываемых заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацев П.Г. Коэффициент вариации стойкости инструмента и его применение // Станки и инструмент. - 1984. - №9.
2. Башков В.М., Кацев П.Г. Испытание режущего инструмента на стойкость. Машиностроение, 1985. - 136 с.
3. Умаров Т.У. Исследование вариации стойкости перовых сверл методом имитационного моделирование процесса износа // Ж. Вестник ТашГТУ. - 2004. - №1. - С. 127-131.

T.U.Umarov¹, O.K.Yaskevich², Z.N.Mukhiddionov¹

¹Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan, tolibjonumarov@umail.com

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belorussia, mtools@bntu.by

STUDIES OF TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF AXIS TOOLS

Abstract

This article discusses the stability of the operational properties of axial tools. Tool life in this case is considered as uptime, with a given probability P. Based on this, the authors, based on industrial static studies and mathematical analysis, prove that it is possible to save 5-6 times the tool while reducing their cost on tool material.

Keywords: Reliability, axial tool, hard alloy, durability, stability, coefficient of variation, quality of accuracy, serviceability, guaranteed durability, time to failure, manufacturing cost.

О.А. Лапшина, И.И. Козарь
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА МЕЖДУ МЕДНЫМ ДИСКОМ И ДИСКОМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ПЕРЕДАВАЕМЫЙ МОМЕНТ В МАГНИТНОЙ МУФТЕ

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального измерения момента на выходном валу магнитной муфты при разных зазорах, а также сравнение полученных результатов с аналитическим расчетом. Целью работы является выбор оптимального зазора между медным диском и диском с постоянными магнитами. Задачи исследования состоят в разработке стенда для эксперимента, проведении серии экспериментов, основанных на изменении зазора, апробации результатов эксперимента.

Ключевые слова: магнитная муфта, момент, магнитное поле, постоянные магниты.

Введение

При разработке кабельного барабана появилась необходимость разработки муфты. Назначение магнитной муфты заключается в перенесении вращающего момента с главной оси на ведомую без какого-либо механического воздействия, в автоматическом режиме, за счет взаимодействия магнитных полей, а также исключение обрыва кабеля в кабельных барабанах, в случае неожиданного зацепления кабеля за предметы при намотке кабеля барабана. Это задача выполняется магнитной муфтой именно за счет отсутствия жёсткой связи между двигателем и барабаном, в отличие от муфт, основанных на механическом зацеплении.

На рисунке 1 показано устройство магнитной приводной муфты. Муфта имеет прочную и компактную конструкцию. Передаваемый магнитной муфтой момент можно регулировать без разборки самой муфты. Бесконтактная магнитная связь обеспечивает отсутствие износа.

Магнитная муфта играет роль предохранительной муфты. Работает при одностороннем действии привода, всегда наматывает кабель. При движении крана в другую сторону кабель начинает разматываться. Кабель всегда находится в натяжении, для обеспечения ровной укладки на кабельный барабан.

Муфта в сборе состоит из двух частей (синхронной и асинхронной части).

1. Асинхронная муфта основана на принципе проскальзывания. От электродвигателя поступает 2800 об/мин, а передаточное редуктора 800 об/мин, отсюда Δ скольж.=800.

Входной вал двигателя вращает рабочую часть муфты с медным диском, корпусом и крыльчаткой. При движении медного диска диск с постоянными магнитами также начинает вращаться. На этом асинхронная часть закончена.

2. Синхронная часть муфты.

Необходимость второй полумуфты появилась лишь после проведения первых испытаний, когда стало что при остановке вращения, кабель под собственным весом

начинает разматываться, т. к. нет связи между редуктором и электродвигателем. Два диска 5,6 установленных друг напротив друга, в каждом из которых установлено по 4 магнита (рис. 2). Магниты установлены разно-полюсными, что является аналогом синхронной машины, при отсутствии вращения работают как тормоз [1].

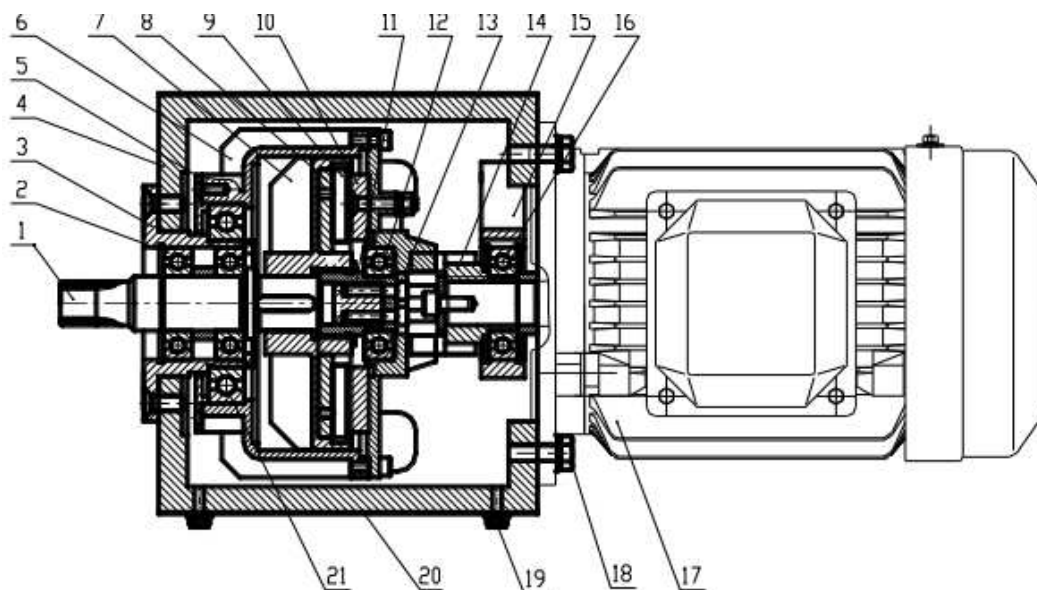


Рисунок 1 – Эскиз сборки магнитной муфты

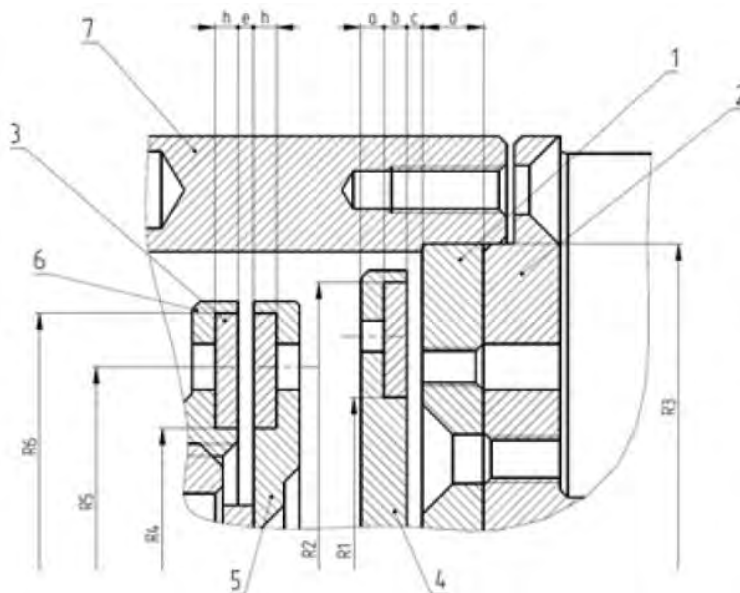


Рисунок 2 – Составные части:

- 1 – медный диск; 2 – крыльчатка;
- 3 – постоянные магниты; 4 – диск с постоянными магнитами;
- 5,6 – тормозной диск с постоянными магнитами

Для расчета момента на выходном валу муфты использовалась модель, подробно описанная в статье [2], основанная на теории Максвелла для проектирования муфты.

Опуская все выкладки, для того чтобы аналитически найти крутящий момент в муфте мы используем уравнение [3]:

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot p^2 \cdot \tau \cdot R_3 \cdot R \left(\sum_{n=1}^K \sum_{k=1}^K jk \frac{M_{nk}^2}{\alpha_{nk}} \cdot r \sinh(\alpha_{nk} \cdot b) \right),$$

$$M_{nk} = \frac{16B_r(\theta)}{\pi^2 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot k} \cdot \sin\left(k\alpha \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{R_2 - R_1}{R_3}\right),$$

$$\tau = \frac{\pi}{2} \cdot R_m,$$

$$r = - \frac{\cosh(\alpha_{nk}c) \sinh(\gamma_{nk}) + \frac{\alpha_{nk}}{\gamma_{nk}} \sinh(\alpha_{nk} \cdot c) \cosh(\gamma_{nk})}{\cosh(\alpha_{nk}(b+c)) \sinh(\gamma_{nk}d) + \frac{\alpha_{nk}}{\gamma_{nk}} \sinh(\alpha_{nk} \cdot (b+c)) \cosh(\gamma_{nk}d)},$$

$$\alpha_{nk} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{\tau}\right)^2},$$

$$\gamma_{nk} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{\tau}\right)^2 + j\sigma(\theta)\mu_0 R_m \frac{k\pi}{\tau} \Omega},$$

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha_t \theta}.$$

Для получения экспериментальных данных была использована схема, представленная на рисунке 3 и рисунке 4.

На рабочем ходу грузик перемещался по плечу и фиксировался в положении, когда рычаг приходил в равновесие. После выключения э/д производилось измерение расстояния, на котором зафиксирован груз, и соответственно вычислялся выходной момент.

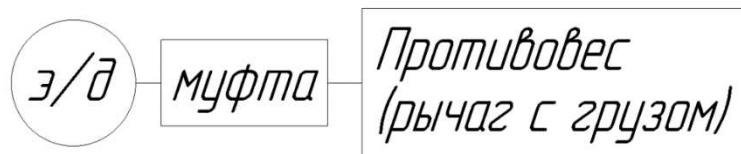


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

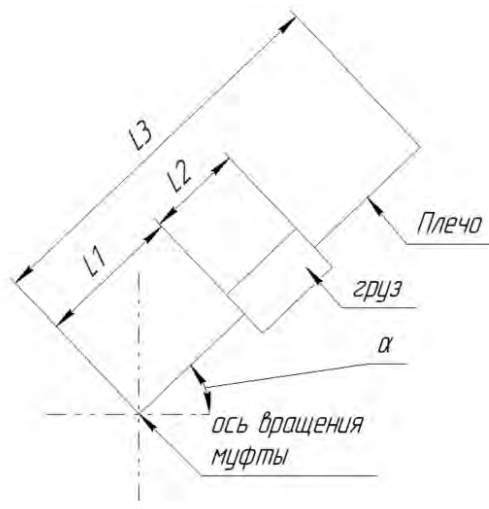


Рисунок 4 – Схема измерения момента

$$T = T_1 + T_2,$$

$$T_1 = F_1 \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right),$$

$$T_2 = F_2 \left(\frac{L_3}{2} \right),$$

$$F_1 = m \cdot g \cdot \cos \alpha,$$

$$F_2 = M \cdot g \cdot \cos \alpha,$$

где: M – масса плеча, кг; m – масса груза, кг.

В условиях эксперимента частота вращения вала электродвигателя 1500 об/мин. Время работы 3 минуты. Результаты эксперимента занесены в сводную таблицу 1. Результаты расчета момента аналитическим путем при разных зазорах представлены на рисунке 5.

Таблица 1 – Результаты проведения эксперимента

Зазор, мм	L1, мм	T, Н*М
0,8	158	3,25
1,2	115	2,75
2,0	55	2,1

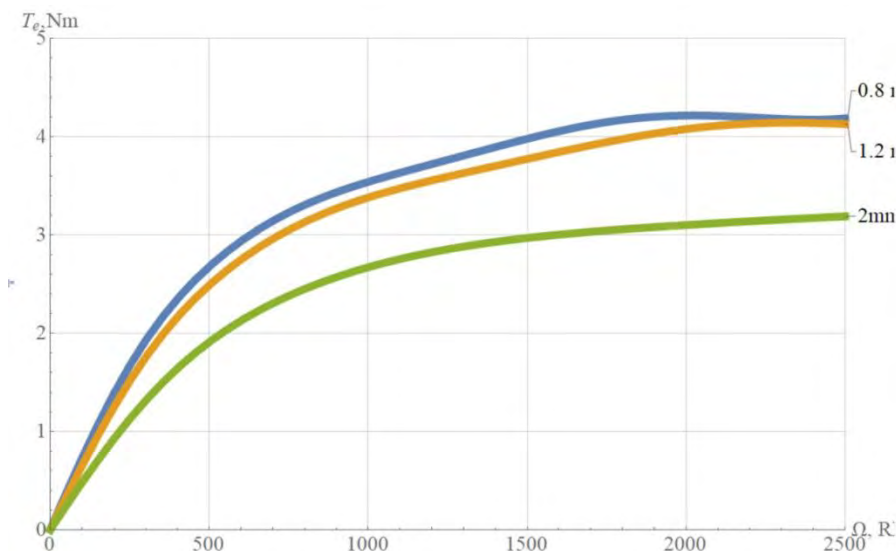


Рисунок 5 – Значение момента при разных зазорах, посчитанные аналитически

Анализируя, график и результаты эксперимента, можно сделать вывод, что расхождение расчетного значения и значения полученный экспериментальным путем составляет примерно 20–25%. После проведения серий экспериментов, был сделан вывод, что такое различие вызвано паразитными силами, на двух тормозных дисках. Задача: увеличить полезный момент во время рабочего хода и уменьшить влияние тормозных дисков.

Так в конструкции муфты добавился еще один элемент-обгонная муфта. Установив обгонную муфту в ступицу одного из тормозных дисков, мы предотвратили небольшое проскальзывание в обратном направлении. После чего повторили серию экспериментов (таблица 2).

Как видно после установки обгонной муфты различие расчетного и экспериментального значения составляют примерно на 10-15%, что объясняется

различными потерями в частности: потерь на трение в подшипниках и обгонной муфте.

После этого магнитная муфта была испытана в условиях воспроизведения циклов ее реальной работы. Циклы испытаний представлены в таблице 3. Частота вращения двигателя на рабочем ходу 1500 об/мин, а на холостом 600 об/мин.

Таблица 2 – Результаты эксперимента после установки обгонной муфты

Зазор, мм	L1, мм	T, Н*м
0,8	185	3,57
1,2	158	3,25
2,0	122	2,83

Таблица 3 – Циклы испытаний

Цикл	Время работы	Время х/х	Время простоя	Всего времени с начала
0	0:00:20	0:00:00	0:01:30	0:01:50
1	0:00:00	0:04:20	0:01:30	0:07:40
2	0:04:05	0:00:00	0:01:30	0:13:15
3	0:00:00	0:04:05	0:01:30	0:18:50
4	0:03:50	0:00:00	0:01:30	0:24:10
5	0:00:00	0:03:50	0:01:30	0:29:30
6	0:03:30	0:00:00	0:01:30	0:34:30
7	0:00:00	0:03:15	0:01:30	0:39:15
8	0:03:00	0:00:00	0:01:30	0:43:45
9	0:00:00	0:03:00	0:01:30	0:48:15
10	0:02:45	0:00:00	0:01:30	0:52:30
11	0:00:00	0:02:45	0:01:30	0:56:45
12	0:02:30	0:00:00	0:01:30	1:00:45
13	0:00:00	0:02:15	0:01:30	1:04:30
14	0:02:00	0:00:00	0:01:30	1:08:00
15	0:00:00	0:02:00	0:01:30	1:11:30
16	0:01:40	0:00:00	0:01:30	1:14:40
17	0:00:00	0:01:40	0:01:30	1:17:50
18	0:01:25	0:00:00	0:01:30	1:20:45
19	0:00:00	0:01:10	0:01:30	1:23:25
20	0:01:10	0:00:00	0:01:30	1:26:05
21	0:00:00	0:00:55	0:01:30	1:28:30
22	0:00:55	0:00:00	0:01:30	1:30:55
23	0:00:00	0:00:40	0:01:30	1:33:05
24	0:03:40	0:00:00	0:01:30	1:38:15

Заключение

В каждом цикле проводился замер температуры на крыльчатке, корпусе, валу, корпусе подшипника. Как и предполагалось, момент на выходном валу в условиях длительной работы и нагрева начинал падать. Чем меньше зазор между медным диском и диском с постоянными магнитами, тем больше нагревалась муфта. Нагрев муфты вел к ослаблению магнитных свойств и как следствие уменьшение момента на

выходном валу, помимо этого важно было не допустить перегрева обгонной муфты, условия эксплуатации которой не должны превышать 60°.

По результатам эксперимента выяснилось, что оптимальным является зазор в 1 мм, обеспечивающий необходимый момент, но при этом также не позволяющий сильно перегреваться всей системе. На рисунке 6, показано изменение температуры крыльчатки (как самого нагреваемого элемента) в зависимости от зазора.

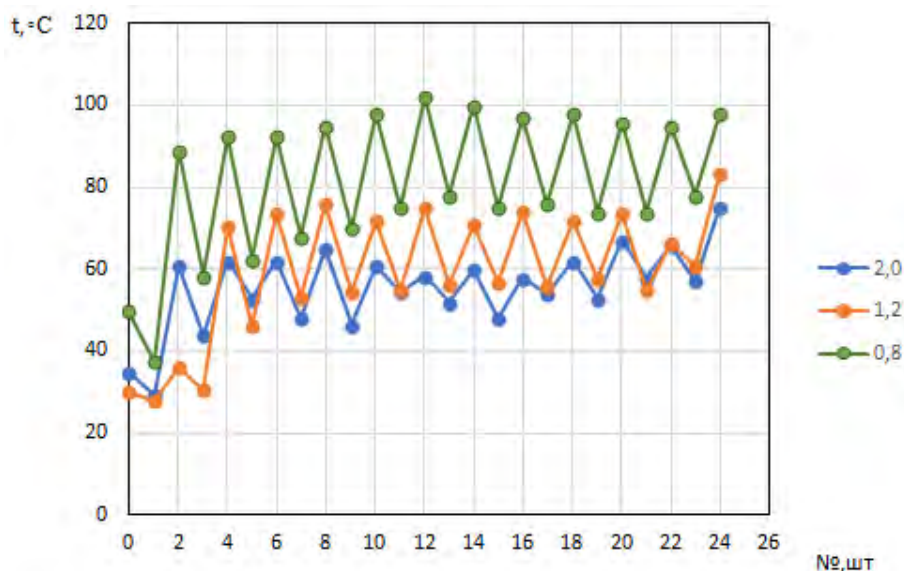


Рисунок 6 – Значение температуры крыльчатки при разных зазорах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suvorov, V.A., Bahrami, M.R., Sorokin, P.A. et al. Mathematical model and experimental study of a magnet coupling with a stop. SN Appl. Sci. 4, 286 (2022).
2. De la Barriere O, Hlioui S, Ben Ahmed H, Gabsi M, LoBue M (2012) 3-D formal resolution of Maxwell equations for the computation of the no-load flux in an axial flux permanent-magnet synchronous machine. IEEE Trans Magn 48(1):128–136.
3. Lubin T, Rezzoug A (2015) 3-D analytical model for axial-flux eddy-current couplings and brakes under steady-state conditions. IEEE Trans Magn 51(10):1–12.

O.A. Lapshina, I.I. Kozar
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

INFLUENCE OF THE GAP BETWEEN THE COPPER DISC AND THE DISK WITH PERMANENT MAGNETS ON THE TRANSMITTED TORQUE IN THE MAGNETIC COUPLING

Abstract

The paper presents the results of an experimental measurement of the moment on the output shaft of a magnetic coupling at different gaps, as well as a comparison of the results obtained with an analytical calculation. The aim of the work is to choose the optimal gap between a copper disk and a disk with permanent magnets. The objectives of the study are to develop a stand for the experiment, conduct a series of experiments based on changing the gap, and test the results of the experiment.

Keywords: Magnet coupling, torque, magnetic field, permanent magnets

Д.Д. Брусова, И.И. Козарь
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, dash.brusowa @ya.ru

СРАВНЕНИЕ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН РАЗНЫХ ФИРМ ДЛЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШЕСТЕРНИ ИЗ МАТЕРИАЛА 20Х3МВФА-Ш

Аннотация

В работе рассмотрены несколько аналогичных пластин разных фирм, производящих режущий инструмент. Для каждой из пластин расписаны режимы резания, указанные производителем, как наиболее благоприятные для работы. Далее представлена заготовка и указана обработка, которую необходимо было сделать каждой из выбранных пластин. Приведены результаты испытаний. Наибольшую стойкость показала пластина CNMG 120408-PP IC907 фирмы ISCAR, обработавшая 40 деталей при тех же режимах резания, что и конкурирующие фирмы.

Ключевые слова: заготовка, пластина, токарная обработка, стойкость

На производстве большую роль играет режущий инструмент, и необходимо, чтобы он был правильно подобран [1 - 11]. Целью данной работы является проведение испытаний, позволяющих оценить стойкость ряда пластин, что позволяет сделать необходимый выбор при назначении инструмента для обработки.

Заготовка представляет собой штамповку материала 20Х3МВФА-Ш. 20Х3МВФА-Ш – это высококачественная жаропрочная релаксационностойкая сталь перлитного класса. Рекомендуемая температура применения до 500-560 °С; Температура интенсивного окалинообразования 600 °С.

Данный материал используется для наиболее нагруженных деталей машин, зубчатых колес, крепежных изделий, работающих в условиях высокой температуры, и к которым предъявляются повышенные требования по твердости поверхности, высокой прочности на изгиб, а также вязкой и прочной сердцевины, устойчивой к воздействию циклических и ударных нагрузок, а также подвергаются поверхностному упрочнению путем цементации, азотирования или нитроцементации.

Основа данного металлического сплава – железо (Fe), его содержание в 20Х3МВФ должно быть не менее 93.2%. Обязательно в сплаве 20Х3МВФ присутствуют хром, ванадий, молибден, вольфрам, марганец, кремний и углерод. В таблице 1 указано допустимое количество примесей.

Твердость материала 240..280 НВ. Операции, выбранной для испытаний, предшествует лишь токарная операция, на которой заготовка обрабатывается по диаметру и с торца, чтобы обеспечить базу, от которой и будет производиться обработка при испытании пластин.

В таблице 2 собраны данные, относящиеся к испытаниям СМП – сменных многогранных пластин. Производилась получерновая токарная обработка наружных поверхностей детали. Испытания проводились на токарном обрабатывающем центре HYPERTURN 45 SM2Y с целью сравнения СМП разных фирм при одинаковых условиях обработки. В испытаниях участвовали пластины трёх различных фирм: LIKON (Китай), WALTER (Германия), ISCAR (Израиль).

Производители каждой из представленных пластин прописывают рекомендуемые режимы резания, они отражены в таблице ниже. Однако, изменение режимов резания приводит к изменению времени обработки, чтобы этого избежать, было решено испытывать все пластины при одинаковых режимах. Машинное время обработки одной детали каждой испытываемой пластиной, составляет 6 минут 10 секунд [12 - 14].

Таблица 1 – Химический состав сплава 20X3МВФ

Хим. элемент	% содержания
Железо (Fe)	От 93.2
Хром (Cr)	2.8-3.3
Ванадий (V)	0.6-0.85
Молибден (Mo)	0.35-0.5
Вольфрам (W)	0.3-0.5
Марганец (Mn)	0.25-0.5
Кремний (Si)	0.17-0.37
Углерод (C)	0.15-0.23
Никель (Ni)	До 0.3
Медь (Cu)	До 0.2
Фосфор (P)	До 0.03
Сера (S)	До 0.025

Таблица 2 – Данные об испытаниях пластин

Обрабатываемый материал				Твёрдость	
20X3МВФА-III				280 НВ	
Оборудование		$T_{\text{маш.}}$, мин	Обрабатываемые поверхности		
HYPERTURN 45 SM2Y		6м 10с	Получерновая наруж.		
Режимы резания	№ СМП	F , мм/об	V , м/мин	a_p , мм	
Рекомендуемые фирмой производителем	1	0.07-0.4	80-190	0.8-3.5	
	2	0.2-0.4	60-80	1.2-5	
	3	0.14-0.3	40-65	1-4	
Фактические	торец	0,1	45	0,775	
	наружа	0,12	45	0,826	
Тестируемые СМП	1	2	3		
	LIKON CNMG 120408 VEM 7025	WALTER CNMG 120408-RM5 WSM20	ISCAR CNMG 120408-PP IC907		
Стойкость, дет.	10	20	40		

На рисунке 1 представлен эскиз операции. На рисунке 2 изображены контур заготовки и контур получаемой на данной операции детали. Также указаны получаемые размеры.

Фотография пластины LIKON CNMG 120408 VEM 7025 после испытаний представлена на рисунке 3 [12].

CNMG 120408 - Тип (форма) пластины: С - ромбическая (80°). Длина режущей кромки: 12,9, диаметр вписанной окружности: $\varnothing 12,7$. Толщина пластины: 4,76 мм. Радиус при вершине: 0,8. Эти параметры у всех пластин, участвующих в испытаниях, одинаковые. Отличаются лишь сплав пластины и стружколом.

Сплав 7025 – предпочтителен для обработки нержавеющей стали и жаропрочных сплавов. Тип покрытия – PVD.

VEM – универсальный получистовой стружколом. Благодаря своей геометрии обеспечивает неравномерную нагрузку режущей кромки, что позволяет снизить вибрацию во время резания и обеспечить плавное врезание. Большая площадь базовой поверхности обеспечивает стабильное положение пластины в державке.

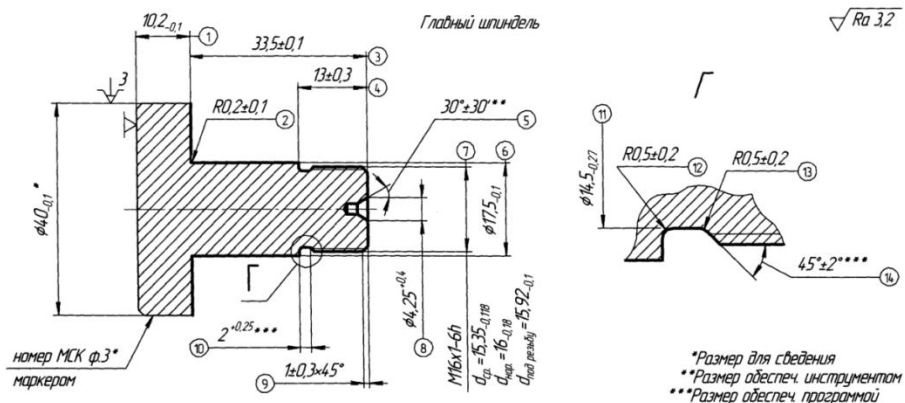


Рисунок 1 – Эскиз операции «Токарная с ЧПУ»

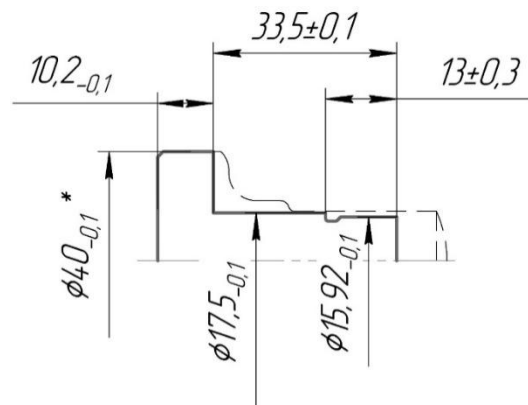


Рисунок 2 – Контуры заготовки и получаемой детали

Фотография пластины WALTER CNMG 120408-RM5 WSM20 после испытаний представлена на рисунке 4 [13].

WSM20 – Сплав для обработки нержавеющей и жаропрочных сталей. Тип покрытия – PVD. ($TiAlN+Al_2O_3$).

RM5 – Данная геометрия обеспечивает оптимальное охлаждение и максимальную производительность, геометрия режущих кромок минимизирует выкрашивание и кратерный износ, оптимизированное стружколомание за счёт специализированной геометрии, покрытие Tiger tec Silver с теплозащитным слоем PVD- Al_2O_3 для обеспечения максимальной стойкости.

Фотография пластины ISCAR CNMG 120408-PP IC907 после испытаний представлена на рисунке 5 [14].



Рисунок 3 – Фото пластины LIKON CNMG 120408 VEM 7025 после испытаний



Рисунок 4 – Фото пластины WALTER CNMG 120408-RM5 WSM20 после испытаний



Рисунок 5 – Фото пластины ISCAR CNMG 120408-PP IC907 после испытаний

IC907 – Твердый сплав с прочной субмикронной основой с PVD покрытием TiAlN. Сплав предназначен для токарной обработки жаропрочных сплавов на никелевой основе и аустенитной нержавеющей стали на низких и средних скоростях резания.

PP – Положительный передний угол, острая кромка для жаропрочных сплавов, нержавеющей стали, мягкой углеродистой стали и алюминиевых сплавов.

Исходя из испытаний, можно считать инструмент фирмы LIKON неконкурентоспособным в данных условиях. СМП фирмы ISCAR показали себя в разы лучше других.

Пластина фирмы LIKON такой геометрии в сочетании с используемым в испытании стружколомом и материалом, для подобной обработки закупать не рекомендуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.
2. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.
3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.
5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

6. Тебекин А.В., Сауренко Т.Н., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.

7. Гасюк Д.П., Ларькин В.В., Косова В.А., Романов А.А. Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 10-18.

8. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.

9. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.

10. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.

11. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

12. LIKON Инструментальный каталог 2022.: Изд-во ООО «ЛИКОН», 2022. 340 с.

13. WALTER Каталог новой продукции. Выпуск 2018-1, 2018. 440 с.

14. ISCAR Токарная обработка.: Изд-во ООО «Искар», 2020. 238 с.

D.D. Brusova, I.I. Kozar

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
dash.brusowa@ya.ru

COMPARISON OF SMP OF DIFFERENT FIRMS FOR TURNING THE OUTER SURFACE OF A GEAR MADE OF 20X3MVFA-H MATERIAL

Abstract

The paper considers several similar plates from different companies producing cutting tools. For each of the plates, the cutting modes specified by the manufacturer as the most favorable for operation are painted. The billet is presented below and the processing that had to be done for each of the selected plates is indicated. The test results are given. The greatest resistance was shown by the CNMG 120408-PP IC907 plate from ISCAR, which processed 40 parts under the same cutting conditions as competing firms.

Keywords: billet, plate, turning, durability

М. Шульга, Н.А. Беликова, И.И. Козарь, Т.А. Ларионова, Д.Н. Шабалин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, shulga.mariya@inbox.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ЦИФРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

В настоящей работе составлена управляющая программа (УП) для фрезерного станка с числовым программным управлением (ЧПУ), а также представлен расчёт всех необходимых параметров для ее написания. Основной целью работы является нахождение способа повышения эффективности фрезерной обработки. Для достижения поставленной цели предлагается использовать фрезерный станок с ЧПУ, для которого будет написана управляющая программа на примере детали «Диск». В результате работы будет представлен текст составленной программы для контурной обработки, обработки торцевой поверхности, а также сверления и цекования отверстий.

Ключевые слова: программирование станков с ЧПУ, технология машиностроения, цифровое оборудование.

Введение

В настоящее время от производителей требуется изготавливать продукцию с минимально затраченными ресурсами и временем, при которых качество выпускаемых изделий будет соответствовать заявленным требованиям. Данная закономерность определяется как эффективность производства [1 -9].

На данный момент для повышения эффективности на производстве используются специально спроектированная станочная оснастка, отработанные технологические процессы, а также рабочие с высоким уровнем квалификации.

Кроме того, все больше предприятий стараются уйти от использования традиционного универсального оборудования и перейти к автоматизации производства с использованием станков с ЧПУ [10, 11]. Данный вид станков позволяет снизить процент брака за счет правильно написанной УП, а также не требует затрат вспомогательного времени на подачу заготовки к станку, на установку, выверку и зажим заготовки, разжим и снятие детали, управление станком.

Данная работа будет состоять из теоретической части, в ходе которой написанная УП будет проверена в симуляторе станка с ЧПУ.

Методы

В работе использовались современная САПР программа КОМПАС-3D, а также программа-симулятор SSCNC стойка FANUC-0iM.

Результаты и обсуждение

Повысить эффективность производства за счет использования станков с ЧПУ можно при условии правильно назначенных параметров обработки, выбранного инструмента и безошибочно написанной программы [12]. При расчете и назначении

параметров обработки стоит учитывать возможные дефекты, а также реакции материалов при нагревании [13].

Для выбранной детали, чертеж которой показан на рисунке 1, определим технологические переходы: фрезерование плоскости, контурное фрезерование, фрезерование фаски, сверление отверстий, цекование, фрезерование сквозного ступенчатого отверстия.

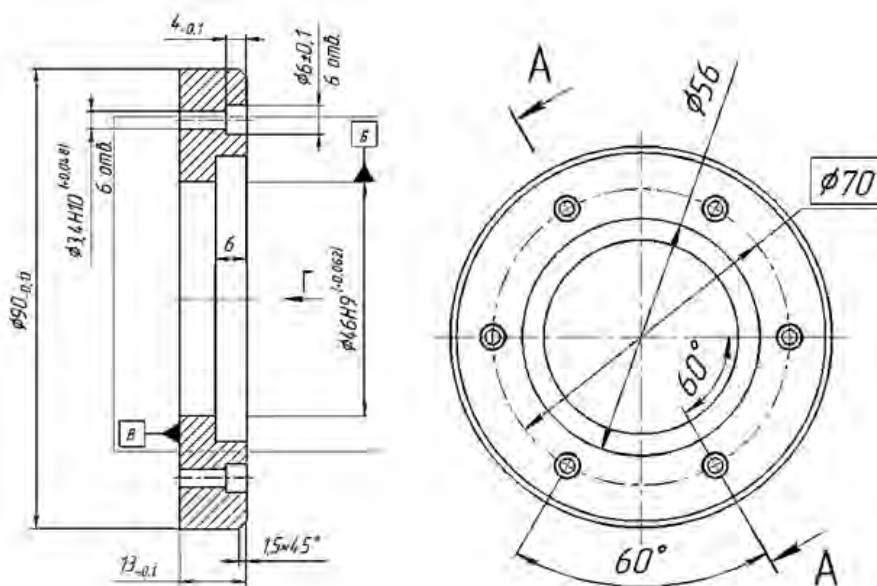


Рисунок 1 – эскиз детали

Для каждого перехода зададим инструмент, а также, согласно рекомендациям, назначим число зубьев фрезы и сверла z , скорость v , заданную в метрах в минуту (м/мин), и подачу s , определяемую как миллиметр на зуб фрезы (мм/зуб), рассчитаем по формуле 1 частоту вращения шпинделя n , измеряемую в оборотах в минуту (об/мин), и произведем перерасчет по формуле 2 подачи для определения минутной подачи F , (мм/мин). Полученные данные занесем в таблицу 1.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} \quad (1)$$

$$F = nS_z z \quad (2)$$

Таблица 1 – Параметры режущих инструментов

Инструмент в программе	Наименование	Параметры режима резания
T09	Торцевая фреза $\varnothing 62, z=5$	$n=637$ об/мин, $v=100$ м/мин, $F=478$ мм/мин
T02	Концевая фреза $\varnothing 20, z=4$	$n=796$ об/мин, $v=50$ м/мин, $F=159$ мм/мин
T11	Сверло $\varnothing 3.4, z=2$	$n=1404$ об/мин, $v=15$ м/мин, $F=281$ мм/мин
T01	Концевая фреза $\varnothing 6, z=2$	$n=1592$ об/мин, $v=50$ м/мин, $F=159$ мм/мин
T13	Фасочная фреза $\varnothing 20, z=14$	$n=796$ об/мин, $v=50$ м/мин, $F=557$ мм/мин
T06	Сверло $\varnothing 6, z=2$	$n=796$ об/мин, $v=15$ м/мин, $F=159$ мм/мин

На основе расчетных данных, руководствуясь основными терминами и правилами задания циклов и кодов, составим управляющую программу для фрезерования заданной детали [14, 15]. К аналогичным кадрам пояснения не задаются.

O0311 – наименование программы;
G0Z150; – быстрый отвод шпинделя на безопасное расстояние;
T9M6; – установка торцевой фрезы;
S638M3M8F478; – задание частоты вращения шпинделя, вращение шпинделя по часовой, включение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), задание подачи;
G0X-804Y23; – исходная точка для первого прохода;
G0Z3G43H9; – быстрый подвод фрезы, с учетом коррекции на длину фрезы;
G1Z0; – опускание фрезы на необходимую глубину;
G1X80; – рабочий ход фрезы;
G0Z3G43H9; – быстрый отвод фрезы;
G0X-80Y-23; – исходная точка для второго прохода;
G1Z0G43H9; – опускание фрезы на необходимую глубину с учетом корректора;
G1X80; – рабочий ход фрезы;
G0Z150; – быстрый отвод шпинделя на безопасное расстояние;
M5M9; – выключение вращения шпинделя, выключение СОЖ
T2M6; – установка концевой фрезы;
S796M3M8F159;
G0X-60Y0;
G0Z3G43H2;
G1Z-13.5;
G1X-55;
G3X55Y0I55J0; – кадр круговой интерполяции (контурная обработка);
G3X-55Y0I-55J0; – кадр круговой интерполяции (контурная обработка);
G0X-70;
G0Z150;
M5M9;
T13M6; – установка фасочной фрезы;
G0Z3G43H13;
G0X-54Y0;
S796M3M8F557;
G1Z-2G43H13;
G1X-51;
G3X51Y0I51J0; – кадр круговой интерполяции (фрезерование фаски);
G3X-51Y0I-51J0; – кадр круговой интерполяции (фрезерование фаски);
G0X-70;
G0Z150;
M5M9;
T11M6; – установка сверла диаметром 3,4 мм;
S1404M3M8F281;
G0X35Y0;
G0Z5G43H11;
G81Z-14P1000; – кадр, с которого начинается описание контура сверления шести отверстий глубиной 14 мм;

G68A0B0R300; – задание положения относительной системы координат с учетом поворота на угол 300 градусов;

G81Z-14P1000;

G68A0B0R240;

G81Z-14P1000;

G68A0B0R180;

G81Z-14P1000;

G68A0B0R120;

G81Z-14P1000;

G68A0B0R60;

G81Z-14P1000;

G69; – завершение цикла сверления;

G0Z150;

M5M9;

G80T1M6; – установка концевой фрезы для цекования отверстий;

S1592M3M8F159;

G0Y0X35;

G0Z5G43H1;

G81Z-4P1000; – начало цикла цекования отверстий на глубину 4 мм;

G68A0B0R300; – задание положения относительной системы координат с учетом поворота на угол 300 градусов;

G81Z-4P1000;

G68A0B0R240;

G81Z-4P1000;

G68A0B0R180;

G81Z-4P1000;

G68A0B0R120;

G81Z-4P1000;

G68A0B0R60;

G81Z-4P1000;

G69; – конец цикла цекования;

G0Z150;

M5M9;

G80T6M6; – установка сверла для засверливания;

S796M3M8F159;

G0Y0X-20;

G0Z5G43H6;

G81Z-15P1000; – засверливание на глубину 15 мм;

G0Z150;

M5M9;

G80T01M6; – установка концевой фрезы;

S1592M3M8F159;

G0Y0X-20;

G0Z3G43H12;

G1Z-15;

G3X20Y0I20J0; – фрезерование основного отверстия с помощью круговой интерполяции (первый проход);

G3X-20Y0I-20J0; – фрезерование основного отверстия с помощью круговой интерполяции (второй проход);

G0Z150;

M5M9;

T2M6; – вызов концевой фрезы;

S796M3M8F159;

G0X-10Y0;

G0Z3G43H2;

G1Z-6;

G1X-18;

G3X18Y0I18J0; – фрезерование ступеньки у основного отверстия (первый проход)

G3X-18Y0I-18J0; – фрезерование ступеньки у основного отверстия (второй проход)

G1X10;

G0Z150;

M5M9;

M2 – конец всей программы.

Правильность написанной программы проверена в симуляторе, модель полученной детали представлена на рисунке 2. Стоит учесть, что дна, а также выпирающей цилиндрической части у основного отверстия не будет после обработки второго торца заготовки.

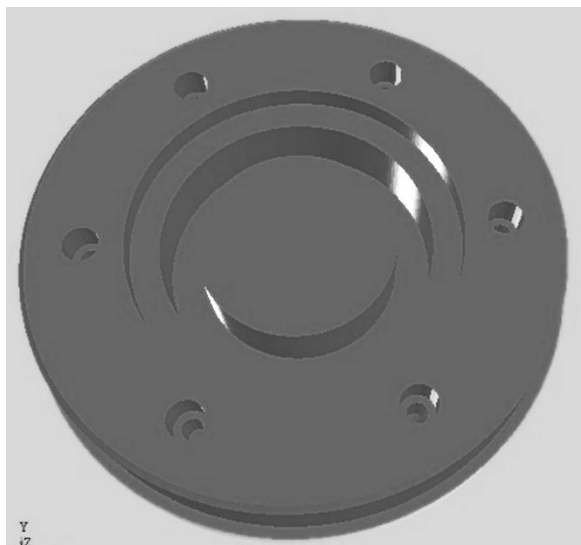


Рисунок 2 – Модель полученной детали

Заключение

Разработанная и представленная в данной работе управляющая программа позволит сократить вспомогательное время, позволит производить операции любой сложности рабочим с невысокими квалификациями, а также снижает процент брака. Всё это позволяет повысить эффективность машиностроительных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных

условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

2. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.

3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

6. Тебекин А.В., Сауренко Т.Н., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.

7. Гасюк Д.П., Ларькин В.В., Косова В.А., Романов А.А. Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 10-18.

8. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.

9. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

10. Степанов С. Н., Видинеева Н. Ю., Степанов С. С. Оборудование машиностроительных производств: учеб. пособие - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017.

11. Хрусталева И. Н., Любомудров С. А., Романов П. И. Автоматизация технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. Том 24, №1, 2018.

12. Хрусталева И. Н., Шабалин Д. Н., Четвериков И. А., Бровкина Я. Ю. Программирование станков с числовым программным управлением: учеб. пособие. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021.

13. Terplukhin, V.G., Tsvetkov, A.S., Popov, A.I., Shabalin, D.N. Carbide formation in the niobium-microalloyed 15KH2Mfa steel during heat treatment. AIP Conference Proceedings this link is disabled, 2020, 2315, 040045.

14. ГОСТ 20523-80*. Устройства числового программного управления станками. - М.: Издательство стандартов, 1988.

15. ГОСТ 23597-79. Станки металлорежущие с числовым программным управлением. Обозначение осей координат и направлений движений.- М.: Издательство стандартов, 1993.

M. Shulga, N.A. Belikova, T.A. Larionova, I.I. Kozar, D.N. Shabalin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, shulga.mariya@inbox.ru

INCREASING THE EFFICIENCY OF MILLING OPERATION BY USING MODERN DIGITAL EQUIPMENT

Abstract

This article has compiled a control program (NC) for a milling machine with numerical control (CNC), and also presents the calculation of all the necessary parameters for writing it. The main purpose of the work is to find a way to improve the efficiency of milling. To achieve this goal, it is proposed to use a CNC milling machine, for which a control program will be written using the example of the “Disk” part. As a result of the work, the text of the compiled program for contouring, end surface processing, as well as drilling and countersinking of holes will be presented.

Keywords: CNC machine tool programming, mechanical engineering technology, digital equipment.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.09

В.Р. Хабиров
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия, khabirovvr@bmstu.student.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ФРЕЗЕРНОМ СТАНКЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация

В работе описан способ повышения точности позиционирования заготовки на фрезерном станке с помощью технологий машинного зрения. Приведено описание эксперимента по определению точности позиционирования рабочего органа станка в центре существующего отверстия. Выявлена зависимость точности от разрешения изображения.

Ключевые слова: фрезерный станок, машинное зрение, позиционирование заготовки.

Введение

Один из способов повышения производительности изготовления детали — это снижение вспомогательного времени за счет автоматизации процесса позиционирования детали в системе ЧПУ. Для реализации автоматизации позиционирования разработан программно-аппаратный комплекс [1] с использованием технологий машинного зрения [2]. Данный комплекс установлен на порталный фрезерный станок под управлением LinuxCNC, технические характеристики используемого станка представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики используемого станка

Рабочая зона по осям X/Y/Z, мм	1150x850x150
Максимальная скорость по осям, м/мин	4
Дискретность, мм	0,002
Повторяемость, мм	0,05
Мощность шпинделя, кВт	2,2
Максимальная частота вращения шпинделя, об/мин	24 000

Методы

Эксперимент проведен с помощью программно-аппаратного комплекса, разработанного на языке Python с использованием библиотек: OpenCV, NumPy, PyQt. Захват изображения осуществляется с помощью камеры с разрешением 2 Мпикс и возможностью ручной регулировки фокуса.

Область рабочего поля захватывается с помощью камеры [3]. После чего переводится в одноканальное изображение с помощью функции `cv2.cvtColor` [4] и с помощью детектора границ `cv2.canny` выделяются зоны с разной яркостью на изображении, затем полученное изображение передается в функцию `cv2.findContours`, где преобразуется в список контуров. Контур представляет собой определенную последовательность точек, представленных в виде координат. Полученные контуры проверяем на соответствие формы окружности с помощью самостоятельно разработанной функции. В данной функции рассчитывается расстояние между противоположными точками, затем данное расстояние сверяется со средним арифметическим значением расстояния для данного контура. В случае отклонения не более чем на заранее выбранное значение контур считается окружностью. После чего используя функцию `cv2.minEnclosingCircle` определяется координаты центра и радиус окружности.

При позиционировании рабочего органа в центре отверстия, на предварительно закрепленной заготовке происходит по следующему алгоритму: изображение рабочей зоны захватывается камерой и обрабатывается с помощью программы, описанной выше, затем формируется команда в формате ISO 7-bit, которая передается в СЧПУ станка и рабочий орган первично подводится к центру отверстия. Для минимизации влияния искажений объектива камеры проводится повторный подвод рабочего органа по алгоритму аналогичному первичному позиционированию.

Для повышения точности определения координат центра окружности предлагается изменение алгоритмов распознавания окружностей на изображении [5] или повышение разрешения захватываемого изображения. В данной статье описывается исследование зависимости точности определения координат окружности от разрешения захватываемого изображения. Используемая камера имеет четыре доступных разрешения. Для определения точности распознавания координат окружности, после проведения калибровки системы, рабочий орган позиционируется в центре только что просверленного отверстия, обнуляются координаты. Отводя рабочий орган в случайную сторону на расстояние около 30 мм, проводится повторное распознавание отверстия и позиционирование рабочего органа в его центре. Повторяя данные действия не менее 50 раз, для каждого доступного разрешения камеры получаем координаты отверстия.

Результаты и обсуждение

После обработки полученных результатов строим диаграмму распределения полученных координат отверстия для каждого разрешения. Диаграммы изображены на рисунке 1. Полученные погрешности для каждого из разрешений представлены в таблице 2. Также для определения целесообразности применения того или иного разрешения проведем замер времени обработки изображения. Замер времени будет осуществляться с помощью внутренних часов материнской платы.

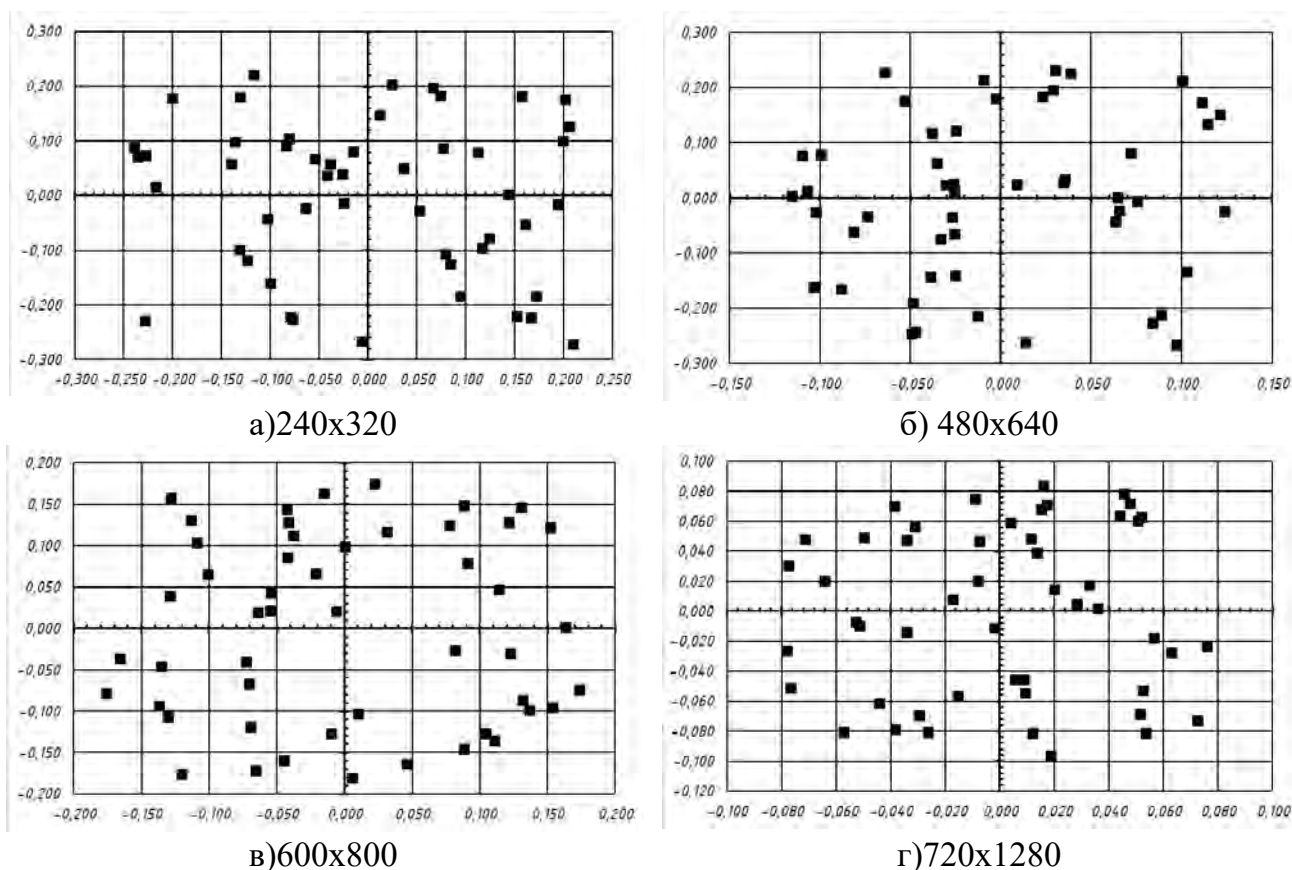


Рисунок 1 – Результаты эксперимента по определению точности определения координат отверстия

Таблица 2 – Обработанные результаты эксперимента

Разрешение, пикс	Разброс значений, мм	Погрешность при N=50, P=95%, мм	Время определения окружностей, мс
240x320	0,47	0,044	126
480x640	0,39	0,038	154
600x800	0,35	0,033	179
720x1280	0,17	0,025	203

Заключение

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что погрешность распознавания координат окружностей на изображении имеет обратную зависимость с разрешением данного изображения. Следовательно, применение большего разрешения позволяет повысить точность распознавания центров окружностей. Для данной комбинации оборудования: станок и камера, - целесообразно применение максимально допустимого разрешения, так как время, затраченное на распознавание окружностей, не превышает 250 мс плюс время на подвод рабочего органа, что значительно быстрее позиционирования рабочего органа в ручном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурашко, Ф. В. Сканирование контуров заготовок плоских материалов с применением комплекса машинного зрения / Ф. В. Мурашко, Е. А. Рыжкова, О. М. Власенко // Дизайн и технологии. - 2016. - № 52(94). - С. 94-100.

2. Machine Vision and Applications: Wen-Pei Sung, Jimmy (C.M.) Kao and Ran Chen - Applied Mechanics and Materials (Volumes 457-458) - 2013

3. Machine Vision: Ramesh Jain, Rangachar Kasturi, Brian G. Schunck. - McGraw-Hill, 1995. - 549 с.

4. Библиотека OpenCV 3.2.0 URL: <https://docs.opencv.org/3.2.0/index.html> (дата обращения: 04.09.2022).

5. Кротова, Н. А. Определение геометрических параметров и ориентации заготовки на станке с применением алгоритмов технического зрения / Н. А. Кротова, Р. Л. Пушков // Вестник МГТУ Станкин. - 2021. - № 2(57). - С. 8-12.

V.R. Khabirov

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia, khabirovvr@bmstu.student.ru

INCREASING THE POSITIONING ACCURACY OF THE WORKPIECE ON THE MILLING MACHINE BY USING MACHINE VISION TECHNOLOGY

Abstract

This paper describes a method of improving the positioning accuracy of a workpiece on a milling machine by using machine vision technology. A method using a higher resolution captured image is considered. An experiment to determine the accuracy of determining the coordinates of existing holes on the workpiece is described. Dependence of accuracy on image resolution is revealed.

Keywords: milling machine, machine vision, workpiece positioning.

REVISE: ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ НА СВЕРХБОЛЬШИХ СЕТКАХ

Аннотация

Описывается система ReVisE, предназначенная для интерактивной визуализации результатов предсказательного моделирования в задачах механики сплошной среды на сверхбольших сетках (порядка $10^9 - 10^{10}$ узлов). К ключевым особенностям системы, обусловленным спецификой задачи, относятся использование специализированного формата хранения разреженного набора данных, необходимого для визуализации; построение системы визуализации в виде клиент-серверной архитектуры, что позволяет разместить сервер рендеринга на высокопроизводительном кластере, а на машине конечного пользователя оставить лишь легковесное клиентское приложение. Благодаря этому ReVisE способен выполнять визуализацию решений на сетках до 10^9 узлов с частотой до 20 кадров в секунду (FPS).

Ключевые слова: Система визуализации, октодереву, рендеринг.

Введение

Современные суперкомпьютеры эффективно используются для численного моделирования сложных задач в таких областях, как аэродинамика, гидродинамика, течение нефти через пористые среды и многие другие. Вычислительные сетки (далее просто сетки), используемые в этих задачах, могут достигать больших размеров, например, $10^8 - 10^{10}$ узлов. Результаты такого моделирования содержат чрезвычайно большой объем данных, особенно в случае нестационарных задач, поскольку время добавляет еще одно измерение.

Визуализация таких решений представляется нетривиальной задачей, требующей создания специализированных методов. Непосредственная генерация трехмерных текстур из результатов моделирования, в общем случае, неэффективна. Данные одного кадра решения могут занимать десятки гигабайт (Гб), что исключает возможность их рендеринга с приемлемой для визуализации в реальном времени скоростью. Кроме этого, полный объем данных может быть просто недоступен: зачастую, значения полей в узлах вычислительной сетки при решении задач особо большой размерности не сохраняются на диске ввиду экстремально большого объема данных и незначительной необходимости в них для последующего анализа. Сохраняются лишь заранее заказанные интегральные характеристики и решения в областях, представляющих наибольший интерес. В таких случаях оказывается актуальной in-situ визуализация [1,2], когда необходимые изображения и анимации генерируются непосредственно на стадии решения, когда еще доступен полный объем данных.

В настоящей статье авторы представляют систему интерактивной визуализации с открытым кодом ReVisE, доступную по адресу <https://github.com/deadmorous/revise>. Интерактивность предполагает возможность для пользователя переключать тип отображаемого поля, менять уровень изоповерхности, выполнять в реальном времени pan-zoom-rotate, менять масштаб деформаций и переключаться на другой временной слой при визуализации нестационарных решений. Цель создания новой системы визуализации – преодолеть ограничения, существующие в современных широко распространенных комплексах. Последние, как правило, обеспечивают действительно интерактивную визуализацию с приемлемой частотой кадров для сравнительно небольших объемов данных (порядка 10^6 узлов).

Из существующих комплексов, в первую очередь, следует отметить Kitware ParaView [3]. Эта свободно распространяемая система разработана для визуализации с поддержкой распределенной обработки данных. Она может быть развернута как на суперкомпьютерах, так и ПК. В первом случае серверная часть использует всю мощь суперкомпьютера для рендеринга, тогда как на компьютере пользователя установлен лишь клиент для управления.

NVIDIA IndeX – еще один фреймворк для удаленной визуализации. Он использует вычислительные возможности графических процессоров для обработки больших данных. NVIDIA IndeX предназначена для визуализации в реальном времени и может работать в кластере с ускорением на GPU. Кроме того, разработан специализированный плагин к ParaView, повышающий производительность визуализации для больших наборов данных. Утверждается, что фреймворк обладает хорошей масштабируемостью на узлах с GPU-ускорителями.

Комплекс визуализации Sight [4] разработан в Окриджской национальной лаборатории (ORNL) и развернут в системах Oak Ridge Leadership Computing Facility (OLCF) (<https://www.olcf.ornl.gov/olcf-resources/rd-project/sight/>). Sight используется для нужд пользователей проектов OLCF и предназначен для визуализации больших систем, состоящих из частиц. Он построен на клиент-серверной архитектуре, поэтому сервер рендеринга находится в кластере HPC, а на стороне пользователя находится только веб-клиент. Сервер рендеринга поддерживает рендеринг как на процессорах с OSPRay, так и на графических процессорах с бэкендами NVIDIA OptiX.

Методы

Архитектура приложения

В общем случае модули системы ReVisE могут быть развернуты на трех различных машинах. Это:

- хранилище данных (data host);
- сервер визуализации (visualization server);
- устройство пользователя (user device);

В хранилище данных выполняет работу препроцессор. Препроцессор не участвует непосредственно в визуализации, но является важной частью комплекса. Его задача – конвертация исходных данных в формат, используемый сервером визуализации. Специализированный иерархический формат хранения данных для визуализации, разработанный авторами – ключевая технология программного комплекса. Эта технология называется Sparse 3D mirroring (s3dmm) и описана в работе [5]. Таким образом, препроцессор генерирует данные в формате s3dmm и распределяет их по узлам кластера, на котором запущен сервер визуализации.

Сервер визуализации – основная и наиболее сложная часть комплекса. Он состоит из контроллера визуализации и службы видеопотока (video streaming service). Контроллер выполняет непосредственный рендеринг кадра на основании настроек, поступивших от пользователя через клиент (матрица преобразования, тип поля, уровень изоповерхности и прочие настройки). Готовый кадр сохраняется в общую память, откуда берется службой видеопотока и отправляется клиенту. В настоящей реализации служба видеопотока передает видеопоток в виде последовательности кадров JPEG с использованием Веб сокетов.

Контроллер визуализации выполняет параллельный рендеринг кадра. Современная реализация позволяет выполнять рендеринг на SMP машинах с использованием одного или нескольких GPU и CPU. Параллелизм рендеринга основан на распараллеливании данных. Исходные данные кадра в формате s3dmm определены в узлах структурированной параллелепипедальной сетки, разбитой на блоки. Это подсказывает естественный вариант параллелизма по данным, когда каждый поток исполнения выполняет рендеринг на одном или нескольких блоках с последующей сшивкой (в основном это блендинг цветов пикселей). Распределение нагрузки между потоками исполнения обеспечивается предварительным созданием графа заданий (task graph). Этот граф генерируется на основании анализа структуры s3dmm-куба. В соответствии со структурой графа выполняется назначение потокам исполнения задач рендеринга или блендинга конкретных блоков. Более подробно рендеринг в ReVisE описан в работах [6,7].

Сервер визуализации создает контроллер визуализации со своим блоком общей памяти для каждого подключения клиента. Клиент при подключении получает идентификатор контроллера, по которому служба видеопотока выбирает соответствующий блок общей памяти.

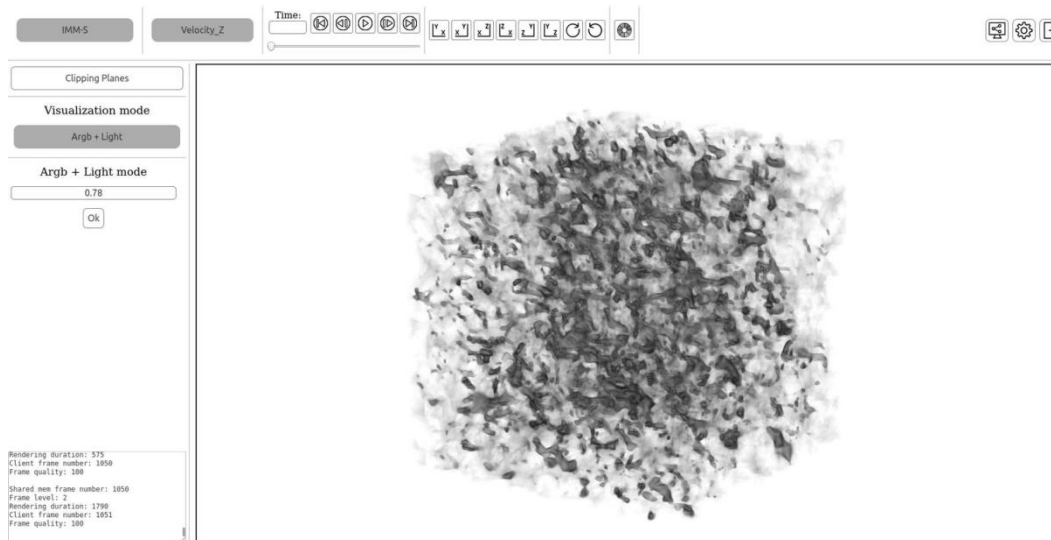


Рисунок 1 – Внешний вид Веб-интерфейса ReVisE

Устройство пользователя поддерживает веб-клиент для взаимодействия с сервером визуализации, доступный непосредственно в браузере. Внешний вид страницы веб-клиента представлен на рисунке 1. Клиент воспринимает ввод пользователя и преобразует его в команды специального протокола, которые передаются контроллеру визуализации. Последний, в соответствии с полученными настройками, генерирует кадры и размещает их в общей памяти на сервере. Служба

видеопотока в push режиме отправляет кадры клиенту. Никаких вычислений на стороне клиента не выполняется, что позволяет использовать для просмотра и управления слабые компьютеры, в частности, мобильные устройства.

Специализированный формат данных

Так как производительность системы визуализации существенно зависит от способа представления исходных данных, командой авторов была разработана специализированная схема их хранения Sparse 3D Mirmapping (s3dmm), основы которой изложены в работе [5]. Эта схема удовлетворяет таким важным требованиям, как быстрый доступ к необходимому блоку данных и иерархичность. Последнее означает, что существует представление одних и тех же полей с разной степенью детализации.

Данные для визуализации хранятся в виде разреженных сеток, достаточных для повторения особенностей исходной сетки и, в то же время, занимающих существенно меньший объем. В процессе рендеринга данные, определенные на разреженных сетках, преобразуются в «плотные» трехмерные текстуры. Для достижения этой цели было введено понятие метаданных визуализации. Метаданные состоят из октодеревя, параметра глубины блока d и уровня структуры. Блок – это поддереву октодеревя, состоящее из узла-корня и всех его потомков до глубины d включительно. Метаданные уровня L состоят из блоков, чьи корни отстоят на дистанцию L от корня дерева. Таким образом, уровень 0 состоит из одного блока, чей корень совпадает с корнем октодеревя. Уровень 1 состоит из 8 блоков и так далее. Такая организация структуры данных позволяет естественным образом организовать параллельный рендеринг кадра.

Важнейшей частью структуры данных визуализации s3dmm является октодереву, описывающее пространственное распределение плотности исходной сетки. Сами узлы октодеревя не хранят данные, октодереву используется только для построения иерархии разреженных сеток, на которых, в свою очередь, определены скалярные поля набора данных визуализации.

Построение октодеревя и интерполяция значений полей выполняется на стадии препроцессинга. Препроцессинг состоит из пяти этапов: (1) вычисление ограничивающего параллелепипеда, содержащего всю исходную сетку; (2) генерация октодеревя в каждой подобласти; (3) интерполяция скалярных полей в каждой подобласти; (4) объединение всех октодеревьев в одно; и (5) объединение скалярных полей таким образом, чтобы они были определены на разреженных сетках, индуцированных глобальным октодеревом. Препроцессор ReVisE в настоящее время выполняет первые три этапа. Технология сращивания октодеревьев также разработана и описана в [5], но требует программной реализации. Для объединения компонент октодеревя существует ряд алгоритмов, но ни один из них не подошел для нашего случая из-за необходимости выполнять объединение сжатых октодеревьев. В связи с этим был разработан собственный алгоритм объединения октодеревьев, описанный в [5].

Результаты и обсуждение

Система ReVisE была протестирована на трёх аппаратных конфигурациях, каждая из которых состояла из одного вычислительного узла. Это:

1. NVIDIA DGX-1, 2 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2698 v4 @ 2.20GHz (20 cores), 512 GB RAM, 8 V100-SXM2 GPUs (16 GB memory, 5120 CUDA cores per GPU).

2. Вычислительный узел: 2 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v4 @ 2.20GHz (12 cores), 128 Gb RAM, 2 Tesla V100-PCIe GPUs (32 GB memory, 5120 CUDA cores per GPU), Intel Optane 960.

3. Настольный ПК, Intel Core i7-8700 CPU @ 3.20GHz (6 cores), 16 GB RAM, 1 GeForce 1060 GPU (6 GB memory, 1280 CUDA cores).

В первых двух случаях на указанной машине устанавливался только сервер визуализации, а пользователь получал к нему доступ с удаленного компьютера. В последнем случае сервер был развернут локально.

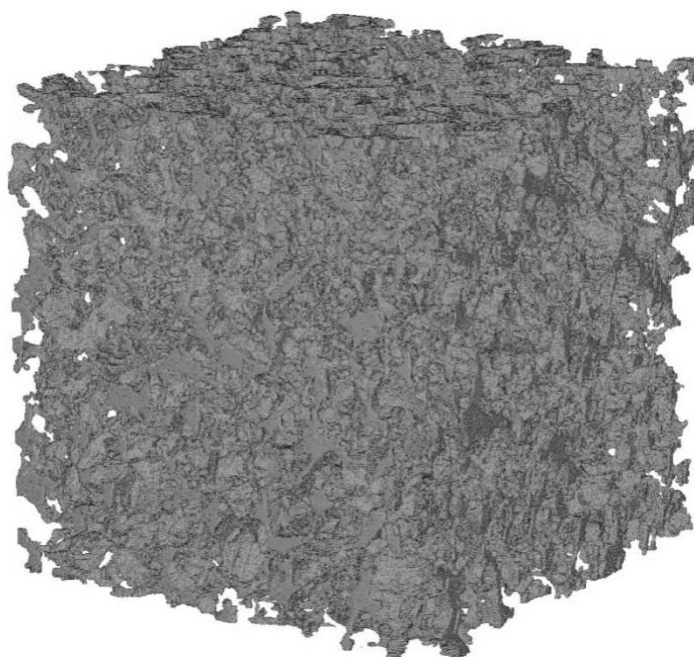


Рисунок 2 – Внешний вид расчетной области в задаче фильтрации. Пример визуализации в ReVisE.

Наибольший интерес для оценки масштабируемости системы представляет первая машина (DGX-1), так как она содержит 8 графических ускорителей. Тест масштабируемости на ней был проведен для случая визуализации результатов расчетов в задаче фильтрации в пористой среде. Внешний вид вычислительной области представлен на рисунке 2. Исходный набор данных определен на расчетной сетке размера $702 \times 702 \times 702$ ячеек. Он был преобразован в октодереву $s3dmm$, содержащее 3 уровня, глубина блока 8 ($d=8$). Уровни октодеревы нумеруются 0, 1, 2, параметры уровней приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры уровней октодеревы

Уровень	Число блоков	Число узлов
0	1	$2,53 \cdot 10^6$
1	8	$1,27 \cdot 10^7$
2	64	$7,08 \cdot 10^7$

Была протестирована масштабируемость рендеринга в режиме генерации изоповерхностей. Для повышения вычислительной сложности в каждом кадре генерировалось по 20 изоповерхностей различных уровней. Такое большое число

изоповерхностей приводило к увеличению времени рендеринга, что уменьшало влияние случайных флуктуаций на измерения. Система была настроена таким образом, что каждый поток исполнения задачи рендеринга выполнялся на отдельном GPU. Результаты измерения времени рендеринга представлены на Рисунке 3(а). Как и следовало ожидать, результаты рендеринга на уровне 0 не зависят от числа GPU, так как этот уровень состоит из одного блока и никакого параллельного исполнения в этом случае нет. Во всех остальных случаях параллельный рендеринг имеет эффект и для всех уровней время генерации кадра может быть сделано менее 0,2с.

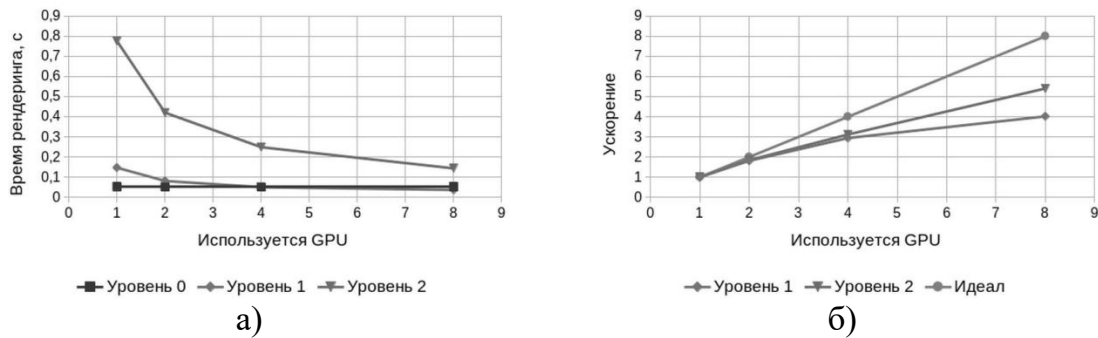


Рисунок 3 – Результаты измерений скорости генерации изоповерхностей:
 а) Зависимость времени рендеринга от числа GPU; б) Ускорение, достигаемое за счет увеличения числа GPU (потоков исполнения).

Результаты с Рисунка 3(а) также представлены на Рисунке 3(б) как ускорение рендеринга относительно последовательного выполнения, что демонстрирует масштабируемость вычислений.

Из приведенных результатов видно, что ReVisE позволяет добиться интерактивной визуализации для моделей рассмотренного размера. Из графика 3(а) следует, что при использовании всех 8 потоков исполнения скорость рендеринга во всех случаях не менее 5–7 FPS. В условиях реальной работы она может быть еще выше, благодаря прогрессивному рендерингу и тому факту, что в действительности число изоповерхностей существенно меньше 20.

Более подробные исследования производительности и качества изображения в ReVisE можно найти в работе [7]. Особое внимание в этой работе уделено сравнению производительности ReVisE и ParaView. Из него следует, что ReVisE может существенно превосходить ParaView в скорости воспроизведения анимации. Это достигается за счет использования формата s3dmm: скорость чтения данных в ReVisE оказывается существенно выше, тогда как непосредственно рендеринг в ParaView представляется весьма эффективным.

Заключение

Описанная в работе система интерактивной визуализации позволяет эффективно отображать результаты моделирования на больших расчетных сетках. Применение специализированного формата хранения данных s3dmm, параллельного рендеринга, прогрессивного рендеринга обеспечивают частоту кадров, достаточную для интерактивной работы с моделью. Возможность размещения сервера визуализации на удаленном компьютере позволяет использовать для рендеринга высокопроизводительные машины, тогда как пользователю для работы достаточно лишь браузера.

Впрочем, настоящую работу еще нельзя считать законченной. Возможные направления развития – это генерация s3dmm данных непосредственно в процессе моделирования (in-situ визуализация), рендеринг, распределенный между узлами, реализация сращивания октодеревьев для случая особо больших моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Childs, H. In Situ Visualization for Computational Science / H. Childs, J. Bennett, C. Garth and B. Hentschel. // IEEE Computer Graphics and Applications. - 2019. - V. 39. - № 6. - P. 76-85.
2. Ohno, N. In-situ visualization library for Yin-Yang grid simulations / N. Ohno, A. Kageyama. // Earth Planets Space. - 2021. - V. 73. - № 158.
3. Ahrens, J. ParaView: An End-User Tool for Large-Data Visualization. / J. Ahrens, B. Geveci, C. Law. // In: The Visualization Handbook. Editor(s): Charles D. Hansen, Chris R. Johnson. - Butterworth-Heinemann. - 2005. - P. 717-731.
4. Hernandez, B. Sight: Exploratory Visualization of Particle Data / B. Hernandez. // In: Conference: Oak Ridge Leadership Computing Facility Users Meeting. - 2017.
5. Orlov, S. Core algorithms of sparse 3D mipmapping visualization technology / S. Orlov, A. Kuzin, A. Zhuravlev. // In: Supercomputing. RuSCDays 2020. Editor(s): Voevodin V., Sobolev S. Communications in Computer and Information Science. - Springer, Cham. - 2020. -V. 1331. - P. 413–424.
6. Orlov, S. System for the Visualization of Meshes of Big Size Obtained from Gas-Dynamic Simulations / S. Orlov, A. Kuzin, A. Zhuravlev, V. Reshetnikov, V. Kiev, E. Usik, A. Pyatlin. // In: Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Editor(s): Sokolinsky, L., Zymbler, M. Communications in Computer and Information Science. - Springer, Cham. - 2021. - V. 1437. - P. 270-283.
7. Orlov, S. ReVisE: Remote visualization environment for large numerical simulation datasets / S. Orlov, A. Kuzin, A. Zhuravlev, V. Reshetnikov, E. Usik, V. Kiev, A. Pyatlin. // PLoS ONE. - 2021. - V. 16(7).

A. K. Kuzin¹, S. G. Orlov²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, kuzin_aleksei@mail.ru

²ООО «Integrity Solutions», St. Petersburg, Russia

REVISE: INTERACTIVE VISUALIZATION SYSTEM OF NUMERICAL SOLUTIONS OF NONSTATIONARY PROBLEMS ON EXTRA-LARGE GRIDS

Abstract

ReVisE system is described, which is designed for interactive visualization of the results of predictive modeling in problems of continuum mechanics on extra-large meshes (of the order of 10^9 – 10^{10} nodes). The key features of the system, due to the specifics of the task, include the use of a specialized storage format for a sparse data set required for visualization; building a visualization system in the form of a client-server architecture, which allows to place the rendering server on a high-performance cluster, and leaving only a lightweight client application on the end user's machine. Because of this, ReVisE can render simulation results on meshes up to 10^9 nodes at up to 20 frames per second (FPS).

Keywords: visualization system, octree, rendering.

В.В. Ларькин, В.Л. Хрулев, М.Л. Бегунов, Д.Г. Шахов, В.В. Шиль
Михайловская военная артиллерийская академия,
Санкт-Петербург, Россия , valentin_larkin@mail.ru

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОСТИ ПАРКА ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ ТЕХНИКИ В МАТЕРИАЛАХ, КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЯХ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЯХ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ПРОАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация

В данной статье разработана методика определения потребности парка эксплуатируемой техники в материалах, комплектующих изделиях и запасных частях на основе внедрения проактивной системы технического обслуживания и ремонта сложной технической системы. Данная методика объединяет с одной стороны, структуру ремонтного цикла (регламенты и периодичность ремонтных работ), нормативы расхода ЗИП, и, с другой стороны, мониторинг выработки ресурса и интенсивности эксплуатации в режиме реального времени для каждого объекта техники.

Ключевые слова: проактивное техническое обслуживание и ремонт, сложная техническая система, интегрированная логистическая поддержка, запасные части и принадлежности.

Введение

Создание запасов ЗИП, предназначенных для восстановления образцов СТС в процессе применения по прямому назначению является одной из основных подцелей первого уровня квантификации основной цели функционирования СЭ. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что вопросы обоснования, как номенклатурного состава, так и эшелонирования запасов ЗИП нельзя считать исследованными исчерпывающим образом.

Это подтверждается, с одной стороны, явно неудовлетворительным уровнем эффективности расходования финансовых средств, выделяемых на заказы ВТИ в силу отсутствия приемлемых для практики формализованных методов строгого обоснования потребностей. С другой стороны, известные теоретические методы решения указанных задач либо базируются на частных подходах к проблеме, либо обеспечивают лишь принципиальную возможность их решения без учета реальной трудоемкости формирования потребных массивов исходных данных [1 - 3].

Устранить существующие недостатки можно только на основе разработки единого системного подхода, который позволял бы учесть взаимообусловленность характера и интенсивности получения повреждений образцов СТС, задач, стоящих перед ремонтными органами, их технических и производственных возможностей в современной экономической и политической обстановке [4 - 13]. Поэтому при выполнении настоящей работы полагалось, что формирование комплекта ЗИП является подчиненной задачей по отношению к задаче организации восстановления работоспособности СТС. Комплект ЗИП функционирует в системе восстановления

как элемент. Следовательно, его параметры должны соответствовать двум основным группам требований [14 - 21].

- требованиям по соответствию внутренней структуре системы восстановления;
- требованиям по соответствию внешним условиям, в которых функционирует система восстановления.

При решении данной задачи обеспечение этих требований рассматривалось как необходимое условие.

Первая группа требований формально может быть описана на основании анализа:

- технологических возможностей ремонтных органов;
- особенностей конструкции образца СТС;
- эшелонирования ремонтных органов всех уровней.

Вторая группа требований формируется на основе анализа:

- допустимой длительности восстановления образца РАВ;
- характера повреждений элементов СТС.

Остановимся на проблеме планирования производственной программы по выпуску запчастей и комплектующих для эксплуатируемых СТС и для вывода расчета введем следующие обозначения:

k - номер вида объекта эксплуатации;

j - номер работы ремонтного цикла;

i - номер вида МКЗ, необходимых для проведения у j -й работы ремонтного цикла;

l_k - интенсивность эксплуатации k -го вида продукта;

P_k - назначенный эксплуатационный ресурс k -го вида продукта;

P_k^H - наработанный эксплуатационный ресурс k -го вида продукта;

b_{ij} - расход ЗИП i -го вида для проведения ремонтных работ j -го вида по нормативу (регламентируемый структурой ТООР);

$a_{1k}^{P_k^H}$ - количество продуктов k -го вида с наработанным эксплуатационным ресурсом P_k^H и интенсивностью эксплуатации l_k .

Методы

Выделение логических блоков и исследование потоков информации между ними позволяет оценить все связи в схеме (в том числе иерархические), а упорядочение связей между блоками (элементами, свойствами) обеспечивает последовательное выполнение главной задачи исследования. Конкретизация этих общих положений системного анализа в интересах рассматриваемой задачи дает основание утверждать, что в качестве исходных данных для решения поставленной задачи целесообразно рассматривать два основных начальных блока:

- первый блок – подготовка исходных данных для обоснования номенклатуры элементов ЗИП;

- второй блок – подготовка исходных данных для определения количества ЗИП для различных комплектов.

Результаты и обсуждение

Особенность СЭ, как сложной системы, является однозначно выраженная иерархичность и четко отслеживаемая целостность ее структуры. Это заключается в том, что изменения хотя бы в одной из подсистем неизбежно влечет за собой

изменения в функционировании связанных с ней других подсистем. Поэтому целевая направленность рассмотрения отдельных блоков заключается в следующем.

Первый блок позволяет сформировать массивы необходимых исходных данных, отражающих всестороннее влияние на выбор номенклатуры ЗИП трех факторов:

- допустимой длительности восстановления образца СТС в рассматриваемых условиях;
- технологических возможностей РО по восстановлению образцов СТС;
- особенностей конструкции рассматриваемого образца СТС.

В соответствии с техническим заданием для каждого k -го вида продукта производитель разрабатывает комплект документов, содержащий структуру ремонтного цикла в пределах назначенного Эксплуатационного ресурса P_k (виды и периодичность ТОиР), номенклатуру и количество ЗИП для ТОиР. В таблице 1 в формализованном виде приведен примерный перечень форм ТОиР в зависимости от наработанного эксплуатационного ресурса k -го вида продукта P_k^H .

Таблица 1 – Перечень форм ТОиР в зависимости от наработанного эксплуатационного ресурса k -го вида продукта P_k^H .

Форма ТОиР	Наработанный эксплуатационный ресурс P_k^H
A	$P_{k_1}^H$
B	$P_{k_2}^H$
C	$P_{k_3}^H$
D	$P_{k_4}^H$
-	-
F	P_k

Структура выполнения периодических форм ТОиР в пределах назначенного ресурса P_k представлена на рисунке 1.

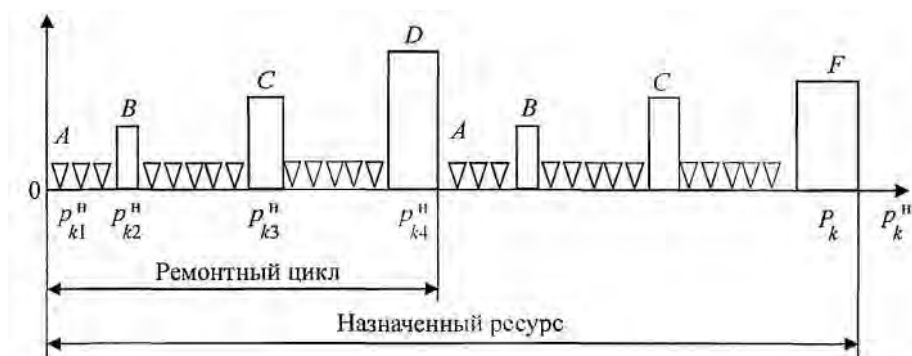


Рисунок 1 – Структура выполнения периодических форм ТОиР в пределах назначенного ресурса P_k

Это порождает острую необходимость в разработке методов управления производством ЗИП на основе фактического спроса, так как планирование (прогнозирование) интенсивности эксплуатации на длительные сроки сопряжено с появлением ошибок. Поэтому объем потребления запчастей Q_i должен учитывать не только использование назначенного ресурса, но и интенсивность эксплуатации.

Агрегированная величина Q_i — общей потребности в ЗИП для всего парка техники, зависящей от наработки и интенсивности эксплуатации - рассчитывается следующим образом:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K b_{ijk} \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{l_k=1}^L \sum_{P_k^H=1}^{P_k} a_{kl_k P_k^H}, \quad (1)$$

где $j = \overline{1, n}$; $i = \overline{1, m}$; $k = \overline{1, K}$

Левая часть произведения $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K b_{ij}$ определяет потребность в ЗИП, порождаемую регламентом, то есть общий нормативный расход ЗИП i -го вида для проведения n ремонтных работ j -го вида по всему парку эксплуатируемых продуктов вида k .

Практическое значение для управления производством имеет значение потребности в режиме реального времени, для чего в правой части произведения выражения (1) введен множитель $\sum_{k=1}^K \sum_{l_k=1}^L \sum_{P_k^H=1}^{P_k} a_{kl_k P_k^H}$ представляющий общий парк изделий всех K видов, $k = \overline{1, K}$, эксплуатируемых с наработкой P_k^H и интенсивностью использования продукта l_k .

Перестроить управление производством запасных частей для СТС на работу в режиме реального времени - задача ближайшего будущего для российской промышленности. С помощью формулы (1) можно планировать производство запчастей на основе прогноза будущего состояния эксплуатационного ресурса всего парка продуктов, зависящего от интенсивности его эксплуатации [15, 16, 22, 23].

Неиспользованный эксплуатационный ресурс k -го вида продукта определяется разностью $(P_k - P_k^H)$, а с помощью отношения $\frac{(P_k - P_k^H)}{l_k}$ мы можем рассчитать будущую наработку изделия $P_{k_t}^*$ на следующий момент времени t при прогнозируемой интенсивности его эксплуатации l_{k_t} :

$$P_{k_t}^* = \frac{(P_k - P_k^H)}{l_k}. \quad (2)$$

Интенсивность эксплуатации является случайной величиной, зависящей от многих факторов – климатических, сезонности использования, квалификации персонала, т. д., для систем военного назначения - и геополитической обстановки. При недостатке статистической и аналитической информации интенсивность эксплуатации можно прогнозировать с помощью экспертных методов, полагаясь на опыт и интуицию специалистов. Это позволит установить закон распределения, характеризующий этот показатель. Однако чаще используются числовые характеристики случайной величины, дающие ее некоторое осредненное описание. Особую роль играет математическое ожидание, вероятностный смысл которого состоит в среднем арифметическом значении случайной величины. Поэтому выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$P_k^* = \frac{(P_k - P_k^H)}{M(L_k)}. \quad (3)$$

Установив, под какой закон распределения попадает величина интенсивности, вычисление $M(L_k)$ не составит особых трудностей. Таким образом, согласно выражению (3), будущая наработка продукта будет зависеть от интенсивности его использования.

Подставив в (1) вместо P_k^H величину $P_{k_t}^*$, мы планируем общую наработку технического парка и можем определять величину агрегированной потребности в запчастях на следующие временные периоды. Как известно, в общем случае величина

спроса на запчасти рассчитывается как сумма потребности по плановым заменам и стохастической - по отказам.

С учетом вышеизложенного формула (1) преобразуется в формулу следующего вида:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{l_{kt}=1}^L \sum_{p_{kt}^*=1}^{P_k} a_{k \cdot l_{kt}}^{p_{kt}^*} + \delta_i, \quad (4)$$

где δ_i — слагаемое, описывающее потребность в ЗИП, вызванную отказами, случайными или аварийными поломками (т. е. непредвиденное кратковременное изменение спроса). Величина δ_i может использоваться для определения ошибки прогноза, в том случае, если метод используется для планирования производственной программы.

Следующим шагом необходимо рассчитать Q_{it_0} — величину, служащую основанием для планирования производственной программы на момент начала выпуска продукции.

Программа выпуска i -ой детали (шт.) в начальный момент времени t_0 рассчитывается на основе производственной программы завода a_k по k -му виду продукции следующим образом:

$$Q_{it_0} = p_{ir} + \sum_{k=1}^K a_k \varepsilon_{ki}, \quad (5)$$

где a_k - количество продукции k -го вида; ε_{ki} - применяемость i -ого вида ЗИП в k -ом продукте; p_{ir} - программа i -ого вида ЗИП россыпью.

Объем выпуска россыпи p_{ir} в момент t_0 рассчитывается, исходя из потребности в этих деталях без учета наработанного продуктом эксплуатационного ресурса и интенсивности эксплуатации, т. е. исходя из нормативного расхода ЗИП для проведения первой ремонтной работы b_{il} :

$$p_{ir} = \sum_{k=1}^K b_{ilk} a_k. \quad (6)$$

По формуле (6) определяется величина фактического запаса i -ого вида ЗИП на складе завода в момент t_0 .

Таким образом, расчет по формуле (4) позволяет планировать общую наработку технического парка и определять величину агрегированной потребности в ЗИП на следующие временные периоды, что служит основанием для планирования производственной программы по выпуску ЗИП. Производственная программа планируется по видам ЗИП; для деталей с высокой интенсивностью плановых замен в качестве горизонта планирования должен выбираться небольшой временной промежуток - две, три недели.

Для управления производством ЗИП в режиме реального времени с учетом фактической наработки и интенсивности эксплуатации объекта используется расчет потребности по формуле (1). Информация об интенсивности эксплуатации в реальном времени поступает в ИСУ (информационно-управляющую систему) производителя, и программа выпуска ЗИП постоянно корректируется [22 - 25].

Заключение

Следующим этапом работы является разработка практических рекомендаций по упорядочению информационного обеспечения решения задач планирования на различных уровнях управления, а также разработка единой схемы организации информационных потоков в подсистему управления эксплуатацией РАВ. Ее реализация обеспечивает возможность внедрения методов автоматизированного учета информации о наличии ЗИП, согласованных как по составу учетных атрибутов и их

актуализации, так и по методике организации информационных сетей. Реализация совокупности предлагаемых подходов и методов возможна на базе использования существующих средств автоматизации и обеспечивает устранение наблюдаемых противоречивых тенденций: сохранения традиционных методов решения задач планирования и потребностью практики в повышении как степени обоснованности отдельных плановых показателей укомплектованности ЗИП, так и степени их строгой взаимосогласованности на различных уровнях управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 318-322.

2. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

3. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. Способы обоснования затрат на эксплуатацию и ремонт ракетно-артиллерийского вооружения в условиях выполнения государственного оборонного заказа // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды IV Межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 269-273.

4. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

5. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н. Таможенная политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Вестник Российской таможенной академии. 2015. № 1. С. 14-19.

6. Черныш А.Я., Анисимов Е.Г. Концепция построения теории таможенного дела // Вестник Российской таможенной академии. 2009. № 3. С. 5-11.

7. Тебекин А.В., Анисимов Е.Г. О фронтах гибридной войны в экономическом и геополитическом пространстве // Журнал исследований по управлению. 2020. Т. 6. № 5. С. 60-74.

8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы. - Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознаменная, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

9. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.

10. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

11. Гасюк Д.П. Нормативно-правовые основы создания, цели, задачи и функции группы стандартизации и каталогизации вооружения, военной и

специальной техники // Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 2019. С. 370-374.

12. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы. - Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

13. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

14. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. - 2020. - № 3 (53). - С. 59-65.

15. Гасюк Д.П., Дубовский В.А., Дубовская Н.И. Типологизация факторов, обуславливающих создание системы управления полным жизненным циклом ракетного комплекса сухопутных войск // Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. Российская академия ракетных и артиллерийских наук. Санкт-Петербург, 2020. С. 108-115.

16. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Самоленков В.А. Введение в теорию эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии.- Москва: Военная академия генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. 2008. - 180 с.

17. Гасюк Д.П., Дроговоз П.А., Дубовский В.А. Функциональное моделирование процессов жизненного цикла вооружения и военной техники Вестник Академии военных наук. 2020. № 3 (72). С. 105.

18. Гасюк Д.П., Дубовский В.А., Гурьянов А.В. Проблема обоснования облика системы управления полным жизненным циклом ракетного комплекса сухопутных войск // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2020. № 2 (112). С. 29-33.

19. Гасюк Д.П., Белов А.С., Трахинин Е.Л. Научно-методический подход по оцениванию живучести компьютерных систем в условиях внешних специальных программно-технических воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. - 2018. - № 4. - С. 86-90.

20. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Ковальчук А.М., Романюта А.Е. Методический подход к оценке надежности циклически применяемых сложных технических систем // Журнал технических исследований. 2021. Т. 7. № 4. С. 57-62.

21. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством. - Санкт-Петербург, 2013. - 399 с.

22. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

23. Касяненко Е.О., Гасюк Д.П. Применение процессного подхода для оптимальной работы предприятия // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - 2016. - С. 26-29.

24. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. Актуальные вопросы развития системы эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии

вооруженных сил Российской Федерации // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2022. № 2 (17). С. 81-88.

25. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

V.V. Larkin, V.L. Khrulev, M.L. Begunov, D.G. Shakhov, V.V. Shil
Mikhailovskaya Military Artillery Academy,
Saint Petersburg, Russia, valentin_larkin@mail.ru

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE NEEDS OF THE FLEET OF OPERATED EQUIPMENT IN MATERIALS, COMPONENTS AND SPARE PARTS BASED ON THE INTRODUCTION OF A PROACTIVE SYSTEM OF MAINTENANCE AND REPAIR OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

Abstract

This article develops a methodology for determining the needs of the fleet of operated equipment in materials, components and spare parts based on the introduction of a proactive system of maintenance and repair of a complex technical system. This technique combines, on the one hand, the structure of the repair cycle (regulations and frequency of repair work), standards of spare parts consumption, and, on the other hand, monitoring of resource generation and intensity of operation in real time for each object of equipment. The developed methodology for determining the need for spare parts, depending on the intensity of the operation of the STS, can become the basis for the mathematical support of information and control systems to support the operation of the STS, uniting manufacturers, suppliers and consumers of complex equipment.

Keywords: proactive maintenance and repair, complex technical system, integrated logistics support, spare parts and accessories.

Л.В. Логинов, В.В. Ларькин, А.С. Ерюшев, А.А. Вырвич, Е.А. Мельников
Михайловская военная артиллерийская академия,
Санкт-Петербург, Россия, valentin_larkin@mail.ru

МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ОСВОЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

Предметом исследования является процесс освоения дистанционно-управляемых роботизированных сложных технических систем (РСТС). Актуальность исследования заключается в том, что возрастающий уровень автоматизации и роботизации не исключает человека из системы управления РСТС, напротив, развивающаяся современная техника только увеличивает требования, предъявляемые к подготовке операторов РСТС. Методология исследования соединяет методы системного анализа, эргономики, теории надежности, инженерной психологии, квалиметрии деятельности, технической кибернетики. Рассмотренный метод позволяет получить потенциально достижимые и фактически достигнутые оценки уровня освоения образцов РСТС операторами на основе комплексной характеристики.

Ключевые слова: система освоения, уровень подготовки, оператор, роботизированные сложные технические системы, теория надежности, качество.

Введение

За последнее время произошли существенные изменения в фундаментальных и технологических областях, что обеспечивает быстрое развитие робототехники, разработку и внедрению экспериментальных, дистанционно-управляемых и полуавтономных образцов РСТС [1 - 8]. Перспектива автоматизации движения роботов вплотную подошла к практическому осуществлению. Определенный прогресс достигнут в области технологий группового управления и интеллектуализации процессов управления РСТС [9 - 17].

Современные РСТС являются дистанционно-управляемыми комплексами. Высокий уровень роботизации и автоматизации таких РСТС не исключает человека из системы управления ими, а значительно усложняет его функции. А техническое совершенствование РСТС предъявляет повышенные требования к уровню профессиональной подготовленности операторов.

Однако при этом появляется ряд существенных противоречий, так структурное, а также функциональное усложнение РСТС приводит и к усложнению алгоритма работы операторов, увеличению времени на выполнение ими подготовительных операций и контроля за исполнительными механизмами. Вместе с тем условия применения РСТС требуют минимизировать время для принятия управленческих решений оператором. Требования, предъявляемые к подготовке операторов современных РСТС, должны позволить им максимально использовать свою потенциальную эффективность. Работа операторов различных совместно применяемых РСТС должна быть максимально защищена от ошибок и согласована в реальном масштабе времени, несмотря на сложность образцов РСТС. По мере ускорения темпов прогресса РСТС эти противоречия, конечно, будут увеличиваться.

Разрешение данных противоречий требует своевременной и полной оценки эргономичности робототехнических образцов и комплексов, а также совершенствования системы обучения и определения уровня профессиональной подготовки операторов [18 - 21].

Результаты исследований показывают, что именно человек-оператор в большинстве случаев будет выполнять функции компенсации возмущений, действующих на РСТС. Человек в силу своей универсальности, пластичности и адаптивности способен в случае тех или иных нарушений быстро переходить от одного способа выполнения своих функций к другим, легко меняя программы управления системой «человек-машина». Именно к этому классу и относятся дистанционно-управляемые РСТС.

Анализ развития форм и способов взаимодействия средств управления и человека показывает, что к сенсомоторным качествам человека, скорости и точности его реакций предъявляются достаточно жесткие требования. Дальнейшая автоматизация выведет оператора на более высокие уровни управления. Тем не менее, он должен будет иметь весьма развитые сенсомоторные качества для выполнения ручного труда.

Система подготовки операторов РСТС существенно ограничена по времени обучения. Кроме того, как правило, отсутствует возможность выделения значительных финансовых средств на внедрение новых дорогостоящих обучающих программ. Совершенствование методического обеспечения контроля профессиональной подготовки операторов является одним из приоритетных направлений совершенствования системы подготовки РСТС. Любая система обучения требует непрерывного и достоверного контроля результатов ее применения. Скорость и качество процесса освоения образца РСТС во многом зависит от эффективности контроля за действиями обучаемого, достоверности его результатов, полноты учета и характеристик деятельности оператора как в нормальных, так и в экстремальных условиях [22 - 28].

Развитие сложных систем зависит от многих факторов (параметров). Выражением такой зависимости является целевая функция. Формируем задачу оценивания эффективности функционирования РСТС в виде расчета следующего целевого функционала (1):

$$\mathcal{E} = F(x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_m, z_1 \dots z_l), \quad (1)$$

где \mathcal{E} – показатель эффективности функционирования системы «человек-машина» (СЧМ); F – целевая функция, состоящая из управляемых параметров и форм зависимости между ними ($x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_m, z_1 \dots z_l$);

Для выполнения следующих ограничивающих условий целевой функции используем систему неравенств (2):

$$\begin{cases} x_i \leq x_i^{don}, \text{ при } i = \overline{1 \dots n}, \\ y_j \leq y_j^{don}, \text{ при } j = \overline{1 \dots m}, \\ z_k \leq z_k^{don}, \text{ при } k = \overline{1 \dots l} \end{cases} \quad (2)$$

где x_i – характеристики деятельности человека-оператора; y_j – характеристики функционирования технических средств; z_k – характеристики условий функционирования (рабочей среды); $x_i^{доп}, y_j^{доп}, z_k^{доп}$ – допустимые значения заданных

характеристик; $i = \overline{1 \dots n}, j = \overline{1 \dots m}, k = \overline{1 \dots l}$ – множественные значения заданных характеристик.

На этапе освоения операторами РСТС при фиксированных характеристиках y_1, \dots, y_m возникает проблема достоверной оценки качества его освоения. Эта проблема решается сопоставлением факторов $x_1^{\text{ид}}, \dots, x_n^{\text{ид}}$, присущих некоторому «идеальному» человеку-оператору, с характеристиками $x_1^{\text{реал}}, \dots, x_n^{\text{реал}}$ реального человека, достигнутыми им за время обучения.

Таким образом стратегия обучения оператора РСТС, заключается в последовательном приближении характеристик обучаемого $x_1^{\text{реал}}, \dots, x_n^{\text{реал}}$ к нормативным $x_1^{\text{ид}}, \dots, x_n^{\text{ид}}$.

Воспользовавшись одним из основных понятий математического анализа предела функции (3):

$$\lim_{t \rightarrow t_{\text{осв}}} |x_i^{\text{ид}} - x_{i,t}^{\text{реал}}| = 0, \quad (3)$$

где $t_{\text{осв}}$ – период освоения образца РСТС.

Соответственно, возникает задача выбора таких значений нормативов $x_i^{\text{ид}}$, при которых функционал \mathcal{E} достигает максимума. Задача не столь проста, как кажется на первый взгляд. Дело в том, что необходимо учитывать множество факторов: требования к эффективности применения РСТС, его конструктивных особенностей и уровня освоения РСТС оператором.

Задавая уровень показателей качества деятельности оператора (КДО), необходимо предусмотреть такие допуски, которые бы обеспечили длительное сохранение высокой устойчивости. Противоречие возникает между необходимостью ужесточения нормативов для максимизации функционала \mathcal{E} и необходимостью предусмотреть существенные допуски для поддержания допустимой работоспособности оператора РСТС.

В силу различного рода причин показатели КДО не у каждого обучаемого за период обучения достигают нормативных значений. Поэтому возникает проблема оценивания уровня профессиональной подготовки оператора РСТС, которая традиционно решается выставлением балльных оценок.

Данный подход также имеет один существенный недостаток, такой как искусственный отрыв оценок показателей КДО от оценки эффективности функционирования РСТС как системы в целом. Действительно, одни ошибки оператора РСТС могут компенсироваться технической частью РСТС, а другие ошибки могут иметь самые катастрофические последствия.

Таким образом, существующая система контроля уровня освоения обучаемыми образца РСТС построена на оценивании качества выполнения отдельных операций (нормативов) и имеет следующие недостатки:

а) наличие множества нормативов. Следовательно, большое количество оценок за эти нормативы не дают ответа на главный вопрос – как оператор сможет выполнить задачу управления РСТС в реальных (особенно в экстремальных) условиях;

б) оценивание каждого норматива производится по балльной шкале, вне зависимости от степени его влияния на итоговый результат задачи, решаемой РСТС;

в) система вычисления интегрального показателя уровня подготовки оператора РСТС имеет субъективный характер;

г) отсутствует связь интегрального показателя уровня подготовки оператора РСТС с показателем эффективности применения образца РСТС;

д) отсутствует аппарат прогнозирования надежности деятельности оператора РСТС при длительных сроках работы;

е) не в полной мере отражен учет условий функционирования и применения образца РСТС и оценивания действий их операторов в экстремальных условиях [6].

Более строгим методом оценивания качества деятельности операторов РСТС, с точки зрения эффективности применения РСТС, будет метод, основанный на сравнении двух функционалов (4):

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^{\text{ид}} &= F(x_1^{\text{ид}} \dots x_n^{\text{ид}}, y_1 \dots y_m, z_1 \dots z_l), \\ \mathcal{E}^{\text{реал}} &= F(x_1^{\text{реал}} \dots x_n^{\text{реал}}, y_1 \dots y_m, z_1 \dots z_l). \end{aligned} \quad (4)$$

Человек-оператор является составным элементом эргатической системы при взаимодействии с техническим устройством и придает определенную специфичность этой системе с точки зрения исследования ее эффективности. Качественные различия между человеком и техническим устройством не исключают возможности рассматривать их в строго определенном отношении как звенья единой системы. Оператор РСТС в этом случае рассматривается как специфическая «подсистема» эргатической системы.

В качестве характеристик $x_1^{\text{ид}}, \dots, x_n^{\text{ид}}$ используются вероятностно-временные характеристики человека-оператора РСТС, рассчитанные аналитическим методом на основе различных эргономических исследований. Тогда стратегия предлагаемой системы контроля за эффективностью обучения выражается следующим образом (5):

$$\lim_{t \rightarrow t_{\text{оц}}} \mathcal{E}_t^{\text{реал}} / \mathcal{E}^{\text{ид}} \approx 1. \quad (5)$$

Такой подход обладает большей объективностью, так как уровень профессиональной подготовки операторов оценивается с позиций эффективности функционирования РСТС в целом.

В соответствии с поставленной задачей рассмотрим две наиболее часто реализуемые концепции операторов эргатических систем:

- концепцию «идеального» оператора;
- концепцию «реального» оператора.

В соответствии с ГОСТ В 29.08.002-84 показатели КДО классифицируются на показатели точности, быстродействия и надежности. Концепция «идеального» оператора описывает некоторого абстрактного оператора с максимально возможными значениями показателей КДО. Показатель быстродействия в этом случае рассчитывается аналитически на основе существующих методов априорного оценивания КДО. Точность и надежность «идеального» оператора будем считать абсолютными, так как само понятие ошибки рассматривается как нестандартное, исключительное событие, свидетельствующие о его недостаточном уровне подготовки. Поскольку изначально под «идеальным» оператором понимался специалист с максимально возможным уровнем профессиональной подготовки и, соответственно, с наивысшими показателями КДО, то и ошибки считаются для него невозможными.

Поскольку существенное практическое значение имеет управление несколькими совместно применяемыми РСТС (групповое управление, осуществляемое несколькими операторами), рассмотрим групповую деятельность как процесс взаимодействия, осуществляемый группой операторов для решения задач. Рабочую группу, укомплектованную «идеальными» операторами, назовём «идеальной» рабочей группой. Требования к показателям качества деятельности подобной группы аналогичны выше рассмотренным. Такая модель человека-

оператора применима для оценивания потенциальной (максимально достижимой) эффективности функционирования РСТС.

Модель «реального» оператора представляет собой математическую модель обычного человека с некоторым уровнем освоения конкретной эргатической системой. В качестве значений показателей КДО принимают характеристики какого-либо конкретного человека-оператора, полученные на основе тестирования, либо рассчитанные априорно на основе представленных в эргономической литературе методик. Такая модель используется для получения оценки реальной эффективности функционирования РСТС.

При моделировании собственных отказов элементов комплекса технических средств (КТС), воздействия условий применения на КТС и оператора РСТС необходимо составление сценария выполнения задачи, поставленной перед образцом РСТС с формированием списка технических элементов у которых произойдут собственные отказы, с моментами этих отказов, а также степень воздействия неблагоприятных факторов на оператора с моментами такого воздействия. Таким образом фиксируются показатели $y_1 \dots y_m$ и $z_1 \dots z_l$. Например,

- отказ элемента КТС «блок №1» в начале выполнения i -й подзадачи;
- полная потеря работоспособности оператором в начале выполнения j -й подзадачи и так далее.

Далее проводится аналитический расчет эффективности функционирования образца РСТС, управляемого «идеальным» оператором (группы РСТС, управляемых «идеальной» рабочей группой) при выполнении заданного сценария.

При использовании в качестве «реального» оператора РСТС конкретного человека (тестируемого) проводится контрольное выполнение боевой задачи по заданному сценарию с учетом показателей КДО по результатам её выполнения. Естественно, что при выполнении сценария «реальный» оператор может допускать аварийные и катастрофические ошибки.

На основе эксперимента производится расчет эффективности функционирования образца РСТС, управляемого «реальным» оператором. Используя полученные данные, проводится сравнение значений двух функционалов $\mathcal{E}^{ид}$ и $\mathcal{E}^{реал}$ согласно рассмотренной методике.

Заключение

Представленная методика выбора рационального варианта освоения роботизированных сложных технических систем позволяет получить потенциально достижимые и фактически достигнутые оценки уровня освоения образцов РСТС операторами на основе комплексной характеристики результатов их использования и соответствия предназначению, назначению. Такие оценки объективизируют процедуры квалиметрии профессиональной подготовленности операторов РСТС и позволяют разрабатывать и реализовывать управленческие решения, направленные на совершенствование как рабочих мест операторов РСТС так и стратегий их профессиональной подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Е.Г., Селиванов А.А., Ковальчук А.М., Чварков С.В. Концептуальный подход к построению эмпирических основ формирования системы робототехнических комплексов военного назначения // Вестник Академии военных наук. 2022. № 1 (78). С. 110-119.

2. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. № 4. С. 100-104.

3 Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2008. Т. 2. С. 317-318.

4. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Ковальчук А.М., Романюта А.Е., Сазыкин А.М. Оценка эффективности перспективного вооружения и военной техники на основе натурных испытаний // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2022. № 1 (121). С. 42-46.

5 Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

6. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.

7. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

8. Гасюк Д.П., Ларькин В.В., Косова В.А., Романов А.А. Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 10-18.

9. Зегжда П.Д., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Сауренко Т.Н. Модель и метод оптимизации вычислительных процессов в вычислительных системах с параллельной архитектурой // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 4. С. 78-85.

10. Черныш А.Я., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Оценка эффективности перспективных автоматизированных информационно-управляющих систем военного назначения на основе натурных испытаний // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2022. № 1. С. 37-41.

11. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Барабанов В.В., Филиппов А.А. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2015. № 648. С. 6-12.

12. Зегжда П.Д., Анисимов В.Г., Супрун А.Ф., Анисимов Е.Г., Сауренко Т.Н. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.

13. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М. Модель оценки эффективности информационного обеспечения применения высокоточного оружия в контртеррористических операциях // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 1-2 (79-80). С. 44-53.

14. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Зегжда П.Д., Сауренко Т.Н., Присяжнюк С.П. Показатели эффективности защиты информации в системе информационного взаимодействия при управлении сложными распределенными организационными объектами // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2016. № 4. С. 140-145.

15. Зегжда П.Д., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Сауренко Т.Н. Эффективность функционирования компьютерной сети в условиях вредоносных информационных воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2021. № 1. С. 96-101.

16. Гасюк Д.П., Белов А.С., Трахинин Е.Л. Научно-методический подход по оцениванию живучести компьютерных систем в условиях внешних специальных программно-технических воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 4. С. 86-90.

17. Anisimov V.G., Zegzhda P.D., Anisimov E.G., Saurenko T.N., Prisyazhnyuk S.P. Indices of the effectiveness of information protection in an information interaction system for controlling complex distributed organizational objects // Automatic Control and Computer Sciences. 2017. Т. 51. № 8. С. 824-828.

18. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

19. Гасюк Д.П. Особенности и направления развития системы подготовки специалистов в области машиностроения в условиях импортозамещения и цифровизации экономики России // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых,- Санкт-Петербург, 2022. С. 4-12.

20. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Лихачева О.А. Методика апостериорной оценки эффективности деятельности научных и научно-педагогических подразделений высших учебных заведений // Вестник Российской таможенной академии. 2014. № 1. С. 27-32.

21. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проведение занятий в активной форме при изучении специальных дисциплин студентами машиностроительных направлений // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 18-28.

22. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2020. № 3 (53). С. 59-65.

23. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Ковальчук А.М., Романюта А.Е. Методический подход к оценке надежности циклически применяемых сложных технических систем // Журнал технических исследований. 2021. Т. 7. № 4. С. 57-62.

24. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. Способы обоснования затрат на эксплуатацию и ремонт ракетно-артиллерийского вооружения в условиях выполнения государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: труды iv межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 269-273.

25. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20-22.

26. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно-артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды III Межвузовской научно-практической конференции. 2018. С. 268-272.

27. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Бурлаков А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 314-317.

28. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

L.V. Loginov, V.V.Larkin, A.S. Yeryushev, A.A. Virvich, Y.A. Melnikov
Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Saint-Petersburg, Russia,
valentin_larkin@mail.ru

METHODOLOGY FOR SELECTING A RATIONAL OPTION FOR DEVELOPING ROBOTIC COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Abstract

The subject of the research is the procedure for assessing the professional readiness of operators of remote-controlled robotic complex technical systems (RCTS). The relevance of the study is due to the fact that the increasing level of automation and robotizing of such complexes does not lead to the exclusion of a person from the control system, but to the complication of his functions, and technical improvement only increases the requirements for the level of professional training of operators. The research methodology combines the methods of system analysis, ergonomics, reality theory, engineering psychology, activity qualimetry, and technical cybernetics. The considered method allows to obtain potential achievable and actually achieved assessments of their mastering by operators and assessments of the level of mastering RCTS samples by operators aimed at improving approaches to the professional training of RCTS specialists.

Keywords: development systems, level of training, operator, robotic complex technical system, reliability theory, quality.

А.М. Шевелев¹, А.А. Зарукин¹, В.И. Новиков^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, anton.2002.07@gmail.com

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

ВОЗМОЖНОСТЬ ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС УСТРОЙСТВ ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ УПРАВЛЕНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ БУРОВОГО ВАЛА

Аннотация

В работе рассматриваются вопросы влияния изменения геометрии внутренней полости бурового вала конструктивного узла «буровой став», используемого в технологии струйной цементации для закрепления слабых и неустойчивых видов грунтов. Показана 3D-модель с расчетной сеткой сборочного узла «гидросъемник», составляющей частью, которого является рассматриваемый буровой вал. Рассчитаны методом конечных элементов в среде ANSYS возможные предельные значения напряжений, при которых вал сохраняет прочность при изменении диаметра и протяженности внутренней полости, и максимальные значения для диаметра и длины полости соответственно. Обозначены возможности и степень влияния геометрии внутренней полости на тепловой баланс гидросъемника.

Ключевые слова: струйная цементация, буровой став, уплотнительный элемент, тепловой баланс, напряжения, моделирование, метод конечных элементов.

Введение

Наиболее востребованной технологией среди инъекционных технологий для закрепления грунта в процессе строительства, в настоящее время, считается технология струйной цементации [1, 2, 3], причем ее применение не ограничивается только данной областью [4]. Соответственно вопросы проектирования оборудования для применения в рамках этой технологии являются крайне актуальными и востребованными [5, 6]. Укрупненно классическая конструктивная схема представляет собой цепочку, состоящую из источника высокого давления, средства передачи высоконапорной струи цементного раствора, технологического инструмента, к которой наиболее уязвимым местом являются средства передачи высоконапорной струи цементного раствора и в частности «гидросъемник», чья главная задача соединить неподвижную магистраль высокого давления с вращающимся инструментом. Вследствие чего, в процессе эксплуатации по контактными поверхностям этого устройства происходит значительное тепловыделение, что и приводит к выходу его из строя. Таким образом, именно тепловой баланс, возникающий при функционировании гидросъемника, будет определять эксплуатационные характеристики всей цепочки.

Исходя из проведенного ранее моделирования теплового поля и полученных значений распределения температуры в рассматриваемом узле [6, 7], следует отметить, что наибольшее количество тепла концентрируется со стороны одного из уплотнительных элементов, где отсутствует центральное отверстие и очевидно, что условия эксплуатации для этого элемента будут хуже, чем того, который находится

под влиянием охлаждающего воздействия, проходящей по центральному отверстию гидросъемника, водно-цементной смеси. Следовательно, можно предположить, что изменение геометрических параметров центрального отверстия, т.е. увеличение диаметра и длины, может положительно сказаться на тепловом балансе устройства. Однако возникает проблема, связанная с величиной значения диаметра и длины внутреннего отверстия. Естественным очевидным ограничением выступают физические границы вала гидросъемника, а для определения максимальных значений диаметра и длины полости необходимо провести вычислительный эксперимент, исходя из прочностных характеристик используемого материала и величины давления водно-цементной смеси.

Методы

Для решения необходимой задачи существует ряд современных системы автоматизированного проектирования, с помощью которых можно моделировать физико-механические нагрузки, в чьей основе заложен метод конечных элементов, т.е. численные решения дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений. Каждая такая система направлена решение конкретных задач на достаточно точном уровне и позволяет определить влияние интересующих факторов на моделируемую систему.

3D-моделирование конструктивного узла реализовано в программной среде ANSYS на базе уже созданной 3D-модели [6] и является гидросъемником (рисунок 1) состоящим из вращающегося бурового вала $\varnothing 100$ мм с внутренним глухим отверстием, диаметр и длина которого изменяются в максимальном диапазоне, не превышающим физические границы 3D-объектов; отверстия $\varnothing 20$ мм, через которые проводится подача водно-цементной смеси во внутреннюю полость и неподвижных корпуса; двух уплотнительных элементов, расположенных симметрично относительно отверстия $\varnothing 20$ мм и соответственно двух крышек с зажимающими элементами.

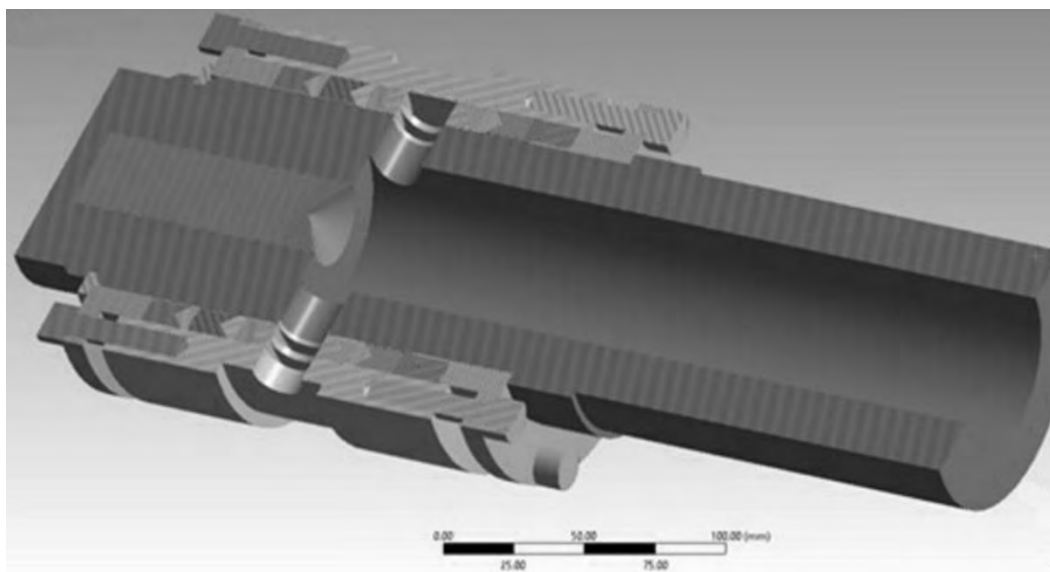


Рисунок 1 – 3D-модель гидросъемника в сечении

При расчете применена конечно-элементная сетка с максимальной длиной стороны 4 мм с максимальными коэффициентами сгущения на поверхности – 4. Для

сокращения времени расчета рассмотрена восьмая часть от всей конструкции вследствие того, что задача является осесимметричной (рисунок 2).

Граничные условия заданы следующие образом: frictionless support – ограничение в окружном перемещении, pressure – давление, приложенное к внутренней полости, fixed support - жесткая заделка и remote displacement – удаленная на расстояние жесткая заделка (рисунок 3). Материалы заданы аналогично моделям, представленным в [6, 7, 8], нагрузка задана дискретно исходя из давления рабочей жидкости (водно-цементной смеси) во внутренней полости: 60, 70, 80, 90, 100 МПа, влиянием каких-либо видов обработки или состоянием поверхности [9, 10] пренебрегается.

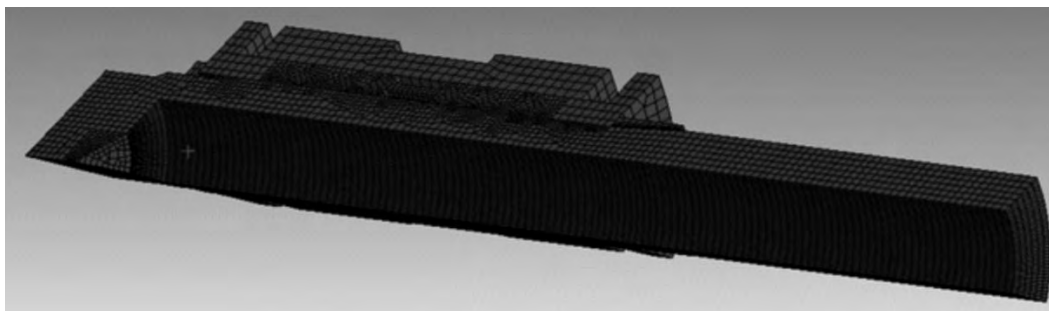
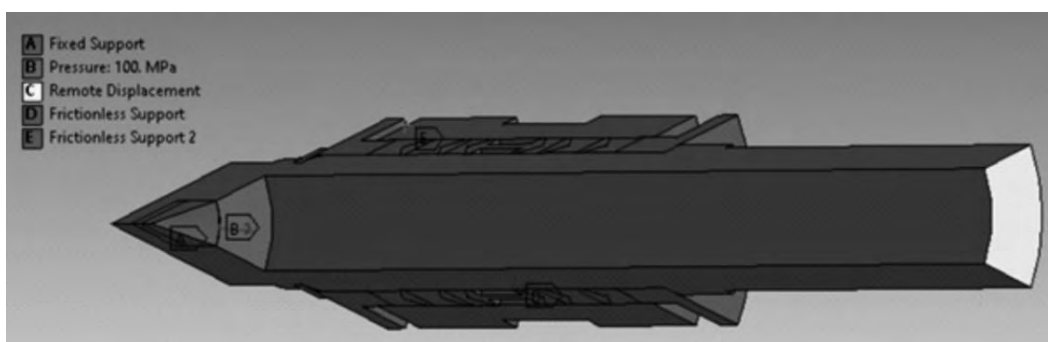
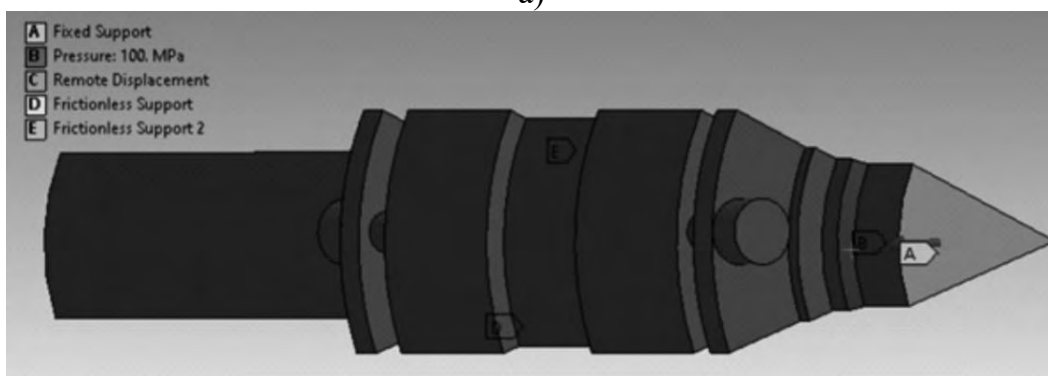


Рисунок 2 – Расчетная сетка



а)



б)

Рисунок 3 – Граничные условия: а) давление, приложенное к внутренней полости; б) жесткая заделка

Результаты и обсуждение

По результатам расчетов получены распределения напряжений для соответствующих значений давления водно-цементной смеси, проходящей через внутреннюю полость вала. Один из результатов расчета представлен на рисунке 4.

Имеющиеся данные позволяют получить зависимости напряжений от величин диаметра и длины внутренней полости вала. Для того чтобы расширить область применения результатов расчета, т.е. использовать их не только для конкретного вида гидросъемника, но и для аналогичных по конструкции узлов, следует использовать приведенные величины диаметра и длины. В данном случае можно рассматривать приведенный диаметр как отношение действительного значения диаметра вала к базовому значению диаметра вала, которое равно 100 мм, и приведенную длину как отношение действительного значения глубины полости, измеряемой от входного отверстия для подачи рабочей жидкости в сторону противоположную движению ее основного потока, к значению высоты комплекса полиамидных колец, базовое значение которой принято 50 мм. Соответствующие графики зависимостей напряжений от приведенного диаметра и приведенной длины показаны на рисунке 5.

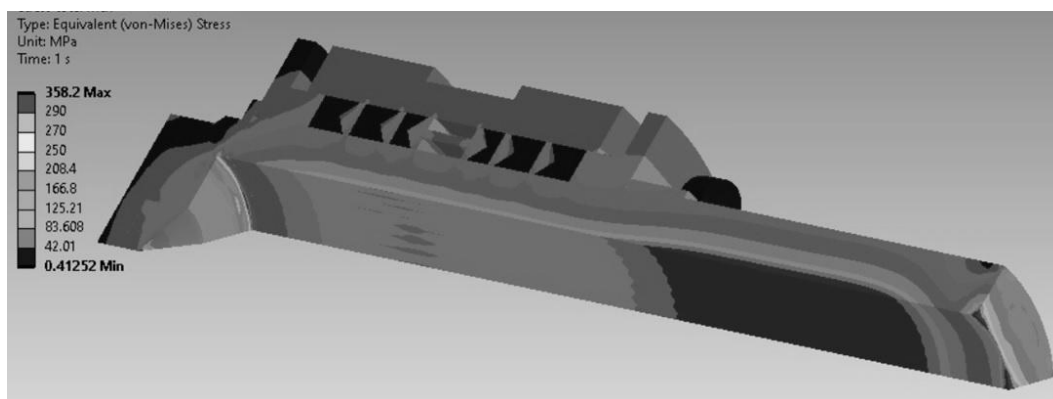
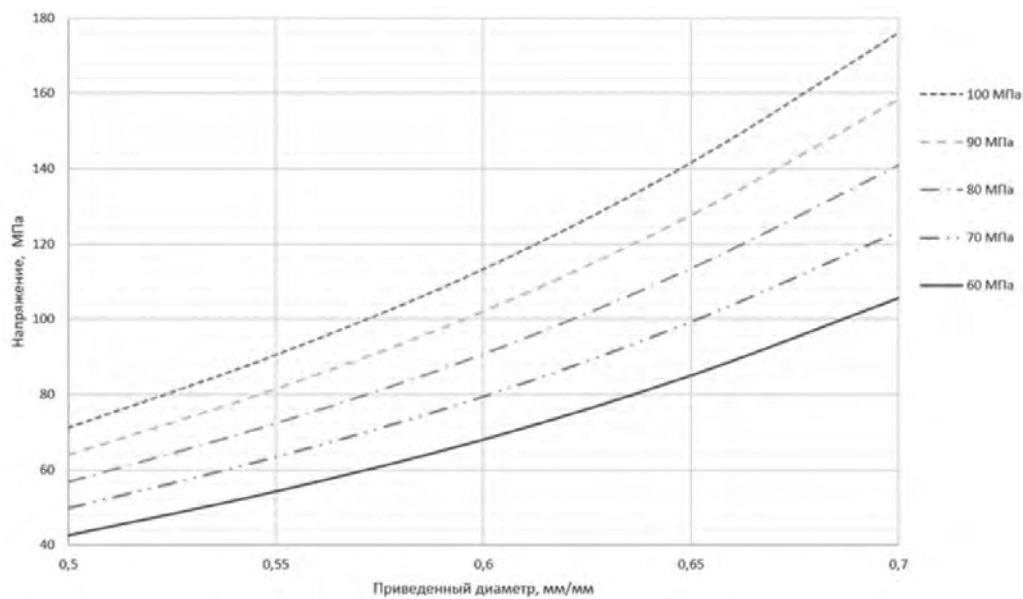


Рисунок 4 – Распределение значений эквивалентных напряжений по Мизесу в гидросъемнике при давлении 100 МПа, диаметре внутренней полости 35 мм, длине внутренней полости 80 мм

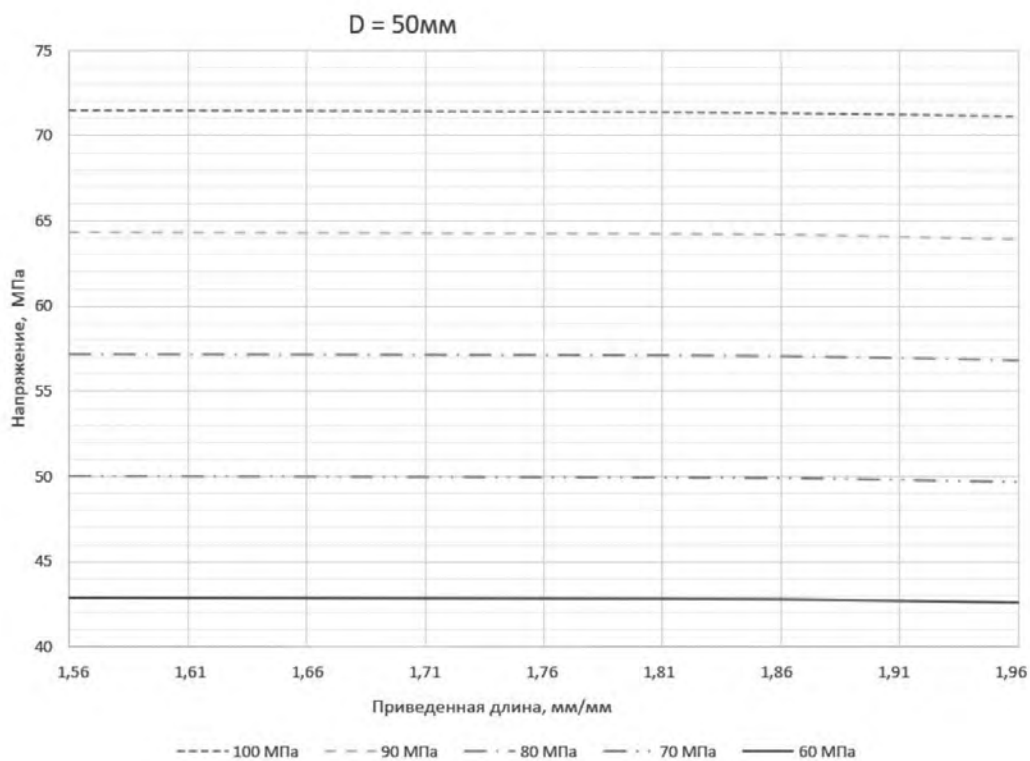
Из графиков (рисунок 5) следует, что основное влияние на прочностное состояние вала оказывает изменение внутреннего диаметра, что позволяет определить максимально допустимые значения для диаметра внутреннего отверстия. В то время как увеличение длины (глубины) отверстия не оказывает особого влияния на изменение величины напряжений, что связано с практически неограниченной возможностью увеличения длины самого вала в данном направлении и если возникают критические напряжения, то есть возможность увеличить толщину стенки за счет прироста длины самого вала. Следовательно, выбор оптимальной длины отверстия будет зависеть от того, насколько эффективно будет изменяться температура в рассматриваемой области с увеличением длины отверстия.

Заключение

Проведенный вычислительный эксперимент позволил получить распределение уровня напряжений в буровом вале, при которых он сохраняет прочность в зависимости от уровня давления рабочей жидкости, и выявить максимально допустимые значения для диаметра и длины внутренней полости соответственно, что позволит оказать оптимальное влияние на снижение уровня концентрации тепла со стороны уплотнительного элемента, не подверженного охлаждающему воздействию водно-цементной смеси. Таким образом, изменение геометрии бурового вала может положительно отразиться на тепловом балансе всего конструктивного узла «буровой став».



а)



б)

Рисунок 5 – Графики зависимостей: а) напряжений от приведенного диаметра; б) напряжений от приведенной длины

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

1. Merlini D., Stocker D., Falanescа M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps // Engineering. - 2018. - V. 4. - P. 235. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.004>

2. Toraldo C., Modoni G., Croce P. Reliable definition of the characteristic strength of jet grouted soils by Random Field Theory // *Procedia Engineering*. - 2016. - V. 158. - P. 416. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.465>

3. Zhi-Feng Wang, Shui-Long Shen, Giuseppe Modoni Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application // *Computers and Geotechnics* - 2019 - V. 111, - P. 222 <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.03.012>

4. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste // *Advances in Materials Science and Engineering*. - Volume 2020. - Article ID 8078527. 16 p. <https://doi.org/10.1155/2020/8078527>

5. Yuan Y., Shen S.L., Wang Z.F., Wu H.N. Automatic Pressure-Control Equipment for Horizontal Jet-grouting // *Autom. Constr.* - 2016. - V. 69. - P. 11.

6. Шевелев А.М. Моделирование распределения теплового поля в элементах гидросъемника для струйной цементации грунтов / Шевелев А.М., Ульянов А.А., Боряшнев А.М. и др. // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении», 24-26 мая 2022 г. под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Поповича, д-ра техн. наук, проф. Д. П. Гасюка.- СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - 618 с.

7. Новиков В.И. Влияние морфологии контактных поверхностей на распределение температурного поля в устройствах для струйной цементации грунтов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. - 2022. - № 4. - С. 54. <https://doi.org/10.31857/S0235711922020109>

8. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Моделирование теплового баланса в процессе эксплуатации элементов гидросъемника бурового става для струйной цементации грунтов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. - 2020. - № 3. - С. 404. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-03-404-410>

9. Новиков В.И. Особенности расчета теплового баланса гидросъемника с учетом влияния на шероховатость поверхности электролитно-плазменного полирования / Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Щербаков А.П. и др. // *Металлообработка: научно-производственный журнал*. - 2020. - № 4. - С. 16. <https://doi.org/10.25960/mo.2020.4.16>

10. Беляев С.Н., Новиков В.И. Технологические аспекты процесса формирования функциональных тонкопленочных покрытий на узлах прецизионных приборов // *Металлообработка*. - 2021. - № 5-6 (125-126). С. 59. <https://doi.org/10.25960/mo.2021.5-6.59>

A.M. Shevelev¹, A.A. Zaruikin¹, V.I. Novikov^{1,2}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, anton.2002.07@gmail.com

²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia

**POSSIBILITY OF INFLUENCE TO THE THERMAL BALANCE OF
THE JET GROUTING DEVICES BY CONTROL OF
THE DRILL SHAFT GEOMETRIC PARAMETERS**

Abstract

The paper deals with the influence of changes in the geometry of the internal cavity of the drill shaft of the structural unit "drilling string" used in the technology of jet grouting to fix weak and unstable types of soils. A 3D-model is shown with a computational mesh of the "hydraulic puller" assembly which is a part of which the considered drill shaft is. The possible limit values of stresses are calculated by the finite element method in the ANSYS environment which the shaft retains strength with a change in the diameter and length of the internal cavity and the maximum values for the diameter and length of the cavity, respectively too. The possibilities and degree of influence of the geometry of the internal cavity are indicated to the thermal balance of the hydraulic puller.

Keywords: jet grouting, drilling string, sealing, heat balance, stresses, modeling, finite element analysis.

К. Аубекеров, С. Копцев, А.Ю. Скрыбнев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, scarts@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ

Аннотация

В работе рассмотрена возможность применения компьютерного зрения для обнаружения и классификации дефектов, возникающих при производстве стали. Описаны преимущества использования компьютерного зрения для обнаружения дефектов. Для решения поставленной задачи построена и обучена нейронная сеть на основе шести сверточных слоев. Сеть обучалась и тестировалась на основе набора данных, включающего 12000 изображений. Для оценки качества работы модели использовались пять метрик.

Ключевые слова: компьютерное зрение, обнаружение дефектов стали, сверточная нейронная сеть.

Введение

В современных реалиях продвинутые промышленные комплексы имеют сложную систему организации и контроля. Производственные процессы представляют собой сложные иерархические структуры. В таких условиях важнейшей задачей является мониторинг и контроль качества изготавливаемых изделий на всех этапах производства. Необходимо своевременно выявлять любые поломки, дефекты, нарушения технологических процессов на ранних этапах производства, так как своевременное обнаружение дефектов позволяет произвести оперативные правки в технологическом процессе и значительно сократить производственные потери [1- 9].

Одним из методов выявления дефектов на производстве является внедрение технологий искусственного интеллекта, в частности, компьютерного зрения.

Компьютерное зрение – это система, которая автоматически получает и обрабатывает изображения реального объекта с помощью оптических устройств (камер, лазеров) и бесконтактных датчиков (электромагнитных, инфракрасных) и на основе ряда заданных показателей отправляет информацию о наличии или отсутствии дефектов в изделии в режиме реального времени. Технология компьютерного зрения может охватывать весь электромагнитный спектр, от гамма-лучей до радиоволн [10]. Благодаря оптическим датчикам, разработанным методам оптической передачи изображений и алгоритмам их непосредственной обработки, компьютерное зрение может выполнять сложные задачи мониторинга и контроля больших партий изделий, которые недостижимы в традиционных подходах.

Типичная система промышленного визуального контроля в основном состоит из трех модулей: модуля получения изображений изделия или его составной части, модуля предобработки изображений и непосредственно алгоритма выявления дефектов (рисунок 1). Описание этих модулей и основные шаги их реализации приведены в данной статье.

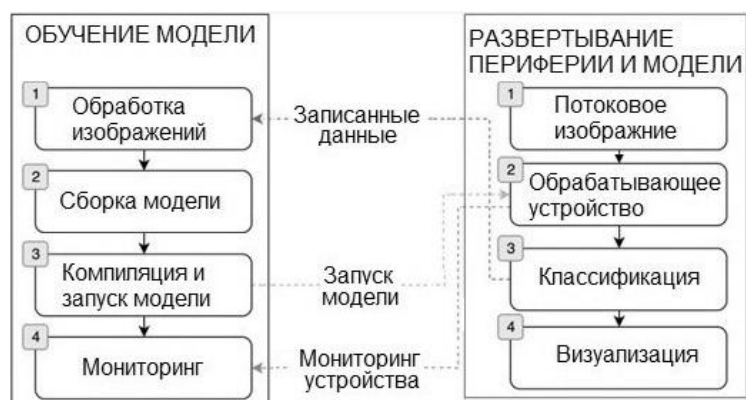


Рисунок 1 – Процесс построения системы мониторинга при помощи технологии компьютерного зрения

Постановка задачи обнаружения дефектов в образцах стали

Рассматривается задача обнаружения и классификации дефектов, возникающих при производстве стали. Требуется создать нейронную сеть, принимающую на вход фотоизображения образцов стали, содержащие различные дефекты и классифицировать эти изображения согласно характеру наблюдаемых повреждений [11].

Каждому изображению присвоен уникальный идентификационный номер. Изображение может не иметь видимых дефектов, иметь дефект одного класса, либо принадлежать нескольким классам. Для каждого изображения необходимо сегментировать дефекты каждого класса.

Классы представляют собой различные виды дефектов:

- дефект 1 типа представляет собой мелкие сколы расположенные по все поверхности изделия;
- дефект 2 типа представляет собой длинные царапины;
- дефект 3 типа представляет собой рваные следы волочения;
- дефект 4 типа представляет собой единичные вмятины большой площади.

Процесс создания и обучения нейросетевой модели выглядит следующим образом:

- на первом шаге производится препроцессинг изображений – контрастом выделяются те участки, которые необходимо классифицировать, т. е. непосредственно видимые дефекты на изображениях образцов стали;
- затем общая выборка изображений разделяется на тренировочную (на которой модель будет обучаться) и тестовую (на которой будет осуществляться процесс валидации и тестирования производительности модели);
- далее модель проходит несколько итераций обучения, где на каждом шаге проверяется качество предсказаний дефектов на обучающей выборке;
- на финальном этапе через модель пропускается тестовая выборка, оцениваются результаты классификации и проводится оценка общей производительности модели.

Структура нейронной сети

Для распознавания дефектов в стали будет использоваться язык программирования Python 3, открытая программная библиотека PyTorch – фреймворк машинного обучения для языка Python с открытым исходным кодом. Архитектура сети: Tiny VGG. [12, 13].

Определения слоев:

а) Входной слой - (крайний левый слой) представляет входное изображение в нейронную сеть. Поскольку мы используем изображения RGB в качестве входных данных, входной слой имеет три канала, соответствующих красному, зеленому и синему каналам соответственно, которые показаны в этом слое.

б) Сверточные слои. Сверточные слои являются основой нейронной сети, поскольку они содержат выученные ядра (веса), которые извлекают признаки, отличающие различные изображения друг от друга. Имеет следующие параметры:

1) `Kernel_size` - размер ядра, часто также называемый размером фильтра, относится к размерам скользящего окна над входящим сигналом. Выбор этого гиперпараметра оказывает огромное влияние на задачу классификации изображений. Например, небольшие размеры ядра способны извлекать из входных данных гораздо больший объем информации, содержащей высоко локальные особенности.

2) `Stride` - указывает, на сколько пикселей ядро должно быть смещено за одну итерацию.

3) `Padding` - часто необходимо, когда ядро выходит за пределы карты активации.

в) Функции активации. ReLU, см. рисунок 2. Одна из причин, по которой эти новаторские нейронные сети способны достичь такой огромной точности, заключается в их нелинейности. ReLU применяет столь необходимую нелинейность в модель. Нелинейность необходима для получения нелинейных границ принятия решений, так что выходные данные не могут быть записаны как линейная комбинация входящих сигналов.

Таким образом, модель состоит из X слоев:

1) Входной слой

2) Сверточный слой Conv2D (`kernel_size=3`, `stride=1`, `padding=0`) с функцией активации ReLU.

3) Сверточный слой Conv2D (`kernel_size=3`, `stride=1`, `padding=0`) с функцией активации ReLU слоем усреднения значений MaxPooling2D (`kernel_size=2`, `stride=2`).

4) Сверточный слой Conv2D (`kernel_size=3`, `stride=1`, `padding=0`) с функцией активации ReLU.

5) Сверточный слой Conv2D (`kernel_size=3`, `stride=1`, `padding=0`) с функцией активации ReLU слоем усреднения значений MaxPooling2D (`kernel_size=2`, `stride=2`).

6) Слой сглаживающего выхода (Flatten).

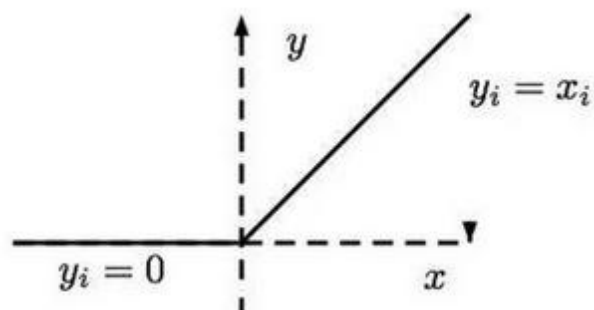


Рисунок 2 – Функция активации ReLU

Описание обучающей выборки

Подготовка и обучение модели производилось на наборе данных, который содержит около 12000 изображений, размеченных 4 типами дефектов. Каждое

изображение может содержать от 0 до 4 дефектов одновременно. Пример изображения представлен на рисунке 3.

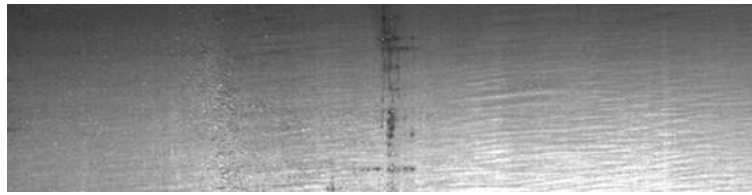


Рисунок 3 – Пример изображения содержащего дефект третьего типа

Анализ выборки показал наличие серьезного дисбаланса классов – третий тип дефекта встречался в 72% выборки, первый и четвертый типы дефектов в 23% выборки, второй тип дефекта встречался лишь в 3% выборки.

Проблема дисбаланса классов имеет два решения:

1) Регулировка функции потерь путем задания весов для каждого класса. Присвоение большего веса второму типу дефекта приведет к большей точности в определении наличия данного дефекта. Недостатком данного метода является появления ложноположительной классификации, при котором модель будет сигнализировать о наличии дефекта при его фактическом отсутствии.

2) Искусственное наращивание выборки путем создания зашумленных, инвертируемых, транспонированных копий редко встречаемых экземпляров класса. Осуществляется методом DataAugmentation. [14]. Цель данного метода – осуществить базовые преобразования изображений, чтобы каким-либо образом изменить исходное и создать альтернативное изображение, которое будет включено в обучающую выборку. Базовые преобразования включают в себя обрезку, поворот, растягивание в одной или нескольких плоскостях и др. Данные преобразования выполняются случайно над изображениями, принадлежащими классам с меньшим числом исходных объектов, и позволяют выровнять дисбаланс в обучающей выборке. Таким образом выполнение такого рода преобразований позволяет искусственно увеличить разнообразие тренировочного набора и улучшить качество классификации модели. В англоязычной литературе данный процесс принято называть «Искусственным увеличением данных» (Data Augmentation) [15, 16].

Получившийся набор данных разбит на тренировочный и тестовый в пропорции 0.75 к 0.25 соответственно.

Препроцессинг изображений

Каждое изображение преобразуется в тензор – трехмерную матрицу размерности [256, 400, 3] (3 канала цвета RGB, 256 пикселей высота, 400 пикселей ширина) путем применения следующих трансформаций (рисунок 4):

1) С целью приведения изображений к требованиям выбранной модели по признаку `saracity`, каждое изображение проходит процедуру скалирования и приводится к размерам 256 на 400 пикселей. Процедура осуществляется с помощью `torchvision.transforms.Resize`.

2) С целью фильтрации фактуры материала (метала) каждое изображение подвергается сглаживанию и размытию с помощью `torchvision.transforms.GaussianBlur`, а так же зашумлению с помощью `torchvision.transforms.WhiteNoise`. Данные операции позволяют скрыть от нейросети

закономерность – высокую корреляцию между типом дефекта и типом материала, на котором возникает этот дефект.

3) Случайное аффинное преобразование позволяет подавать изображение в разном масштабе и со случайным поворотом. Процедура осуществляется с помощью `torchvision.transforms.RandomAffine`. Случайное зеркальное отражение изображения осуществляется с помощью `torchvision.transforms.RandomFlip`. Данные операции позволяют подавать в модель одни и те же дефекты под разными углами, в разном масштабе и отражениями.

4) Нормализация цветового канала осуществляется с помощью `torchvision.transforms.Normalize`

5) Преобразование изображения в тензор осуществляется с помощью `torchvision.transforms.ToTensor`

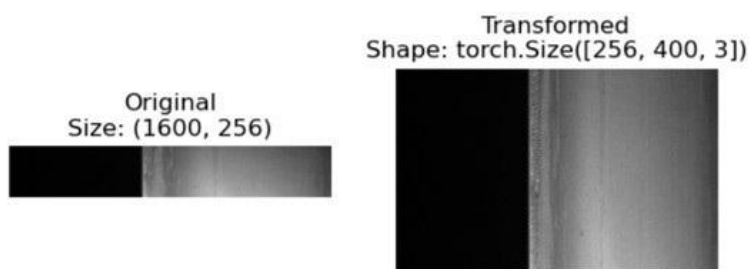


Рисунок 4 – Пример изображения до и после трансформации

Процесс обучения

В процессе обучения на вход нейронной сети предъявляются данные из обучающей выборки и, в соответствии со значениями выходных сигналов, определяющих ошибку функционирования сети, производится коррекция весов связей. В результате обучения должна быть получена нейронная сеть, которая без перенастройки весов связей формирует с требуемой погрешностью выходные сигналы Y при подаче на вход сети любого набора входных сигналов из обучающего множества. Качество обученной нейронной сети проверяется с использованием данных, не участвовавших в процессе обучения.

В процессе обучения происходит коррекция значений весов связей. Одна итерация всех наборов данных из обучающей выборки вместе с коррекцией весов составляет одну эпоху обучения. Длительность обучения нейронной сети составила 1000 эпох.

В результате обучения возникает проблема переобучения сети. Дело в том, что обучающая выборка может содержать неточности. Длительное обучение сети может привести к тому, что обученная сеть будет в процессе работы повторять эти неточности на обучающей выборке, что приводит к росту ошибки на тестовой выборке. Поэтому обучение прерывается, когда ошибка на тестовой выборке начинает расти.

Оценка качества обучения модели

Исходная выборка содержала 12000 экземпляров, после процедуры выравнивания количества классов, размер выборки вырос до 34560 экземпляров.

После разделения выборки на обучающую и тестовую, в тестовую выборку попало 8640 экземпляров, по 2160 экземпляров каждого класса.

Для оценки качества работы классификатора использовались следующие метрики: матрица ошибок (ConfusionMatrix), аккуратность (Accuracy), точность (Precision), Полнота (Recall) и F-мера. Результаты расчета оцениваемых метрик представлены в таблицах 1 и 2

Матрица ошибок (ConfusionMatrix) позволяет визуализировать производительность алгоритма контролируемого обучения (при неконтролируемом обучении его обычно называют матрицей сопоставления). Каждая строка матрицы представляет истинные экземпляры, в то время как каждый столбец представляет прогнозируемые экземпляры, или наоборот. Название матрицы связано с тем, что она позволяет легко увидеть, не путает ли система два класса (т.е. обычно неправильно маркирует один как другой).

Аккуратность (Accuracy) метрика зависит от дисбаланса классов:

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

где: TP True Positive - истинно-положительные прогнозы; TN True Negative – истинно-отрицательные прогнозы; FP False Positive – ложноположительные прогнозы; FN False Negative – ложноотрицательные прогнозы

Точность (Precision) называется доля правильных ответов модели в пределах класса – это доля объектов, действительно принадлежащих данному классу относительно всех объектов, которые система отнесла к этому классу. Не зависит от дисбаланса классов:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Полнота (Recall) это доля истинно положительных классификаций. Полнота показывает, какую долю объектов, реально относящихся к положительному классу, мы предсказали верно. Не зависит от дисбаланса классов:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

F-мера (англ. F-score) представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Она стремится к нулю, если точность или полнота стремится к нулю.

$$F = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \quad (4)$$

Таблица 1 – Матрица ошибок

Класс	0	1	2	3
0	1828	127	98	107
1	119	1748	134	159
2	125	114	1808	113
3	215	201	216	1528

Таблица 2 – Результаты расчета метрик

Accuracy	Precision	Recall	F-score
0,744	0,744	0,744	0,737

Заключение

В процессе работы была построена и обучена сверточная нейронная сеть. Данная сеть позволила обнаружить и классифицировать дефект стали на основе его изображения с точностью 74.4%. Актуальность данного показателя также проверена на основе еще четырех метрик. В целом, согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что существует принципиальная возможность автоматизации систем мониторинга повреждений на базе сверточных нейронных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malamas, E. N., Petrakis, E. G., Zervakis, M., Petit, L., & Legat, J.-D. A survey on industrial vision systems, applications and tools. // *Image and Vision Computing*, 21(2). - 2003. - P.171-188.
2. Казаков А.А., Ковалев П.В., Андреева С.Д., Зинченко С.Д., Немтинов А.А., Дробинин А.А., Природа дефектов горячекатаного листа из трубных марок стали. Часть 2. Дефекты, образовавшиеся на этапе прокатного производства. [Текст]/Черные металлы, декабрь 2008, с. 10 – 14.
3. Балясников В.В., Ведерников Ю.В., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Модель причинного анализа на основе использования данных об особых ситуациях // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2015. № 1-2 (79-80). С. 31-38.
4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Чварков С.В. Модель и алгоритм оптимизации решений по технической подготовке предприятия к выполнению государственного оборонного заказа // *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России*. 2020. № 4. С. 5-11.
5. Гасюк Д.П., Романовская В.Е. Управление рисками менеджмента качества в условиях удалённого режима работы персонала организации // *Кластеризация цифровой экономики: Глобальные вызовы: Сборник трудов национальной научно-практической конференции с зарубежным участием*. В 2-х томах. Под редакцией Д.Г. Родионова, А.В. Бабкина. 2020. С. 24-31.
6. Гасюк Д.П., Вырвич А.А., Ватутин А.И., Есин Б.В., Прилепа К.Н. Управление рисками аудита систем менеджмента качества // *Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: Научные труды Высшей школы машиностроения*.- Санкт-Петербург, 2022. С. 228-237.
7. Гасюк Д.П., Валуйских Ю.А. Создание и внедрение системы менеджмента качества на предприятии машиностроения на основе риск-ориентированного мышления // *Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых*.- Санкт-Петербург, 2022. С. 444-449.
8. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Техничко-экономическое обоснование применения метода обнаружения и оценки рисков в экспериментальном машиностроении // *Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых*.- Санкт-Петербург, 2022. С. 455-461.
9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

10. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.
11. Ren Z. et al. State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision // Int. J. Precis. Eng. Manuf. // Green Technol. - 2022. - V. 9. - № 2. - P. 661–691.
12. Severstal: Steel Defect Detection. Can you detect and classify defects in steel? : [сайт]. URL: <https://www.kaggle.com/competitions/severstal-steel-defect-detection/data?select=train.csv> (дата обращения: 31.10.2022).
13. Fang X. Understanding deep learning via backtracking and deconvolution // J. Big Data. - 2017. - V. 4. - № 1. - P. 1–14.
14. CNNE explainer. : [сайт]. URL: <https://poloclub.github.io/cnn-explainer/> (дата обращения: 31.10.2022).
15. 04.PyTorch Custom Datasets - Zero to Mastery Learn PyTorch for Deep Learning. : [сайт]. URL: https://www.learnpytorch.io/04_pytorch_custom_datasets/#7-model-0-tinyvgg-without-data-augmentation (дата обращения: 31.10.2022).
16. How to Train State-Of-The-Art Models Using TorchVision’s Latest Primitives | PyTorch. : [сайт]. URL: <https://pytorch.org/blog/how-to-train-state-of-the-art-models-using-torchvision-latest-primitives/#break-down-of-key-accuracy-improvements> (дата обращения: 31.10.2022).
17. Transforming and augmenting images – Torchvision 0.14 documentation. : [сайт]. URL: <https://pytorch.org/vision/stable/transforms.html> (дата обращения: 31.10.2022).

K. Aubekero, S. Koptsev, A.Yu. Skriabnev
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, scarts@mail.ru

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN THE PROBLEM OF CLASSIFICATION OF DEFECTS ARISING DURING STEEL PRODUCTION

Abstract

The paper considers the possibility of using computer vision to detect and classify defects that occur during steel production. The advantages of using computer vision for defect detection are described. To solve the problem, a neural network was built and trained based on six convolutional layers. The network was trained and tested on a dataset of 12,000 images. Five metrics were used to evaluate the performance of the model.

Keywords: computer vision, steel defect detection, convolutional neural network.

С.Г. Колесников, М.В. Корнаков, А.В. Репин
Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия,
valentin.larkin@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЗАГРУЖЕННОСТИ УЗЛОВ И СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ НИМИ

Аннотация

Цель исследования. Предложить подход к реализации сервиса гео-балансировки запросов к кластерам хранения данных с учетом нагрузки узлов хранения. *Актуальность темы* исследования состоит в постановке проблемы, связанной с раскрытием в работе подхода повышения эффективности функционирования информационной системы за счет реализации сервиса запросов к кластерам хранения данных с учетом нагрузки узлов, сетевого взаимодействия с применением способа гео-балансировки. *Методологию исследования* образуют модели и алгоритмы, составляющих программный комплекс балансировки нагрузки и репликации в кластерных системах. *Результатом* проведенного исследования является раскрытие подходов к кластеризации баз данных, при котором кластера размещены на различных физических устройствах. *Выводы и заключения:* сформулированы выводы о основных методах репликации, кластеризации данных, выявлены их преимущества и недостатки. Предложена методика реализации гео-балансировки между кластерами баз данных с учетом загрузки узлов и сетевого взаимодействия между ними.

Ключевые слова: тип масштабируемости, способы кластеризации данных, методика, модель, функционирование, надежность.

Введение

Современные информационные системы (ИС) по своей структурной сложности, сложности функционирования, выбора поведения и развития относятся к классу сложных систем и в задачах повышения эффективности подлежат исследованию методами системного анализа. Системный подход к решению сложных проблем предполагает необходимость целостного учета всех существенных для этих проблем факторов. В первую очередь, это касается влияния мировых тенденций в динамике развития общественно значимых технологий [1 - 6].

Современные тенденции развития сетевых технологий приводят к постепенному обеспечению всех должностных лиц к различным информационным системам с назначения и предоставлением всем пользователям возможности связи со всеми должностными лицами [7 - 11].

В условиях внешних воздействий существует и нарастает отставание возможностей оперативного изменения конфигурации информационной системы (ИС) от динамики изменения требований к функционированию ИС.

Потребность в информационных ресурсах деятельности во многом определяются спецификой области совместной деятельности подсистем [12 - 18].

Доминирующим принципом является «знать только необходимое»: независимо от занимаемой должности в организации должностное лицо должен получать только ту информацию, которая ему необходима для выполнения его обязанностей. Следует

четко установить правила распространения информации (политику информационного обеспечения и – как ее неотъемлемую составляющую – политику информационной безопасности), с тем, чтобы обеспечить необходимую осторожность, но и не отказывать в информации тем, кто в ней нуждается [19 - 24].

Данный фактор заставляет задуматься разработчиков серверных приложений о размещении дата-центров в различных уровнях управления деятельностью органов управления для более быстрого предоставления услуг пользователям и реализации гео-балансировки между пользователями и сервером.

Размещение дата-центров в различных вычислительных центрах, неравномерно распределенных по территории, приводит к увеличению времени по предоставлению услуг, а также к резкому увеличению расходов на содержание дата-центров.

Ведь не известно какая часть пользователей – должностных лиц будет заинтересована в предоставляемой услуге и какой дата-центр необходим.

Производить оценку предполагаемой нагрузки на сервис, эффективности функционирования, является очень приближенным способом и может давать большую погрешность. По данной причине необходим способ оптимизации нагрузки на сервисы без резкого увеличения инфраструктуры.

Методы

Любая система обработки данных должна представлять высокую структурную надежность работы вне зависимости от местонахождения и количества пользователей – должностных лиц. Свойство устойчивости системы, при увеличении рабочей нагрузки при добавлении ресурсов называют еще масштабируемостью.

Выделяют два типа масштабируемости [25]:

1. Горизонтальная масштабируемость – разделение системы на компоненты и разнесение их на отдельные устройства. Горизонтальное масштабирование предполагает создание общей сети обработки данных, а также реализацию алгоритма по распределению нагрузки и мониторинга нагрузки;

2. Вертикальное масштабирование – увеличение производительности компонентов системы за счет улучшения характеристик физического устройства: центрального процессорного устройства, графического процессорного устройства и накопителя жесткого магнитного диска. Основным недостатком данного подхода заключается в пределе улучшения характеристик физического устройства, но является более простым по сравнению с горизонтальной масштабируемостью.

В отличие от вертикального подхода горизонтальный позволяет располагать компоненты системы в различных дата-центрах, что позволяет уменьшить время на сетевые задержки связи с пользователем.

Для реализации горизонтального масштабирования информационной системы необходимо реализовать следующий функционал:

1. Функционал распределенного хранения данных на различных узлах – дата-центрах;

2. Функционал выполнения транзакций на различных узлах;

3. Функционал обработки запросов пользователей.

Кластеризация данных – задача разделения множества объектов на группы, называемые кластерами. Можно выделить два подхода к кластеризации баз данных [25, 26], при котором кластера размещены на различных физических устройствах.

Шардирование данных – подход кластеризации баз данных, предполагающий разделение баз данных на независимые сегменты, каждый из которых управляется

отдельным экземпляром сервера базы данных, размещенных на отдельных вычислительных узлах.

Второй способ в кластеризации данных называется репликация данных, включающий Master-slave и Master-master репликации.

Master-slave – репликация, подразумевающая выделение master-узла, с которого все остальные узлы будут дублировать информацию. В борьбе за живучесть, при выходе из строя master-узла другой узел принимает на себя данную ответственность и становится новым master-узлом. Для защиты от Split-brain в кластере может быть только один master-узел. Схема взаимодействия master-slave репликация изображена на рисунке 1.

Master-master репликация – репликация, подразумевающая равноправное выполнение инструкции между узлами. Каждый узел передает остальным узлам информацию об изменениях хранящихся данных. Схема взаимодействия master-master репликация изображена на рисунке 2.

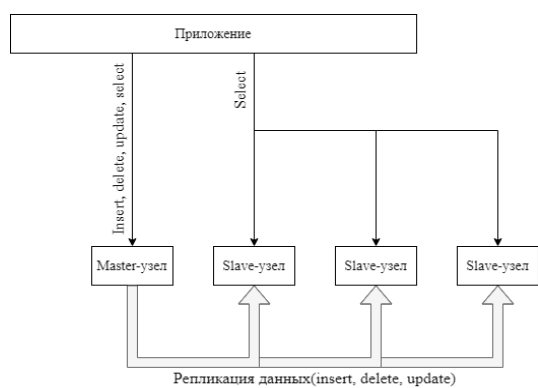


Рисунок 1 – Схема взаимодействия master-slave репликация

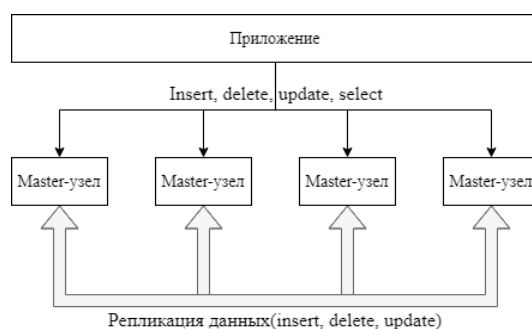


Рисунок 2 – Схема взаимодействия master-master репликация

Репликация данных – подход кластеризации баз данных, предполагающий полное копирование данных на все узлы кластера. Данный подход предполагает большой объем физических мощностей на каждом узле, чем при шардировании данных, а также обеспечивает защищенность от потери данных при потере одного из узлов. Сравнительный анализ подходов кластеризации представлены в таблице 1.

Результаты и обсуждение

Как было написано ранее для уменьшения скорости передачи данных кластеры обработки данных стараются расположить как можно ближе к пользователю, что ведет к развертыванию дополнительных дорогостоящих дата-центров. Предложен вариант реализации гео-балансировщика запросов к кластерам баз данных с учетом нагрузки на узлы кластера, а также сетевого взаимодействия между остальными кластерами, расположенные в удалении друг от друга.

На рисунке 3 представлена схема взаимодействия пользователей – должностных лиц с тремя кластерами с различным местонахождением. Сетевая гео-балансировка, установленная на устройствах пользователя – должностного лица и удаленного дата-центра, определила неравномерную балансировку, так как отсутствует информация о загруженности кластера.

Как видно из рисунка 3 на первый кластер приходится большая нагрузка, а на остальные два находятся в режиме простоя. Предложим ввести новый уровень взаимодействия между пользователем и кластерами. На рисунке 4 представлена преобразованная схема взаимодействия пользователей с кластерами.

Таблица 1 – Сравнительный анализ подходов кластеризации баз данных

Подход к кластеризации данных	Преимущества	Недостатки
Репликация данных	Защита данных при потере одного из узлов	Потребляет больше вычислительных мощностей на каждом из узлов
	Возможность выполнить запрос на определенном количестве узлов в зависимости от его сложности	
Шардирование данных	Отсутствие необходимости наращивания характеристик физического устройства (увеличение оперативной памяти, накопителей на жестких магнитных дисках, процессорных устройств) для поддержания работоспособности, вместо этого вводятся дополнительные физические устройства	Недоступность части данных при недоступности одного из узлов
		Все узлы участвуют в обработках данных от пользователя



Рисунок 3 – Схема взаимодействия пользователей с кластерами без балансировки запросов



Рисунок 4 – Схема взаимодействия пользователей с кластерами с балансировкой запросов

Реализуем 4 кластер балансировки нагрузки между основными кластерами хранения данных, узлы которого будут находиться в сетевой близости к основным кластерам. Каждый балансировщик может взаимодействовать со всеми основными кластерами, а также обмениваться информацией о загруженности кластеров между другими балансировщиками. Из рисунка 4 видно, что первый кластер испытывает недостаток в вычислительных мощностях, основной задачей балансировщика, закрепленного за данным кластером, является исправить данный факт. Для этого необходимо распределить нагрузку между ближайшими свободными основными кластерами и произвести при необходимости рестарт узлов, вышедших из кластера. Требуемый функционал для распределения нагрузки кластера:

1. Мониторинг загруженности узлов кластера;
2. Доступ к общим данным загруженности кластеров системы;
3. Доступ к общей доступности узлов системы;
4. Доступ к карте кластеров с сетевым расстоянием между кластерами (время передачи данных, количество переходов);
5. Возможность функционировать с различными основными кластерами/узлами основных кластеров;
6. Возможность перезапуска узлов.

Исходя из рисунка 4 рассмотрим основные операции, которые должен произвести кластер 1 для балансировки нагрузки:

1. Произвести поиск ближайшего балансировщика;
2. Произвести анализ загруженности узлов, принадлежащих ближайшему балансировщику. Выделить среди них узлы, которые могут принять пользовательские запросы;
3. Отправить часть запросов на другие узлы;
4. Произвести анализ собственного основного кластера с установлением причин проблематики (увеличение пользовательских запросов, выход одного из узлов), при необходимости произвести перезапуск необходимых узлов;

На рисунке 5 представлена функциональная схема кластера гео-балансировки.

Узлы балансировки обладают следующим функционалом:

- Failover-сервис – сервис, позволяющий приводить узлы кластера в аварийное состояние для их дальнейшего восстановления или перезапуска;
- Мониторинг ресурсов – сервис, производящий мониторинг ресурсов на каждом узле собственного основного кластера с записью в общий хэш информации о доступности узлов;
- Сетевой мониторинг – сервис, производящий построение карты кластеров с хранением расстояния между кластерами, а также мониторинг завершенности транзакции между узлами и готовности их к работе.

Кластер балансировки обладает единым для всех балансировщиков хэшем информации о карте кластеров, информацией о доступности узлов, завершенности транзакции.

Для отслеживания завершенности транзакции кластер балансировки нагрузки может использовать следующие стратегии:

- самостоятельно дублировать все запросы обновления данных на все основные кластера обработки данных и вести единый хэш завершенности транзакции. Основной проблемой является возрастание нагрузки на каждый кластер;- использование сторонних средств репликации, таких как «Oracle Golden Gate», который позволяет настроить репликацию без возрастания нагрузки на кластер.

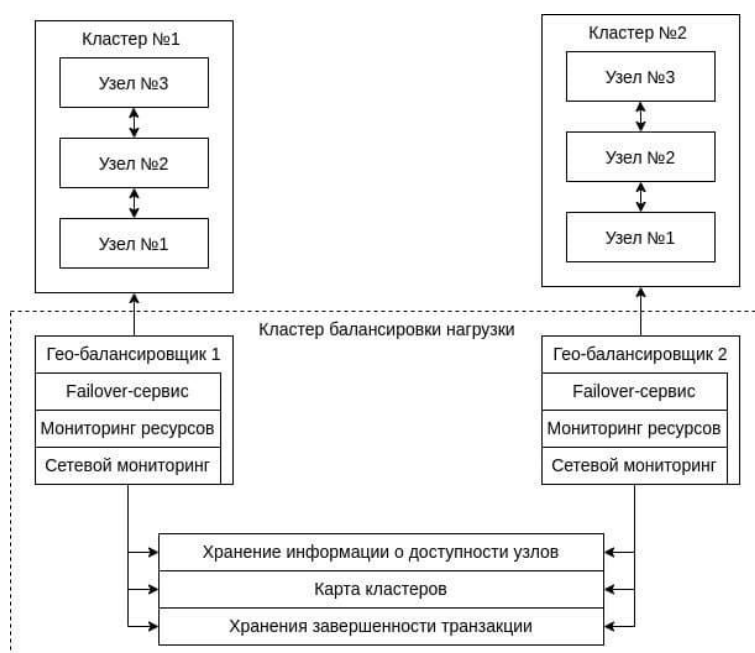


Рисунок 5 – Функциональная схема кластера гео-балансировки

Заключение

В статье рассмотрены различные способы достижения эффективности функционирования информационной системы. Изучены основные методы репликации, кластеризации данных, выявлены их преимущества и недостатки. Предложена методика реализации гео-балансировки между кластерами баз данных с учетом загруженности узлов и сетевого взаимодействия между ними, где основной функционал должен выполнять гео-балансировщик запросов.

Реализация данного балансировщика позволит уменьшить затраты на развертывание дорогостоящих дата-центров, производить анализ загруженности сервисов в дата-центрах, распределять нагрузку кластеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белых А. А. Проблема повышения эффективности информационных систем в современных условиях. Научный журнал КубГАУ, №58(04), 2010 г.
2. Тебекин А.В., Анисимов Е.Г., Тебекин П.А., Егорова А.А. Обеспечение качества жизни в городской среде с помощью технологий "умный город"// Транспортное дело России. 2020. № 2. С. 11-17.
3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Зегжда П.Д., Супрун А.Ф. Проблема инновационного развития систем обеспечения информационной безопасности в сфере транспорта // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2017. № 4. С. 27-32.
4. Гарькушев А.Ю., Курилов А.В., Супрун А.Ф., Гасюк Д.П. Методика оценки показателей качества информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. С. 56-61.
5. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.
6. Анисимов Е.Г. Межведомственное информационное взаимодействие в сфере обороны Российской Федерации / Е.Г. Анисимов, В.Г. Анисимов [и др.]. - Москва:

Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, Военный институт (управления национальной обороной), 2017. - 198 с.

7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Осипенков М.Н., Сазонов А.М., Чварков С.В. Основы оценивания эффективности межведомственного взаимодействия при решении задач обеспечения обороны и безопасности государства // Вестник Академии военных наук. 2020. № 4 (73). С. 32-41.

8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Белов А.С., Трахинин Е.Л. Моделирование возможных последствий внешних информационных воздействий на распределенную сеть связи // Телекоммуникации. 2020. № 12. С. 32-38.

9. Зегжда П.Д., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Сауренко Т.Н. Эффективность функционирования компьютерной сети в условиях вредоносных информационных воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2021. № 1. С. 96-101.

10. Носов М.И. Применение современных информационных технологий в автоматизированной системе управления материально-технического обеспечения // Сборник материалов конференции. – Москва: 3 ЦНИИ Минобороны России, 2015 г. – С. 129-138.

11. Носов М.И., Карганов В.В. Концептуальные подходы моделирования единого информационного пространства подсистем специального назначения, М.: Военная мысль. 2019. № 1. С. 120-128.

12. Носов М.И. Концептуальные подходы по интеграции автоматизированной системы научно-технической экспертизы в существующие и разрабатываемые автоматизированные системы военного назначения/М.И. Носов// Научно-деловая программа международного военно-технического форума "АРМИЯ-2018". Кубинка - Военно-патриотического парка культуры и отдыха Вооружённых Сил Российской Федерации "Патриот": «Система научно-технической экспертизы результатов фундаментальных, прикладных и поисковых исследований. Актуальные проблемы и пути их решения». 24 августа 2018г.

13. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М. Модель оценки эффективности информационного обеспечения применения высокоточного оружия в контртеррористических операциях // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 1-2 (79-80). С. 44-53.

14. Анисимов Е.Г., Селиванов А.А., Анисимов В.Г. Расчет эффективности межведомственного информационного взаимодействия в области обороны государства // В сборнике: Система межведомственного информационного взаимодействия при решении задач в области обороны Российской Федерации: Сборник материалов II Межведомственной научно-практической конференции.- Национальный центр управления обороной Российской Федерации; 2016. С. 21-26.

15. Черныш А.Я., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Оценка эффективности перспективных автоматизированных информационно-управляющих систем военного назначения на основе натуральных испытаний // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2022. № 1. С. 37-41.

16. Ямпольский С.М., Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г. Научно-методические основы информационно-аналитического обеспечения деятельности органов государственного и военного управления в ходе межведомственного

информационного взаимодействия.- Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации Военный институт (управления национальной обороной). 2019.- 146 с.

17. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Гарькушев А.Ю., Селиванов А.А. Показатели эффективности межведомственного информационного взаимодействия при управлении обороной государства // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 7-8 (97-98). С. 12-16.

18. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

19. Анисимов В.Г., Зегжда П.Д., Супрун А.Ф., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А. Риск-ориентированный подход к организации контроля в подсистемах обеспечения безопасности информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2016. № 3. С. 61-67.

20. Зегжда Д.П., Сауренко Т.Н., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Оценка эффективности системы информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 4 (52). С. 9-19.

21. Зегжда П.Д., Супрун А.Ф., Анисимов В.Г., Тебекин А.В., Анисимов Е.Г. Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 4. С. 45-49.

22. Анисимов В.Г., Селиванов А.А., Анисимов Е.Г. Методика оценки эффективности защиты информации в системе межведомственного информационного взаимодействия при управлении обороной государства // Информация и космос. 2016. № 4. С. 76-80.

23. Кежаев В.А., Гасюк Д.П., Николаев Г.А. Концептуальные вопросы защиты сетевых систем управления в эпоху информационного противоборства конфликтующих сторон // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2016. № 4. С. 113-118.

24. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Zegzhda P.D., Saurenko T.N., Prisyazhnyuk S.P. Indices of the effectiveness of information protection in an information interaction system for controlling complex distributed organizational objects // Automatic Control and Computer Sciences, 2017. Т. 51. № 8. С. 824-828.

25. Дворников В.С., Долгов В.В., Венцов Н.Н. Обзор методов балансировки нагрузки в гетерогенных распределенных файловых системах // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9-2. – С. 295-302; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41743> (дата обращения: 28.08.2022).

26. Global Server Load Balancing (GSLB) for Enterprise, August 12, 2022, Chris Yoo. <http://www.netmanias.com/en/post/blog/7637/dns-gslb-network-protocol/global>.

C.G. Kolesnikov, M.V. Kornakov, A.V. Repin
Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Saint Petersburg, Russia,
valentin_larkin@mail.ru

**MODELING THE OPERATION OF AN INFORMATION SYSTEM
TAKING INTO ACCOUNT THE WORKLOAD OF THE NODES AND THE
NETWORK INTERACTIONS BETWEEN THEM**

Abstract

The purpose of the study. To propose an approach to the implementation of the geo-balancing service for requests to data storage clusters, taking into account the load of storage nodes. The relevance of the research topic is to pose a problem related to the disclosure in the work of an approach to improving the efficiency of the information system by implementing a service for requests to data storage clusters, taking into account the load of nodes, network interaction using the geo-balancing method. The research methodology is formed by models and algorithms that make up the software package for load balancing and replication in cluster systems. The result of the conducted research is the disclosure of approaches to database clustering, in which clusters are placed on various physical devices. Conclusions and conclusions: conclusions about the main methods of replication, clustering of data are formulated, their advantages and disadvantages are revealed. A methodology for implementing geo-balancing between database clusters is proposed, taking into account the workload of nodes and network interaction between them.

Keywords: type of scalability, data clustering methods, methodology, model, functioning, reliability.

А.С. Рымхан, Г.Б. Абдугалиева
Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова,
Караганда, Казахстан, aigerim.rymkhan@mail.ru

РАСЧЕТ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ КОСТЕНКО

Аннотация

В связи с увеличением объемов добычи и переработки полезных ископаемых, а также углублением карьеров и шахт проблема транспортировки становится все более актуальной. Возможности традиционных видов транспорта горных предприятий (железнодорожного и автомобильного) практически исчерпаны. Практикой эксплуатации угольных шахт и карьеров с рыхлыми вмещающими породами доказана эффективность конвейерного транспорта. На предприятиях ряда отраслей промышленности транспорт грузов не только органически связан с технологическими процессами, но и оказывает большое влияние на всю экономику производства. Правильный выбор подъемно-транспортного оборудования является решающим фактором высокой продуктивности производства.

Ключевые слова: Ленточный конвейер, конвейерный транспорт, непрерывная перевозка, конвейерные ролики, конвейерная лента.

Наиболее прогрессивным направлением в развитии промышленного транспорта является его полная конвейеризация. В настоящее время наиболее широкое распространение получили ленточные конвейеры, при помощи которых можно транспортировать различные грузы на большие расстояния. Причем в некоторых случаях ленточные конвейеры оказываются значительно экономичнее автомобильного и даже железнодорожного транспорта. Особенно хорошие показатели дает применение ленточных конвейеров при разработке полезных ископаемых карьерным способом.

Транспортируемый материал попадает на ленту через загрузочную воронку и, располагаясь на ней слоем, уносится в направлении движения. Загрузочные воронки бывают неподвижные, когда погрузка производится в одном месте ленты, и подвижные, когда возможно грузить материалы в любом месте по длине конвейера. Разгрузка материала происходит либо на конце конвейера, либо в промежуточных пунктах, для чего применяются специальные сбрасывающие устройства. Грузы, транспортируемые лентой, могут быть сыпучие (уголь, кокс, руда, щебень, цемент, песок, зола и т. п.) или штучные (кирпичи, ящики, мешки, тюки и т. п.). Направление передвижения грузов может быть горизонтальным, наклонным или смешанным (наклонным и горизонтальным).

При равномерной загрузке ленточные конвейеры работают достаточно удовлетворительно даже при углах наклона больше указанных, так как в этом случае частицы перемещаемого материала как бы поддерживаются расположенным ниже материалом.

При прекращении подачи материала на конвейер или неравномерной его подаче происходит *скольжение* крайних частиц материала по ленте, так как он не

задерживается последующими порциями. Поэтому при неравномерной подаче материала следует брать несколько меньшие значения угла наклона ленты.

При подаче штучных грузов угол наклона ленточных конвейеров выбирается в зависимости от характера перемещаемых грузов (обычно не более 18°), так как при больших углах наклона грузы сползают с ленты, образуя завалы в хвостовой части конвейера.

Применение конвейеров на горнодобывающих предприятиях со скальными породами обусловлено степенью их пригодности для крупнокусковых грузов или подготовленности горной массы к транспортированию. В работах, посвященных транспортировке конвейерами скальных пород, нет единого подхода к оценке явлений и процессов, происходящих при доставке крупнокусковой горной массы, принципов конструирования и расчета таких установок. Целью настоящей монографии является разработка единого подхода к расчету и конструированию ленточных конвейеров для крупнокусковых горных пород, а также отдельных их элементов.

Конвейерами называются транспортные установки, обеспечивающие непрерывную одновременную погрузку, разгрузку и транспортировку материала специальным тягово-несущим органом. Для ленточного конвейера таким органом является резинотканевая или резинотросовая лента. Основные преимущества ленточного конвейера по сравнению с другими установками непрерывного действия – большие скорости транспортировки и тяговые усилия на один привод.

Большая скорость на ленточных конвейерах обусловлена высокой пропускной способностью погрузочно-разгрузочных узлов, качественным состоянием конвейерной трассы, сравнительно малой погонной массой движущихся частей, устойчивостью движения и долговечностью конвейерной ленты.

Для ленты характерна пропорциональность допустимой тяговой нагрузки ее ширине и числу прокладок.

Например, для резинотросовой ленты РТЛ-6000 шириной $B = 2400$ мм допустимая нагрузка $S_{\text{доп}} = 1,8 \cdot 10^6$ Н. Длина одного става при такой прочности ленты достигает 6 км по горизонтали (при погонной массе груза 800 кг/м). Примерно такие же свойства имеют и зарубежные резинотканевые конвейерные ленты.

Для ленты РА-700 шириной $B = 2000$ мм допустимая тяговая нагрузка составляет $0,84 \cdot 10^6$ Н.

Конвейеры на открытых разработках обеспечивают большую производительность (10 – 20 тыс. т/ч), дальность транспортировки (на десятки километров) [1], угол подъема (до $0,35$ рад), а также полное соблюдение экологических условий.

Однако для конвейеров, в отличие, например, от железнодорожного и автомобильного транспорта, требуется высокая степень подготовленности горной массы, соблюдение прямолинейности трассы. При комбинированных видах карьерного транспорта (железнодорожно- и автомобильно-конвейерного) необходима высокая организация и ритмичность работы всех звеньев системы.

Для увеличения угла подъема конвейера на ленту иногда нашивают или клеивают поперечные полоски резиновой ленты, препятствующие сползанию груза. Применять поперечные полоски обычно можно только в тихоходных конвейерах небольших размеров, так как при больших скоростях поперечные полоски вызывают неравномерный ход холостой ветви по роликам.

Основные параметры и габариты ленточных стационарных конвейеров общего назначения должны соответствовать ГОСТ 1596-53.

Основным недостатком ленточных конвейеров является повышенный износ ленты при транспортировании крупнокусковых, абразивных и острогранных материалов. Срок службы ленты может быть значительно удлинен при весьма тщательном наблюдении и уходе за ней.

Нечеткие рекомендации и по выбору скорости транспортирования. Например, согласно работе [2] для скальных пород и руд выбор скорости транспортирования определяется производительностью установки независимо от гранулометрического состава и крупности кусков груза. В работе [2] скорость предложено выбирать в зависимости от ширины ленты и крупности кусков, но их крупность ограничена размерами до 0,35 м. Неосвещенным остался вопрос о факторах, ограничивающих значение скорости (какую скорость следует принимать в зависимости от параметров конвейерной ленты, конструкции опорной части, крупности кусков). Возможно, что фактором ограничения скорости будет взаимодействие крупных кусков с лентой и роlikоопорой. Одним из первых на этот вопрос попытался ответить А. В. Коваль [2]. Скорость транспортирования ограничена критическим значением, при котором коэффициент динамичности взаимодействия куска с роlikоопорой равен двум. Это ограничение получено при условии, что при таком коэффициенте динамичности происходит отрыв куска от ленты с вероятным его выбросом за борт.

В современном массовом и крупносерийном производстве конвейеры являются неотъемлемой частью технологического процесса; они регулируют темпы производства, обеспечивают его ритмичность, повышают производительность труда и увеличивают выпуск, а также решают сложную механизацию и автоматизацию транспортных и технологических процессов.

Прямое соединение конвейерных машин с общим технологическим процессом производства предъявляет к ним особые требования к прочности и способности работать в автоматических режимах.

Новые конвейеры должны быть достаточно прочными, надежными, долговечными и экономичными в эксплуатации, а их производство должно производиться с наименьшими затратами материалов и рабочей силы. Для этого требуются комплексные теоретические и экспериментальные исследования и на основе их результатов - дальнейшее совершенствование методов расчета конвейеров. При решении практических вопросов, связанных с расчетом, проектированием и эксплуатацией конвейеров, возникают трудности из-за отсутствия систематического материала для непрерывных транспортных машин.

Значительная часть типов непрерывных транспортных машин в настоящее время унифицирована и производится рядом установок по тем же чертежам. Это, в первую очередь, относится к ленточным конвейерам общего назначения (рисунок 2), к несущим конструкциям, тележкам для литейных форм и т. д. Часть машин доставляется изготовителями отдельными сборками на основе монтажные чертежи конвейерной установки, разработанных с учетом конкретных условий. Металлическая несущая конструкция, на которой смонтированы узлы конвейера, в большинстве случаев не обеспечивается заводом-изготовителем и производится на месте организацией по установке или клиентом в соответствии с рабочими чертежами, разработанными для каждой конкретной установки. Таким образом, поставляются конвейерные ленты общего назначения, много скребковых, ленточных

конвейеров, подвешенные грузоподъемные и толкающие, конвейерные ленты, ряд лифтов.

Тесная взаимосвязь транспортных средств с общим технологическим участием определяет высокую ответственность их работы и назначения. Поэтому конвейеры должны быть надежными (надежными), прочными, простыми в эксплуатации и способными работать в автоматических режимах.

Современное развитие всех отраслей промышленности определяет следующие основные тенденции в развитии конвейерных машин.

Создание машин для непрерывной транспортировки товаров от начальной до конечной точки по прямому и сложному пространственному пути в значительной степени. Это направление зависит от создания многоприводных конвейеров различных типов (подвесных, пластинчатых, скребковых, ленточных), мощных ленточных конвейеров с тяжелыми ремнями, ленточно-веревочных и ленточных цепных транспортеров с сильным тяговым элементом в форме каната или цепи, изогнутых скребковых и ленточных конвейеров, разветвленных систем подвесных толкающих конвейеров, трубчатых скребковых конвейеров с пространственным путем и т. д.

Конвейер - непрерывная машина для перемещения сыпучих, кусковых или штучных грузов. Конвейеры наиболее целесообразно классифицировать в соответствии с принципом действия и конструктивными характеристиками, типом тягового и весового органа, типом транспортируемого груза, целью и областями применения.

Главной классификационной особенностью конвейера является тип тяговых и несущих конструкций. Имеются конвейеры с лентой, цепью, веревкой и другими тяговыми органами, и конвейерами без тягового органа (винт, инерционный, вибрирующий, ролик). В зависимости от типа несущего корпуса конвейеры могут быть: ленточными, пластинчатыми, скребковыми, подвесными, с тележками, ковшами или люлечными, а также винтовыми, инерционными, вибрирующими, роликовыми.

В современных предприятиях конвейеры используются как:

- высокопроизводительные транспортные средства, перевозящие товары из одной точки в другую на участках внутрихозяйственного и, в некоторых случаях, внешнего транспорта;

- транспортные агрегаты мощных перезагружающих устройств (например, перегружатели мостов, разбрасыватели и т. д.) и погрузочно-разгрузочные машины;

- машины для перемещения товаров через технологический процесс поточного производства с одной рабочей станции на другую, от одной технологической операции до другой, создание, организацию и регулирование темпов производства и комбинирования, в некоторых случаях, функций устройств хранения (передвижные склады) и грузовые распределители - продукция по отдельным технологическим линиям;

- машины и устройства передачи в технологических автоматических линиях для производства и обработки деталей и компонентов изделий.

Повышение производительности конвейерных установок осуществляется путем выбора наиболее рациональной формы несущего элемента, а также путем увеличения скорости несущих элементов.

- Повышение надежности машин и упрощение их технического обслуживания в суровых условиях, включая предпосылки для перехода на полную автоматизацию машинного и машинного управления.

- Автоматизация управления машинами и сложными конвейерными системами с использованием компьютеров.

- снижение веса и уменьшение габаритных размеров конвейеров благодаря принципиально новым, легким конструкциям машин и их компонентов, широкому применению пластмасс и легких сплавов, изогнутых металлических профилей вместо прокатки и т. Д.

- улучшение условий труда обслуживающего персонала и производственных работников, исключая возможность потери перевозимого груза, изоляцию от окружающей среды измельченных, горячих, карбонизирующих и химически агрессивных грузов.

- Унификация и нормализация оборудования с одновременным увеличением количества его стандартных размеров.

- Повышение качества и культуры производства за счет широкого применения передовых технологий и технической эстетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков, В.И. Представление и обработка нечеткой информации в многокритериальных моделях принятия решений для задач управления социальными и экономическими системами / В.И. Аверченков, А.В. Лагереv, А.Г. Подвесовский // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 2.- С. 97-104.

2. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / Под общ. ред. С.А. Ермакова. - М.: Машиностроение, 2018. - 312 с.

A.S. Rymkhan, G.B. Abdugalieva,
Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Kazakhstan, aigerim.rymkhan@mail.ru

CALCULATION AND SELECTION OF BELT CONVEYOR PARAMETERS IN THE CONDITIONS OF THE KOSTENKO MINE

Abstract

Due to the increase in the volume of mining and processing of minerals, as well as the increase in the volume of transportation of covering rocks, the deepening of quarries and mines, the problem of transportation is becoming more and more urgent. The possibilities of traditional modes of transport of mining enterprises (railway and automobile) are almost exhausted. The practice of operating coal mines and quarries with loose enclosing rocks has proven the effectiveness of conveyor transport. At the enterprises of a number of industries, cargo transportation is not only organically connected with technological processes, but also has a great impact on the entire economy of production. The right choice of lifting and transport equipment is a decisive factor in normal operation and high productivity of production.

Keywords: Conveyor belt, conveyor transport, continuous transportation, conveyor rollers, conveyor belt.

Н.Б. Садырбекова, Г.Б. Абдугалиева
Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда,
Казахстан, sone150100@mail.ru

РАСЧЕТ И ВЫБОР НАПРЯЖЕННОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ КОСТЕНКО

Аннотация

В современных условиях развития горно-добывающих предприятий, когда становится все более актуальными вопросы по повышению интенсивности процессов добычи, а так же увеличению глубины проведения работ, вопросы, связанные с управлением и поддержанием горных выработок становятся наиболее важными при исследовании и разработки технологий и методик проведения добычных работ.

Ключевые слова: Механизированная крепь, управление состоянием крепи, вспучивание почвы.

С целью решения таких вопросов, становится необходимым решение по снижению объема операций, производимых при проведении добывающих операций, использование комплексов, оснащенных интеллектуальной и высокоскоростной технологией контроля и обратной связи, и максимально обезопасить технологию проведения работ.

Следовательно, для определения условия работы в шахтах по добычи углы, в особенности в крайне сложных горно-геологических условиях, что прямо отражаются на технологии добычи, необходимо полностью изучить технологию проведения горных работ, методику исследования, отслеживания и управления горной массой над выработкой, в которой производится выемка полезного ископаемого, а также по породам, вмещающим исследуемый пласт [1].

Горный массив, в котором происходит добыча полезных ископаемых, строительство вспомогательных выработок и прочее, представляет собой неоднородную среду, состоящую из различных горных пород имеющих неодинаковую прочность, в некоторых случаях физическое состояние и возраст. Так в условиях производства горных пород могут встречаться как пласты, состоящие из песка, так и встречаются линзы с заключенной в них водой, газом.

Второй сложностью при проведении работ по добыче полезных ископаемых являются существенные изменения окружающей среды, которые в краткосрочной перспективе не обратимы [2].

Таким образом, можно отметить сложные горно-геологические условия при проведении добычи полезных ископаемых шахтным способом. Так же, при проведении добычи полезных ископаемых, отмечается удорожание части работ, в особенности связанные с методикой закрепления горных пород, при проведении очистных операций. Вопрос о улучшении операций выемки горных пород, является наиболее важным, так как он позволяет понизить экономические затраты на добычу, при увеличении экономической выгоды.

Процесс управления горным давлением, при проведении добычи полезных ископаемых шахтным методом, может быть решен только двумя методами, это

использование механизированных крепей, которые позволяют снижать или иными словами сбрасывать накопленную энергию деформации горных пород, путем их усадки, или же строительством новых сбросовых выработок.

Однако использования методики по созданию выработок для снижения горного давления, являются экономически более затратными [2].

Следовательно, актуальностью представленной работы является изучение процесса по управлению горным давлением, для создания экономически оправданных и относительно не металлоемких горных крепей, для интенсификации процесса управления горным давлением в условиях шахт опасных по газу и пыли, а также внезапным выбросам.

Как было сказано ранее, в современных источниках информации, об строении и состоянии горного массива существует большое количество вариаций по определению состоянием горного массива [1].

Наиболее точным определением может, служит следующее – горный массив по которому ведется добыча полезного ископаемого, строительство вспомогательных сооружений в условиях шахты является участок земной коры, которому присуще свои горно-геологические, гидрологические, температурные, магнитные и возрастные свойства.

Каждый из названных параметров является важным вопросом, который вносит существенное влияние на технологию выемки полезного ископаемого и вопросы, которые необходимо решать по мере работы.

Согласно существующих методик изучения, классификации и контроля за горным массивом, производят деление всего горного массива на ряд составных частей, так наиболее крупными частями горного массива являются блоки (Рисунок 1), пачки (Рисунок 2) и отдельно классифицируемые геологические объекты [2].

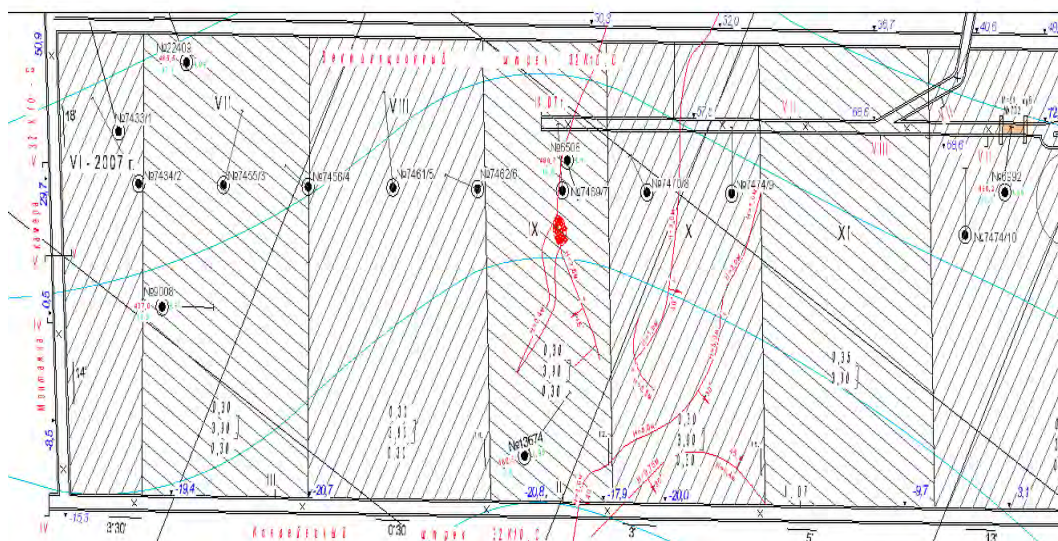


Рисунок 1 – Характерный вид блоков в условиях проведения работ по выемке горной массы в шахте

Основными градациями разделения выступают физические переходы одной слагаемой породы в другую, а также границы различных геологических формаций. Необходимо отметить тот факт, что деление на пачки блоки и иные геологические формации носит зачастую практический характер, так как физическое разделение

возможно, но в условиях интенсивного производства практически мало используется [3].

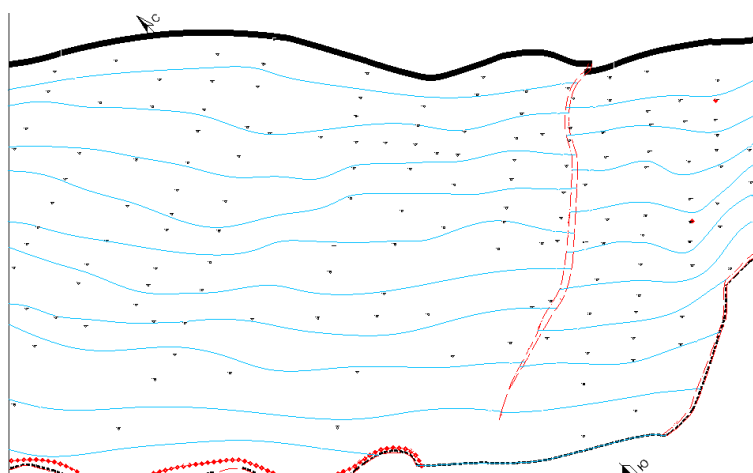


Рисунок 2 – Характерный вид пачки в условиях проведения работ по выемке горной массы в шахте

Как можно видеть из представленных данных, разделение угольных пластов на пачки, зачастую носит чисто утилитарный подход, поскольку вид угольной пачки, практически не заметен не вооруженному глазу. Однако, физические свойства, температурный режим, газоносность, водо-насыщенность и иные параметры у двух рядом находящихся пачек могут быть совершенно разными, что вносит дополнительные вопросы по добыче полезного ископаемого, но что более важно на управляемость вмещающих и вышележащих пород. В ряде источников [2] вводят понятие соразмерных структурных порядков, которые необходимо для составления математических зависимостей взаимного влияния и развития точек напряжения в горном массиве. Так, соразмерные структурные элементы или порядки представляют физически однородную структуру, состоящую из одного материала, в которой происходит накопление и передача напряжения в горном массиве. Однако, в самом определении присутствует ряд допущений, которые возможно использовать при создании математических описаний, которые соответствуют на 84,23% реальному поведению горного массива в условиях шахт. Согласно этому утверждению, для определения состояния горного массива можно отслеживать на глубину от 1 метра состояние массива.

Таким образом, большинство современных технологий, таких как анкирование складывающихся пород, исследование процессов развития трещин и прочее ориентируется на указанную глубину.

Однако, при создании систем мониторинга, необходимо отслеживать не только состояние окружающего массива на глубину более 1 метра, но и оценить влияние этого массива на весь геологический участок.

Комплекс мероприятий по развитию систем анализа и управления горным давлением в условиях отработки полезного ископаемого шахтным методом несет на себе несколько основных задач.

Первой задачей является создание единого комплекса управления и отслеживания ситуации при работе шахты, позволяющего оперативно и что более важно, правильно реагировать на внезапные кратковременные повышения давления в горном массиве.

Согласно ряду источников, при проведении очистных работ по углю в шахтах, имеющих средние глубины работы до 520 метров, и угли склонные к внезапным выбросам горной массы и газа интенсивность изменения горного давления в слагающих породах за одни оперативные сутки меняется от 0,6 МПа до 40 МПа.

При этом возрастание давление так же не имеет практического геометрического центра и может происходить практически по всей длине очистных штреков.

Следовательно, вторым фактором, который необходимо учитывать при решении по созданию системы по управлению горным давлением является система, позволяющая локально управлять не только блоками секций крепи, а отдельными элементами, позволяя производить усиление при локальных нагрузках.

Так же следует учитывать сложные горно-геологические условиях угольных шахт, так например, при использовании высокомошных механизированных крепей можно решить проблему по учету локального возрастания давления и способности крепи ее воспринимать, однако ремонт такого типа в подземных условиях не возможен, а учитывая экономическую стоимость подобного типа оборудования, использование металлоемких и высокомошных механизированных крепей является не эффективным способом проведения работ по добыче полезных ископаемых шахтным методом.

Таким образом, создание системы по управлению горным давлением, через систему гибкого управления основными параметрами механизированных крепей, является актуальной в современных условиях, а также необходимым для снижения количества несчастных случаев на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуряков Н. М. Управление состоянием массива горных пород. – М.: Недра, 2017. – 356 с.
2. Черняк И. Л. Управление состоянием массива горных пород. –М.: Недра, 2016. – 320 с.
3. Tsantrizos P. G. et. al. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization. Pat. US № 5707419, датавыдачи: 13 янв. 2018.

N.B. Sadyrbekova, G.B. Abdugalieva,
Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan,
sonel50100@mail.ru

CALCULATION AND SELECTION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE MECHANIZED SUPPORT IN THE CONDITIONS OF THE KOSTENKO MINE

Abstract

In modern conditions of development of mining enterprises, when the issues of increasing the intensity of mining processes, as well as increasing the depth of work, issues related to the management and maintenance of mining operations become more important in the research and development of technologies and methods of mining operations.

Keywords: Powered support, management of the state of powered support, soil swelling.

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 621.8

Е.В. Васильева, А.О. Жукова, Ху Дикай,
Г.В. Иванова, В.Л. Полонский, Е.А. Тарасенко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, galura@yandex.ru

АДДИТИВНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Аннотация

В работе рассматривается роль аддитивных технологий в формировании у студента инновационного мышления, возможность отработки практических навыков в конструкторских программах SolidWorks, Creo, Компас 3D, и программе численного моделирования Ansys при разработке цифровых моделей и чертежей для последующей печати с использованием FDM технологии на 3D принтере. Показаны детали и прототип рабочего изделия после сборки, который служит для изучения принципа работы механизма.

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM метод, 3D печать, 3D принтер

Введение

Правительством Российской Федерации принято Распоряжение от 14 июля 2021 г. 1913-Р «Стратегия развития аддитивных технологий в Российской Федерации до 2030» целью которой является обеспечение объема российского рынка аддитивного оборудования и материалов для аддитивной печати, программного обеспечения и создания 180 аддитивных центров [1,2].

Аддитивные технологии реализуют инновационные подходы к разработке и изготовлению изделий на основе 3D моделей и являются альтернативой традиционным способам промышленного производства.

С целью обеспечения качественной подготовки специалистов для работы в этой области обучение выпускников Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) осуществляется на современном технологическом оборудовании с применением систем CAD/CAM/CAE, студенты изучают новые технологии, материалы и технологические процессы в машиностроении. В процессе обучения студенты приобретают компетенции, связанные с особенностями проектирования изделий для аддитивного производства, реализации технологических приемов послойного построения изделий и соединении их между собой различными способами в зависимости от использованной технологии. Студенты изучают основы процессов аддитивного производства, требования к подготовке 3D моделей и созданию поддерживающих элементов,

возможность применения аддитивных технологий в различных отраслях и получают практические навыки выбора оборудования для аддитивного производства.

В высшей школе машиностроения при выполнении расчетно-графической работы «Проектирование винтового механизма», курсового проекта «Проектирование электромеханического привода редуктора», включающего цилиндрические, конические, червячные, ременные, цепные передачи, по курсу «Детали машин и основы конструирования» студенты переходят от частных задач определения энергетических и кинематических параметров привода, для решения которых достаточно знаний и умений, сформированных при изучении дисциплин «Теоретическая механика» и «Сопротивление материалов», через оценку конструктивных ограничений геометрических параметров передач к прочностному расчёту и выбору материалов зубчатых передач. На основе результатов расчёта передач осуществляется выбор наиболее рационального варианта распределения передаточных чисел двухступенчатого редуктора. Эскизное проектирование редуктора сопровождается проектировочными расчётами. При выполнении сборочного чертежа редуктора и деталей, общего вида электромеханического привода используются знания и умения, сформированные у студентов при изучении дисциплин «Начертательная геометрия», «Вычислительная механика и компьютерный мониторинг», «САПР в машиностроении» [3]. При выполнении выпускных квалификационных работ бакалавра и магистра учащиеся используют знания, полученные при изучении дисциплин "Основы проектирования и расчёт узлов трения", "Проектирование и исследование деталей машин, умение работать в конструкторских программах для создания моделей и чертежей, изготовление изделий методом послойной FDM печати.

При изучении аддитивных технологий студенты осваивают следующие компетенции:

Общая характеристика и области применения аддитивных технологий – аддитивные технологии термины, определения; классификации технологий аддитивного производства; области применения изделий аддитивного производства.

Оборудование и материалы для аддитивных технологий – технологическое оборудование для аддитивного производства, материалы для аддитивного производства, технологические основы получения материалов для аддитивного производства

Компьютерные методы в аддитивных технологиях – обзор программного обеспечения аддитивного производства; обзор программного обеспечения для подготовки 3D для аддитивного производства с учетом технологических особенностей конкретной технологии; программное обеспечение управляющих программ для машин аддитивного производства [4,5,6].

Методы

Для достижения поставленной цели использовали аналитические методы разработки моделей и чертежей в конструкторских программах SolidWorks, Creo, Компас 3D, и программе численного моделирования Ansys для последующей печати на 3D принтере методом FDM печати.

Макеты выполнялись из проволочного пластичного материала PETG и PLA, на 3D-принтере «Anet A8 plus» с использованием программы «Cura».

Результаты и обсуждение

При модернизации механизма подъема крана использовался пакет 3D-моделирования Creo Parametric [7], в котором было выполнено полное твердотельное 3D-моделирование, моделирование сборок, разработка конструкции узла подвески. На рис 1 показан общий вид 3D модели и деталей: а, б - крюк; в - крюк с головкой болта; г - траверса; е - щека подвески; д - ось. Узел необходимо изготовить методом FDM печати, так как, несмотря на то что компьютерное 3D моделирование существенно облегчает труд конструктора, позволяя при этом избежать ряда ошибок при изготовлении нового изделия в металле и обеспечивает большую наглядность, однако виртуальное компьютерное моделирование не позволяет обнаружить все ошибки и недочеты при проектировании изделий, проверку на собираемость, ошибки в конструкторской документации.

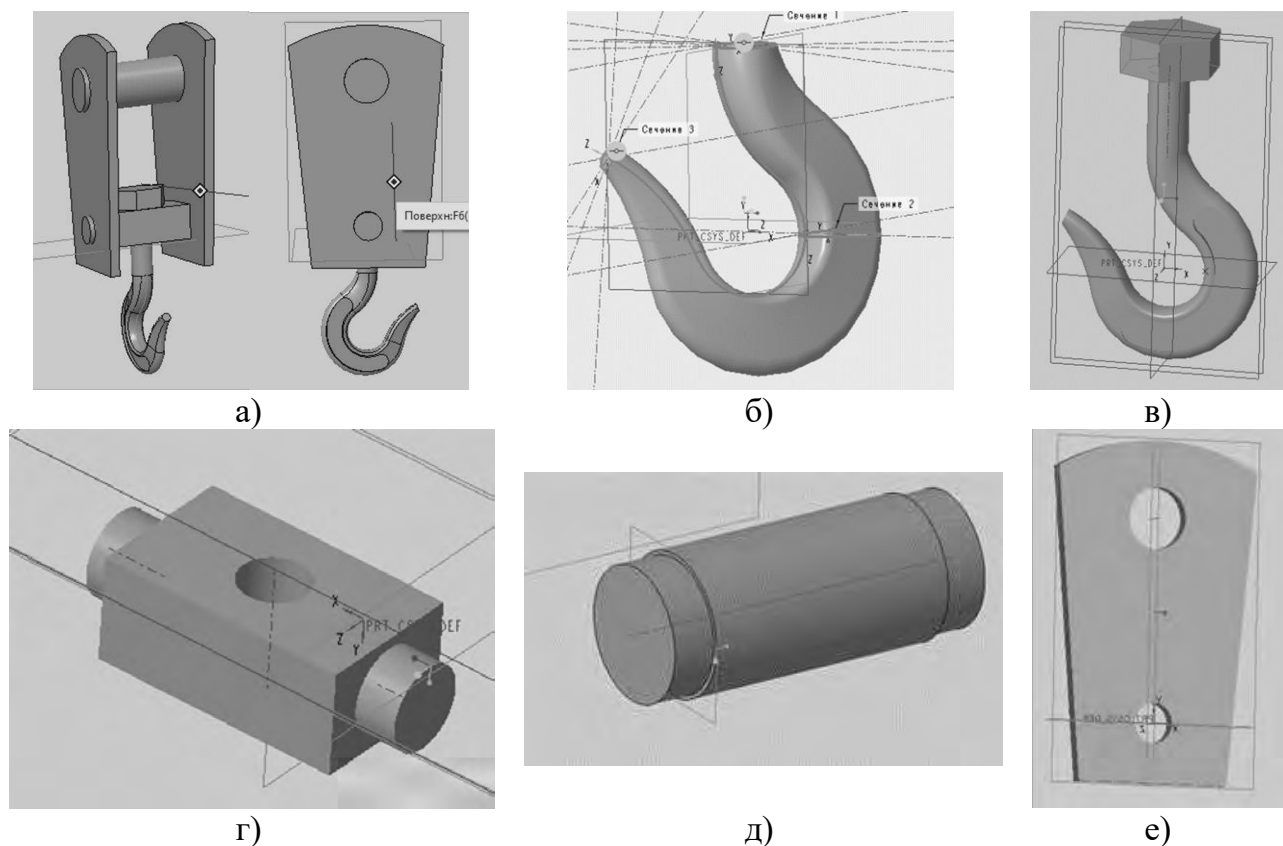
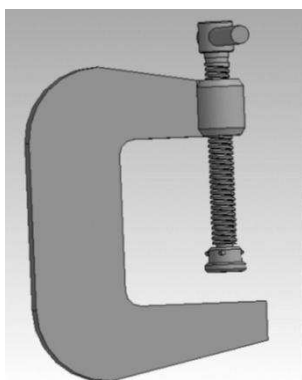


Рисунок 1 - Конструкция подвески крана: а - общий вид; б - крюк; в - крюк с головкой болта; г - траверса; е - щека подвески; д - ось.

Компьютерное моделирование устройств в принципе действия которых используется передача «винт гайка» и цилиндрического редуктора выполнялось в САПР «КОМПАС-3D».

На рисунке 2 представлены 3D модель и готовый макет струбины, на рисунке 3D модель корпуса и макет бутылочного домкрата, на рисунке 4 – модель и макет двухстоечного пресса.

В слайсере на этапе создания gcode выбиралось оптимальное положение детали в пространстве при печати, с целью уменьшения время печати, расхода проволоки, риска деформаций и неплановой остановки печати и применялись следующие настройки: сопло принтера – 0.4 мм; толщина слоя при печати – 0.2 мм; скорость печати – 30 мм/с; толщина стенок – 1.2 мм; заполнение – 25%.

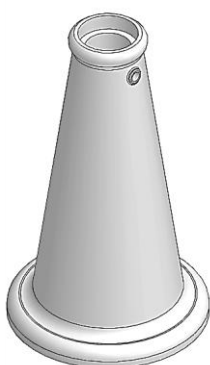


а)



б)

Рисунок 2 - Струбцина: а – модель в Компас -3D; б- макет струбцины, распечатанного на 3D принтере

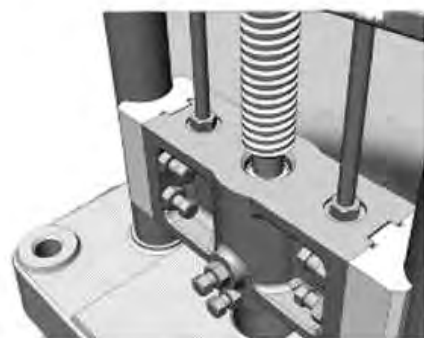


а)



б)

Рисунок 3 - Бутылочный домкрат: а – модель в Компас -3D; б- макет домкрата, распечатанного на 3D принтере



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 - Двухстоечный пресс: а) и б); в) модель в Компас 3D; г) макет пресса распечатанного на 3D принтере

Общее время печати струбцины 49 часов 39 минут. Общий вес напечатанных деталей составил 459 граммов, из которых 171 грамм – расход материала на поддержке для скобы. Общее время печати домкрата составило 36 часов 33 минут. Общий вес напечатанных деталей составил 336 граммов с учётом стандартных крепежей. Общее время печати двухстоечного пресса составило 36 часов 33 минут. Общий вес напечатанных деталей составил 336 граммов с учётом стандартных крепежей.

Сборка и проверка работоспособности механизмов показала, что для резьбового соединения в струбцине оптимальным является зазор 0,6мм, а для двухстоечного пресса 1 мм, так как при печати замечались большие деформации из-за несоразмерности толщины слоя и необходимой точности, что было связано с соотношением величины диаметра и шага резьбы, а для винтового механизма бутылочного домкрата после 3D печати потребовалась дополнительная операция смазывания парафином поверхности витков резьбы и прокручивания на всю длину винта в гайке, а также легкая шлифовка деталей.

Ниже на рисунке 5 представлены детали и макет двухступенчатого редуктора с раздвоенной быстроходной ступенью по развернутой схеме: рисунок 5б со снятой крышкой, на рисунке 5в редуктор в сборе.

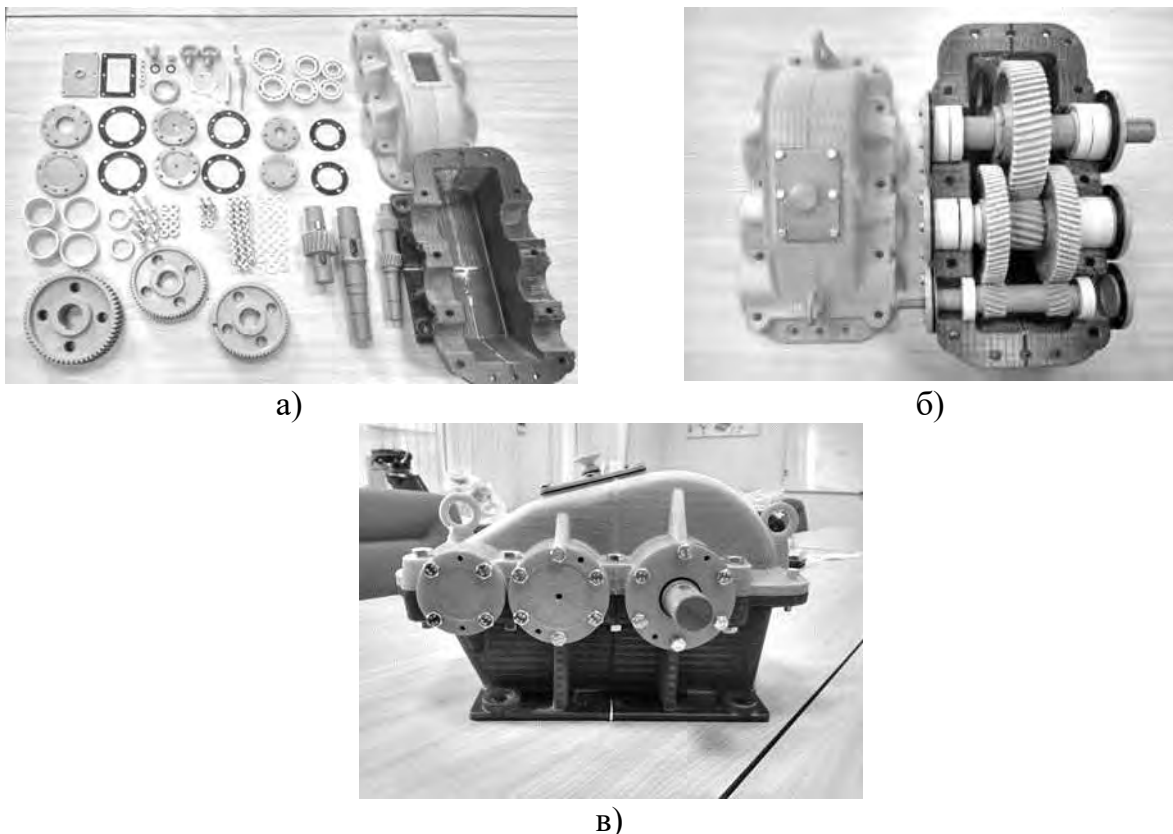


Рисунок 5 - Цилиндрический редуктор: а) детали редуктора, полученные 3D печатью; б) редуктор со снятой крышкой; в) редуктор в сборе.

Печать спроектированной модели редуктора в масштабном коэффициенте составила 68% от оригинала. Для печати были взяты проволоочные пластичные материалы PETG и PLA. Корпус и крышка редуктора изготавливались из материала PETG. При печати из материала PETG произошла усадка деталей по стороне склейки

корпуса, около 2 мм, поэтому напечатанная деталь имеет неточности линейных размеров. Все остальные детали редуктора (зубчатые колеса, валы, крышки, прокладки, пробка отдушина, проставочные кольца, стопорные кольца, шариковые подшипники, масло указательный щуп, штифты) печатались из материала PLA. У материала PLA усадка элементов сетки при печати намного меньше, чем у PETG.

Все детали редуктора, полученные при печати, представлены на рисунке 5а. В качестве крепежных элементов использовались стандартные металлические болты, гайки, шайбы. Общий вес конструкции составил 3,5 кг. В результате сборки подтвердилась работоспособность зубчатого зацепления: при вращении быстроходного вала вращающий момент передается на тихоходный вал.

Заключение

Использование аддитивных производственных технологий в учебном процессе формирует у студентов способности к научно-исследовательской и самостоятельной аналитической работе при проектировании и эксплуатации конкурентоспособной машиностроительной продукции. Использование преподавательским составом Высшей школы машиностроения на практических занятиях современных инновационных технологий обучения позволяет обеспечить высокое качество образовательной и научной деятельности, уровень которого соответствует лучшим отечественным техническим школам.

Созданные устройства на базе лаборатории МНОЦ «BaltTribo-Polytechnic» используются в качестве демонстрационного материала на занятиях «Детали машин и основы конструирования» и «Проектирование и исследование деталей машин», «Теоретические основы повышения износостойкости деталей машин», в исследовательских работах бакалавров и магистров, программах по профориентации абитуриентов. Моделирование и процесс изготовления устройств вызвали неподдельный интерес у студентов первых курсов, участвующих в проекте «Билет в будущее».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 № 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года» // Собрание законодательства Российской Федерации от 2021. № 30 ст.5818.25.

2. Алексеев А. Н. Государственное регулирование инвестиционной деятельности в машиностроении России // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. / Томск. гос. политехн. ун-т., 2014. - с. 97–101.

3. Детали машин и основы конструирования: учебное пособие / Егоров И.М., Жавнер М.В., Жуков В.А. [и др.]; под редакцией Жукова В.А.; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург, 2019. - 1 файл (1,95 Мб). - Загл. с титул. экрана. - Электронная версия печатной публикации. - Доступ по паролю из сети Интернет (чтение, печать, копирование). - Adobe Acrobat Reader 7.0. - <URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/s20-22.pdf>>. — DOI 10.18720/SPBPU/2/s20-22. - Текст: электронный

4. Лейбов А.М., Каменев Р.В., Осокина О.М. Применение технологий 3D-прототипирования в образовательном процессе // Современные проблемы науки и образования. 2014. №5. - с. 93.

5. Аддитивные технологии: учебное пособие / Сычев М.М. [и др.]; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Кафедра теоретических основ материаловедения - Санкт-Петербург, 2018. – с. 35.

6. Зленко М.А., Попович А.А. Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2013. 222с.

7. Creo Elements/Pro 5.0 Primer Учебное пособие /PTC Academic Program. - 2011. - с. 97 - <URL:https://www.solver.ru/products/kamp/files/olimpiada/Primer_rus.pdf>

E.V. Vasilyeva, A.O. Zhukova, Khu Dikai, G.V. Ivanova, V.L. Polonsky, E.A. Tarasenko
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, galura@yandex.ru

ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Abstract

The paper discusses the role of additive technologies in the formation of innovative thinking in the student, the possibility of developing practical skills in the design programs SolidWorks, Creo, Compass 3D, and the Ansys numerical simulation program when developing digital models and drawings for subsequent printing using FDM technology on a 3D printer. Details and a prototype of a working product after assembly are shown, which serves to study the principle of operation of the mechanism.

Keywords: additive technologies, FDM method, 3D printing, 3D printer

А.О. Жукова, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, zhuc.00@mail.ru

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛА ПОДВЕСКИ КРАНА

Аннотация

Статья посвящена расчету механизма подъема груза, проектированию узла подвески крана и его статический расчёт. Целью данной работы является модернизация узла подвески за счет снижения массы. При проектировании определены габариты деталей подвески, построение которых было выполнено с помощью инженерного пакета Creo. Подготовка к проведению статического анализа и сам анализ проведены с помощью программы Ansys. По результатам расчета сделан вывод о возможности модернизации подвески по массе наиболее габаритных элементов узла.

Ключевые слова: грузоподъемные механизмы, грузозахватный орган, подвеска крана.

Введение

В металлургии и строительстве, в производственных цехах при работе с сыпучими и опасными грузами, для перемещения крупногабаритных применяются мостовые краны. Эта техника предназначена для интенсивной работы на предприятии, и надежная работа грузоподъемных механизмов влияет на бесперебойную работу оборудования, снижает затраты на внеплановые остановки и ремонт. Для надёжной фиксации и перемещения грузов различной массы грузоподъемные механизмы оснащаются захватными системами. Наиболее распространёнными считаются приспособления, выполненные в форме крюка. Крюковые подвески для подъемных кранов обладают различными конструкциями и способны поднимать, удерживать и перемещать грузы по всей территории производства [1].

Целью работы является модернизация узла подвески крана, направленная на конструирование и снижение массы подвески.

Методы

Для достижения поставленной цели использовали аналитические методы исследования. Подготовка к проведению статического анализа и сам анализ проведены с помощью программы Ansys. При проектировании определены габариты деталей подвески, построение которых было выполнено с помощью инженерного пакета Creo.

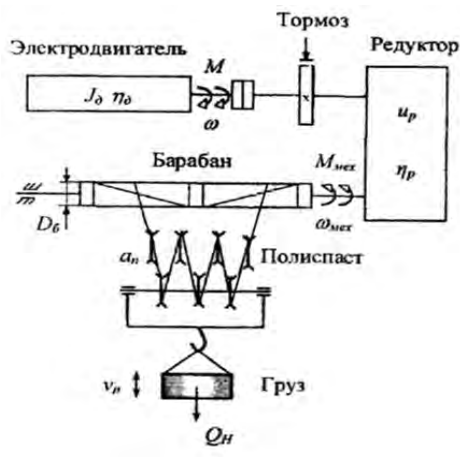
Результаты и обсуждение

Расчету механизма подъема груза выполнен по методике [2] для следующих условий: режим нагрузки L2; группа режима работы механизма M4; вес поднимаемого груза 1 т; высота подъема 5 м; число намотки 2; скорость подъема 0,3 м/с по методике, изложенной [2]. Общий вид и схема подъемного механизма крана показана на рис 1. На крановой тележке расположен механизм подъема и опускания

груза составными частями которого являются приводной электродвигатель, трансмиссионные валы, редуктор, грузовые тросы с барабаном для намотки. В дополнение к основному, могут использоваться один или два вспомогательных механизма, грузоподъемность которых меньше грузоподъемности основного в 3–10 раз в зависимости от класса крана.



а)



б)

Рисунок 1 – Подъемный механизм крана:
а – общий вид; б – схема подъемного механизма

Для повышения тягового усилия применяется чаще всего сдвоенный кратный полиспаст, благодаря которому трос наматывается равномерно на барабан с обоих концов, тем самым позволяя сбалансировать нагрузку на опоры барабана и всю пролетную часть моста.

В ходе исследования и проектирования узла подвески крана выполнены:

1. *Выбор схемы.* Мостовой кран имеет механизм передвижения тележки с канатной тягой, следовательно, кратность его полиспаста должна быть четной $i_{п} = 2$. На рис. 2 приведена схема выбранного полиспаста.

2. *Выбор грузоподъемного каната.*

Максимальное усилие в одной ветви каната полиспастового механизма, наматываемой на барабан:

$$S_{к} = \frac{G_{гр} + q \mathcal{G}}{a_{к} i_{п} \eta_{п} \eta_{бл}^m} = \frac{10^4 + 8 \cdot 10}{2 \cdot 2 \cdot 0,98 \cdot 0,96} = 2\,678,6 \text{ Н} \approx 2,68 \text{ кН}$$

где q – масса грузозахватных устройств, кг:

$$q = 5 m_{кр} = 5 \cdot 1,6 = 8 \text{ кг}$$

$m_{кр}$ – масса крюка, кг. $m_{кр} = 0,18 \text{ кг}$ (в соответствии с ГОСТ 6627–74)

\mathcal{G} – ускорение свободного падения, $\mathcal{G} = 10 \text{ м/с}^2$;

$a_{к}$ – число, показывающее, сколько ветвей каната одновременно наматывается на барабан, $a_{к} = 2$;

$i_{п}$ – кратность полиспаста, $i_{п} = 2$;

$\eta_{п}$ – коэффициент полезного действия (КПД) полиспаста;

m – число отклоняющих блоков, не влияющих на кратность полиспаста.

Рассчитаем КПД полиспаста. Так как кратность полиспаста меньше четырех, КПД можно определить так:

$$\eta_{\Pi} = \eta_{\text{бл}}^{i_{\Pi}} = 0,98^2 = 0,96$$

где $\eta_{\text{бл}}$ – КПД блока, $\eta_{\text{бл}} = 0,98$ для блоков на подшипниках качения.

Разрывное усилие каната:

$$F_{\text{раз}} = k \cdot S_{\text{к}} = 6 \cdot 2,68 \cdot 10^3 = 16,1 \text{ кН},$$

где k – наименьшее значение статического коэффициента запаса прочности каната, $k = 6$.

Согласно ГОСТ 2688–80 и рассчитанному разрывному усилию, был выбран канат стальной типа ЛК-Р6х19 со следующими параметрами:

Диаметр каната: $d_{\text{к}} = 5,6 \text{ мм}$;

Расчётное разрывное усилие каната: $S_{\text{раз}} = 18,2 \text{ кН}$;

Предел прочности: $\sigma_{\text{в}} = 1764 \text{ МПа}$;

Условное обозначение каната: Канат 5,6-I-Л-О-Н-1764 ГОСТ 2688–80.

3. Расчет крюка подвески.

Для надёжной фиксации и перемещения грузов различной массы грузоподъёмные механизмы оснащаются захватными системами. Наиболее распространёнными считаются приспособления, выполненные в форме крюка. Крюковые подвески для подъёмных кранов обладают различными конструкциями и способны поднимать, удерживать и перемещать грузы по всей территории. Крюковая подвеска состоит из следующих элементов: траверса; редуктор; ось (одна или несколько); крюк (выбранной конфигурации); система крепления; подшипников (одного или нескольких), электромотор.

Исходя из грузоподъёмности, рода привода режима работы механизма, по ГОСТ 6627–76 выбираем крюк №7 тип А (рис. 3) техническая характеристика которого представлена в таблице 1.

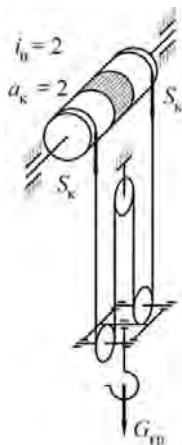


Рисунок 2 – Двукратный полиспаст мостового крана с намоткой двух ветвей на один барабан

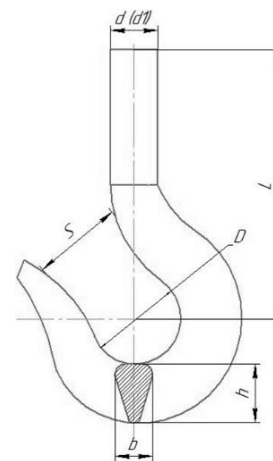


Рисунок 3 – Конструкция крюка

Таблица 1. Технические характеристики крюка №7 (тип А)

Номер крюка	Грузоподъёмность, т	b, мм	h, мм	D, мм	S, мм	L, мм	d ₁ , мм	Масса, кг
№7А	1	24	36	40	30	120	M20	1,6

Диаметры блоков:

$$d_{\text{бл}} > h_2 \cdot d_k = 22,4 \cdot 5,6 = 125,5 \text{ мм},$$

где h_2 – коэффициент выбора диаметра блока по группе классификации механизма в соответствии с ГОСТ 25835, $h_2 = 22,4$ (средний режим работы механизма М4).

По нормальному ряду размеров подбираем диаметр блока, измеренный по дну канавки: $d_{\text{бл}} = 150 \text{ мм}$,

Длина ступицы для блока: $l_{\text{ст}} = 40 \text{ мм}$

Расчетная длина оси блока:

$$L_{\text{ос}} = \delta + 2\delta_1 + Z_{\text{бл}} \cdot l_{\text{ст}} + \Delta = 8 + 2 \cdot 4 + 40 + 4 = 60 \text{ мм},$$

где δ , δ_1 – толщина серги и щеки.

$$\delta = 8 \text{ мм}, \delta_1 = 4 \text{ мм (т. к. грузоподъемность до 63 кН)};$$

$Z_{\text{бл}}$ – количество подвижных блоков, $Z_{\text{бл}} = 1$;

Δ – зазор между торцами ступиц блоков (1...5 мм).

Расчет на изгиб оси блоков:

Изгибающий момент, возникающий в оси:

$$M_{\text{изг}} = \frac{G_{\text{гр}} \cdot L_{\text{ос}}}{4} = \frac{10^4 \cdot 60}{4} = 150 \text{ кНм}$$

Материал оси блоков сталь 45. Расчётная схема показана на рисунке 4.

Расчётный диаметр оси блоков:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{изг}}}{0,1[\sigma]_{\text{из}}}} = \sqrt[3]{\frac{150 \cdot 10^3}{0,1 \cdot 144}} = 21,8 \text{ мм}$$

$$[\sigma]_{\text{из}} = [\sigma]_p = \frac{\sigma_T}{n_6} = \frac{360}{2,5} = 144 \text{ МПа}$$

где n_6 – коэффициент запаса прочности в зависимости от условий изготовления, расчёта и требований к надежности (1...5).

Принимаем $d_0 = 25 \text{ мм}$ (ряд нормальных линейных размеров).

Траверса изготавливается из стали 45 и рассчитывается на изгиб от веса груза и грузозахватных устройств (рис. 5). Для расчета конструкции траверсы принимаем:

Длина траверсы: $L_{\text{тр}} = L_{\text{ос}} = 60 \text{ мм}$

Внутренний диаметр траверсы: $d'_1 = d_1 + (2 \cdot 5) = 20 + 5 = 25 \text{ мм}$

Глубина отверстия траверсы без учёта бурта:

$h = L - l_1 - l_2 = 120 - 30 - 35 = 55 \text{ мм}$, где d_1 , L , l_1 , l_2 – параметры крюка.

Ширина траверсы:

$$B = \frac{3 \cdot G_{\text{гр}} \cdot L_{\text{ос}}}{2 \cdot h^2 \cdot [\sigma]_{\text{из}}} + d'_1 = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot 60}{2 \cdot 55^2 \cdot 144} + 25 = 27 \text{ мм}$$

По внутреннему диаметру d_1 и грузоподъемности $G_{\text{гр}}$ выбираем подшипник упорный № 8104 с внутренним диаметром $d_{\text{в}} = 20 \text{ мм}$, наружным диаметром $D_{\text{н}} = 35 \text{ мм}$.

Проверка необходимого условия: $B \geq 1,2D_{\text{н}}$, т. е.: $B \geq 1,2 \cdot 35 = 42 \text{ мм}$, условие не выполнено, поэтому B принимаем 45 мм.

Определение цапф траверсы из условия прочности по изгибу и из смятия на контактной поверхности между цапфой и отверстием в серье:

$$d_{\text{ц}} = \sqrt[3]{\frac{G_{\text{гр}}(\delta + 2\delta_1)}{0,4[\sigma]_{\text{см}}}} = \sqrt[3]{\frac{10^4 \cdot (8 + 2 \cdot 4)}{0,4 \cdot 144}} = 14 \text{ мм}$$

$$\sigma_{см} = \frac{G_{гр}}{2d_u \delta} = \frac{10^4}{2 \cdot 14 \cdot 8} = 44,6 \text{ МПа} < [\sigma]_{см}$$

$$[\sigma]_{см} = 1,5 \cdot [\sigma]_p = 1,5 \cdot 144 = 216 \text{ МПа}$$

Серьга изготавливается из стали 4 и рассчитывается по напряжениям растяжения и среза. Расчётная схема показана на рисунке 6.

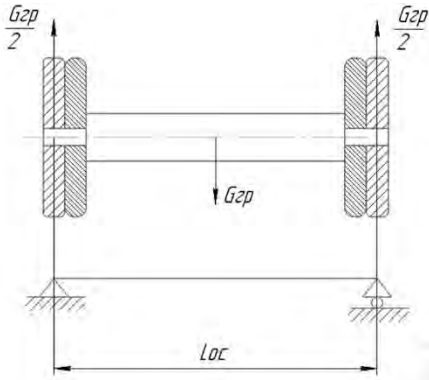


Рисунок 4 – Эскиз и расчётная схема оси блоков

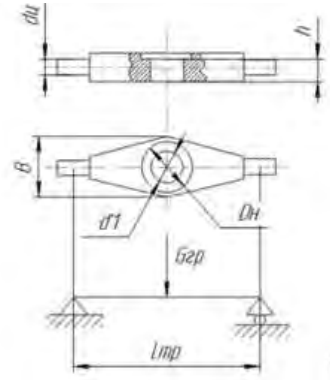


Рисунок 5 – Эскиз и расчётная схема траверсы

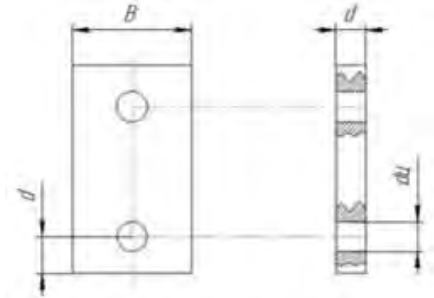


Рисунок 6 – Эскиз и расчётная схема серьги

Ширина серьги: $B_c = (1,8 \cdot 2)d_u = 1,8 \cdot 14 = 25,2 \text{ мм}$ (принято 26 мм)

Условие прочности серьги на растяжение:

$$\sigma_p = \frac{G_{гр}}{2(B_c - d_u) \cdot \delta} = \frac{10^4}{2 \cdot (26 - 14) \cdot 8} = 52 \text{ МПа} < [\sigma]_p$$

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_m}{n_\sigma} = \frac{260}{2,5} = 104 \text{ МПа}$$

Толщина δ_2 определяется из условия прочности опасного сечения серьги на срез:

$$\delta_2 = \frac{G_{гр}}{2 \cdot 2 \cdot \delta \cdot [\tau]} = \frac{10^4}{4 \cdot 8 \cdot 78} = 4 \text{ мм}$$

$$[\tau] = 0,75[\sigma]_p = 0,75 \cdot 104 = 78 \text{ МПа}$$

Конструктивно принимаем $\delta_2 = 18 \text{ мм}$

В работе были выполнены расчеты по определению параметров барабана, выполненного литьем из стали 35Л. Диаметр барабана 260 мм, рабочая длина 209 мм, толщина стенки стального литого барабана 7 мм, напряжение сжатия в стенке барабана 48 МПа, что меньше допускаемого значения 126 МПа.

4. Расчёт привода механизма подъема груза позволил выбрать электродвигатель с фазным ротором МТФ 112-6 ($P_{дв} = 2,7 \text{ кВт}$, $n_{дв} = 840 \text{ мин}^{-1}$, $T_{max} = 57 \text{ Нм}$, $m = 58 \text{ кг}$), муфту с тормозным шкивом: МУВП с моментом инерции $J_T = 0,062 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, редуктор Ц2У-125 ($u'_p = 20$, $T_{вр} = 0,5 \text{ КНм}$), тормоз (расчетный тормозной момент 47,8 Нм).

Кинематическая схема привода механизма подъемного груза представлена на рисунке 7.

5. Проектирование подвески крана

Проектирование подвески крана выполнено с целью модернизации, направленной на снижение массы. Построение крюка подвески, траверсы, щек

подвески, ось для канатных блоков, сборка подвески выполнено с помощью инженерного пакета Creo Parametric.

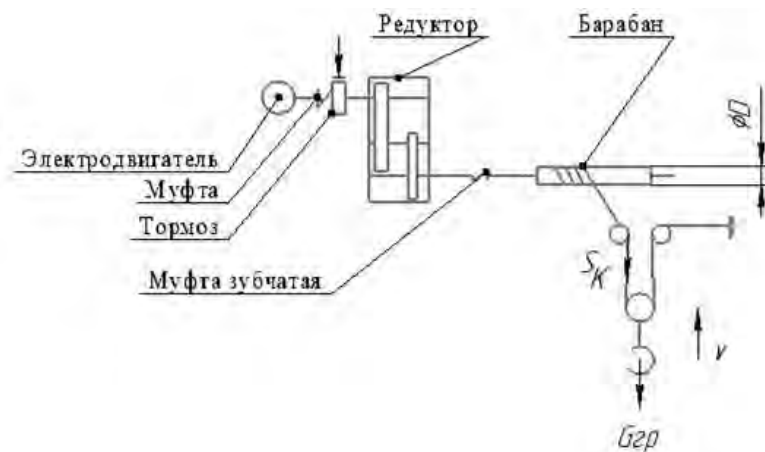


Рисунок 7 – Кинематическая схема привода механизма подъемного груза

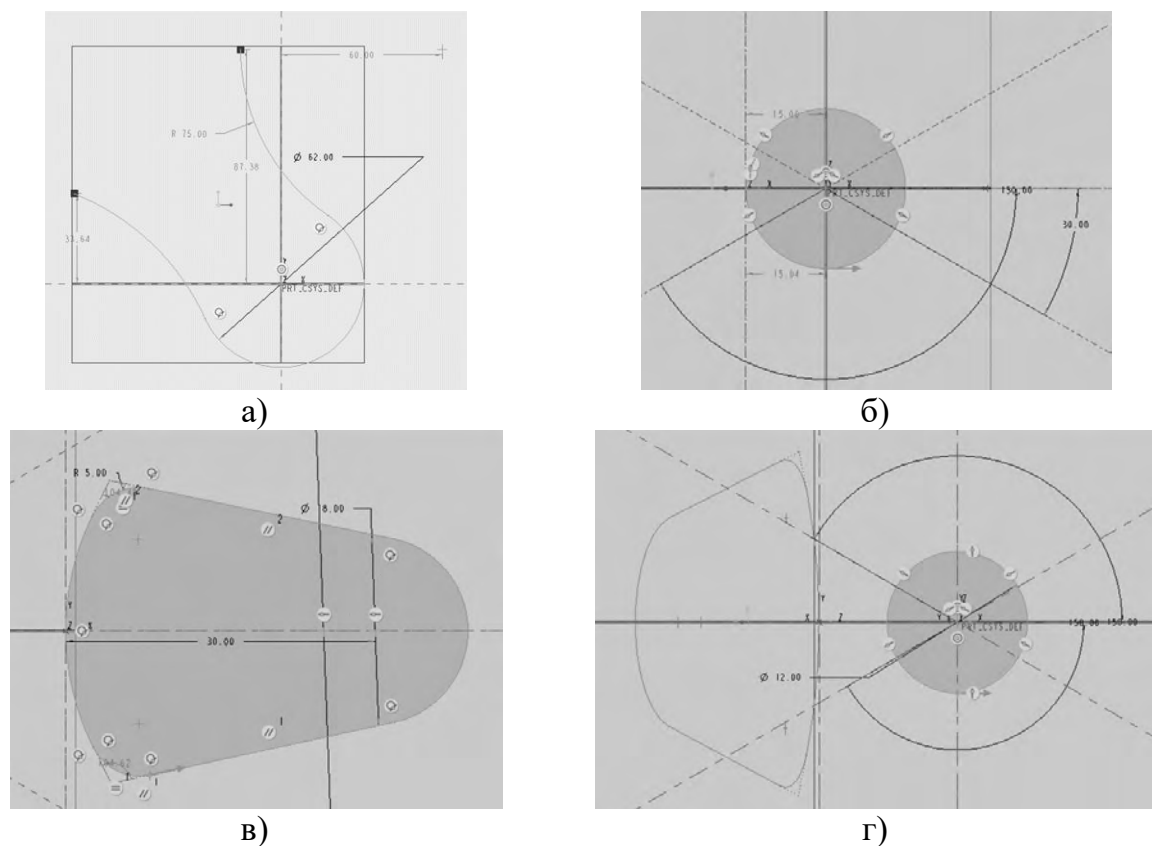


Рисунок 8 – Этапы проектирование крюка: а- построение траектории плавного сопряжения; б- эскиз сечения 1; в- эскиз сечения 2; г- сечение 3

При проектировании крюка было принято решение выполнить построение плавным сопряжением сечений, так как крюк имеет сложную конфигурацию. Построение выполнялось пошагово. На рисунке 8 показаны этапы проектирования, на рисунке 9 – плавное сопряжение профиля крюка. На рисунке 10 представлена конструкция элементов подвески в сборе.

Статический расчёт и анализ конструкции выполнен с использованием универсальной программы конечно-элементного анализа Ansys, для заданных

условий закрепления и нагрузки. Полученные значения эквивалентных напряжений, перемещений и деформаций подвески, представлены на рисунке 11.

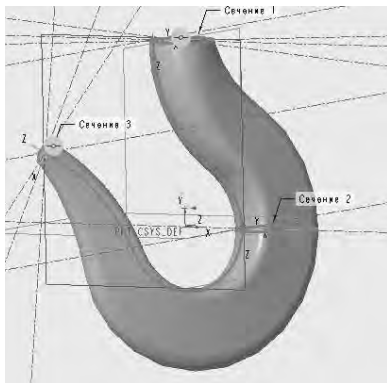


Рисунок 9 – Сопряжение профиля крюка

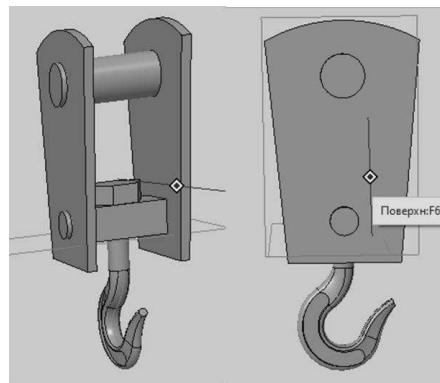
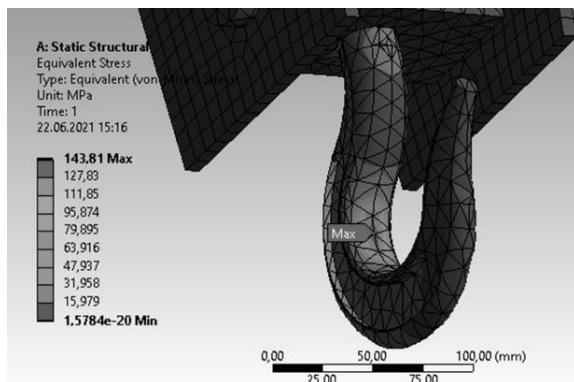
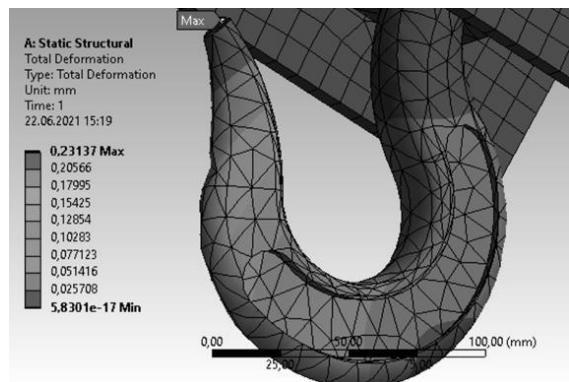


Рисунок 10 – Конструкция подвески крана

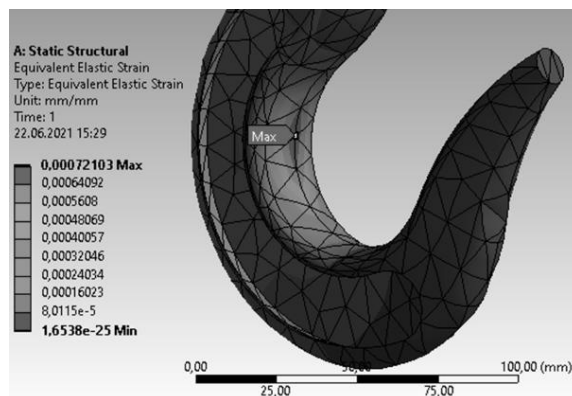
Анализ результатов расчета позволил сделать вывод, что эквивалентные напряжения максимальные значения которого достигает 144 МПа меньше предельного напряжения для стали 20 из которой выполняется конструкция. Величина перемещения составляет 230 мкм, деформация менее 0,1 %, что не оказывает существенного снижения жесткости конструкции.



а)



б)



в)

Рисунок 11 – Результаты расчета:
а – эквивалентные напряжения; б – перемещение; в – деформации

Заключение

Выполнен расчет механизма подъема мостового крана, при модернизации конструкции подвески определены габариты деталей подвески, построение которых было выполнено с помощью инженерного пакета CreoParametric, статический расчет и анализ, проведенный с помощью программ Ansys, позволил сделать вывод, что при уменьшении массы на 8 кг элементы конструкции обладают достаточной прочностью и жесткостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подколзин А. А., Пискунов О. М., Беляев В. В. Учебное пособие для студентов машиностроительных специальных вузов. Проектирование грузоподъемных механизмов [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.net/5_46998_proektirovanie-kryukovoy-podveski.html
2. Оскирко А. И. Примеры расчета подъемно-транспортных машин и механизмов сельскохозяйственного назначения: учебно-методическое пособие / А. И. Оскирко. – Минск: БГАТУ, 2010. – 352 с.
3. Балабанов А. Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя.-М. Издательство стандартов, 1992, – 464 с.
4. Огородникова О. М. Статический конструкционный анализ. Ansys [Электронный ресурс]. URL: https://mircompozitov.ucoz.ru/05_ansys_workbench
5. Елисеев К. В., Кузин А. К., Орлов С. Г. Вычислительная механика. Вычислительный практикум в системе ANSYS: учебное пособие [Электронный ресурс]. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/si20-389.pdf/view>

A.O. Zhukova, G.V. Ivanova, E.A. Tarasenko
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
galura@yandex.ru

SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE CRANE SUSPENSION UNIT

Abstract

The article is about the calculation of the lifting mechanism, the design of the crane suspension and its static calculation. The purpose of the work is to modernize the suspension by reducing weight. The dimensions of the suspension parts are determined. the construction of the parts was carried out using the Creo engineering package. The strength calculation was carried out using the Ansys program. Based on the results of the calculation, a conclusion was made about the possibility of upgrading the suspension by weight of the most dimensional structural elements.

Keywords: lifting mechanisms, lifting body, crane suspension.

Е.Н. Костылева, А.П. Драгун, А.Л. Федоров
Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение
высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота
«Военно-морская академия
имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова»
Военный институт (военно-морской политехнический),
Санкт-Петербург, г. Пушкин, Россия, kostileva_elen@mail.ru

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация

В статье приводится описание и работа простого по конструкции, универсального устройства для определения температурных деформаций сопрягаемых деталей и материалов. Оно относится к контрольно-измерительным приборам и может быть использовано для контроля линейных размеров сопрягаемых деталей в условиях эксплуатации, при решении задач проектирования и подбора контактирующих конструкционных материалов. Устройство обеспечивает при этом высокую контролируемую точность метрологической системы, позволяя производить определение температурных линейных расширений различных по форме, размерам и материалам деталей.

Ключевые слова: коэффициент линейного термического расширения, конструкционные материалы, метрология, контроль качества, сопрягаемые детали.

Введение

Рассматриваемое устройство для определения температурных деформаций предназначено для измерения и контроля деформаций сопрягаемых деталей при обеспечении высокой точности измерений. Определение температурных деформаций сопрягаемых деталей и материалов играет важную роль при создании и эксплуатации различного рода корабельных энергетических установок ВМФ РФ, например, газотурбинных, паротурбинных, ядерных и другого энергетического оборудования. Специфика условий и режимов эксплуатации корабельных энергетических установок обуславливается многими факторами, а именно, стесненностью рабочего пространства, зачастую предельно высокими температурами, сложностью проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту, монтажу и демонтажу оборудования. Внедрение новых методов контроля физико-механических и эксплуатационных свойств деталей и материалов позволит в целом повысить надежность и безопасность работы энергетического оборудования, что особенно важно при его длительной эксплуатации и отсутствии ремонтной базы в походных условиях.

Различное температурное расширение материалов необходимо учитывать при любом триботехническом взаимодействии деталей (табл. 1).

В том случае, если сопряжение деталей выполнено без зазора, то при разности коэффициентов температурных деформаций поверхности деталей испытывают напряжения, что приводит к растрескиванию материала, разрушению соединения, или к деформационному «прогибу» детали. Если же в соединении имеются зазоры, то

происходит их увеличение или уменьшение в процессе работы. И то и другое может нарушить нормальную работу оборудования. При этом выбор допуска для деталей, работающих при высоких температурах, определяется зачастую по технологическим справочникам, в которых достаточно большой разброс допусков для широкого диапазона по температуре, кроме этого, в литературе зачастую отсутствуют данные по современным материалам.

Таблица 1 – Примеры влияния температурных деформаций на нарушение работоспособности деталей и узлов технологических систем

Факторы влияния температурных деформаций на возможные нарушения работоспособности деталей и узлов энергетического оборудования			
Учет температурных деформаций объектов больших форм	Нарушение допусков и посадок в соединениях деталей и узлов	Возникновение поверхностных напряжений деталей	Нарушение точности оборудования и приборов
<ul style="list-style-type: none"> - Провода линий электропередач - Трубопроводы различного назначения - Корпуса и валопроводы морских и речных судов - Корпуса торпед и баллистических ракет - Валы ДВС, паровых и газовых турбин, компрессоров 	<ul style="list-style-type: none"> - Размерные цепи многозвездных механизмов - Посадки деталей с натягом - Взаимное расположение деталей редукторов - Посадки ДВС, паровых и газотурбинных энергетических установок - Детали топливных насосов высокого давления - Посадки деталей запорных механизмов 	<ul style="list-style-type: none"> - Поверхностные напряжения при нагреве и охлаждении - Сварочные конструкции - Элементы отливок - Резьбовые соединения - Детали паровых котлов - Межклапанные перемычки головок блока цилиндров ДВС 	<ul style="list-style-type: none"> - Металлообрабатывающие станки - Контрольно-измерительные инструменты и приборы - Навигационное оборудование - Артиллерийское и другие виды стрелкового оружия - Предохранительные устройства и приборы - Показатели термодатчиков

Некоторые современные конструкционные материалы имеют отрицательный коэффициент линейного расширения, то есть не расширяются, а напротив, сжимаются при нагревании это, например, вольфрамат циркония, определенные углепластики, а также многие марки резины. Некоторые марки ферроникелевых сплавов имеют практически нулевой коэффициент линейного теплового расширения в определенных интервалах температур.

Целью данной работы являлось создание устройства [1], которое позволит на практике, а также в лабораторных условиях оперативно определять с достаточной точностью тепловую деформацию различных материалов и сопрягаемых деталей,

чтобы исключить нарушение работоспособности энергетических установок и оборудования.

Описание

Рассматриваемое устройство для определения температурных деформаций сопрягаемых деталей и материалов [1], содержит основание, на котором жестко закреплен держатель, в котором установлен индикатор (рис. 1). В верхней части основания 1 по всей его длине, по центральной оси, выполнен Т-образный паз 2, с двух противоположных сторон основания 1 установлены с возможностью продольного перемещения и закрепления две плиты 3 и 4, имеющие в нижней части вдоль своих центральных осей выступы ответные вертикальным поверхностям Т-образного паза 2. На торцевой поверхности направленных друг к другу каждой из плит 3 и 4 жестко закреплены одинаковые опорные базовые элементы 6 и 7 в виде пластин, верхняя опорная часть которых заострена, а нижняя в их центральной части имеет прямоугольные выступы 8, 9 ответные вертикальным направляющим Т-образного паза 2 и имеющие в верхней части V-образные пазы 10 и 11, расположенные симметрично относительно выступов 8 и 9 пластин, при этом отверстия стоек 12 13 выполнены соосно и параллельно плоскости основания 1. В отверстиях одной из стоек 13 установлена и постоянно закреплена индикаторная головка 14, а в отверстии другой стойке 12 - съемная индикаторная головка 15 или съемный упор, при этом на верхней плите 3 вертикально и симметрично относительно центральной оси отверстий стоек 12 и 13 жестко закреплены друг напротив друга цилиндрические стержни 16 и 17, с возможностью установки на них либо двухпозиционных одинаковых втулок, либо упорной пластины 20, на боковом торце которой в верхней части выполнен выступающий упорный треугольной формы гребень. Данное устройство позволяет определять температурные расширения образцов различной формы и размеров, например, в виде колец большого диаметра 21 и минимального размера 22 (рис. 2), прямоугольного образца 23 и образца в виде диска 24 (рис. 3), в форме стержня 25 (рис. 4).

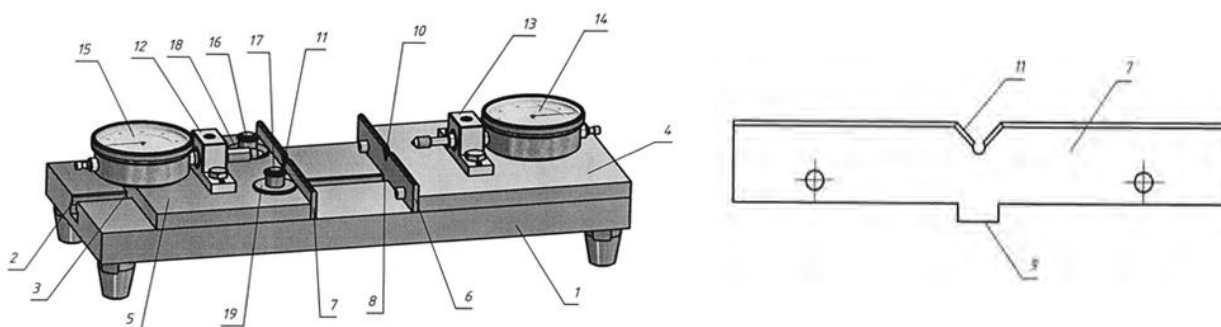


Рисунок 1 – Устройство для определения температурных деформаций

Работа устройства заключается в следующем. Предварительно производится настройка устройства на заданный размер и форму образца. Для этого, зная размер образца, например, образца в виде кольца большого диаметра 21 устанавливаем его на верхние опорные поверхности ножей 6 и 7 до касания поверхностей, одетых на стержни 16 и 17 втулок 18 и 19 (рис. 1). После этого перемещаем плиту 3 вместе с образцом до соприкосновения наружной поверхности образца с измерительным наконечником индикаторной головки 14, создавая предварительный натяг ее

механизма и закрепляем. Поворачивая шкалу индикатора, совмещают ее нулевое деление со стрелкой индикаторной головки. В стойку 13 устанавливается съемный индикатор 15, подводят до касания наконечника детали с противоположной стороны и также обнуляют, слегка поджимая деталь к опорам. После этого образец снимается и помещается в нагревательное устройство, например, муфельную печь. Нагретый до заданной температуры образец быстро вынимается из печи и устанавливается на измерительное устройство. Предварительно отведя измерительный наконечник индикаторной головки 14 и, отпуская его до прикосновения наконечника с поверхностью образца. Считывают показания индикаторных головок и вычитают меньшее показание из большего, полученная разность характеризует величину линейного расширения данного образца при фактической температуре нагрева.

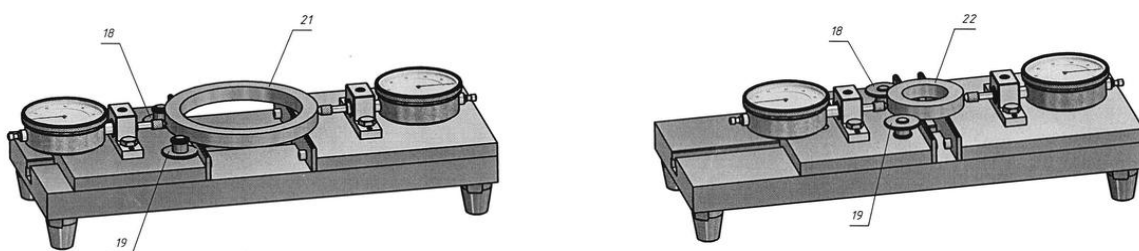


Рисунок 2 – Устройство с образцами в форме колец

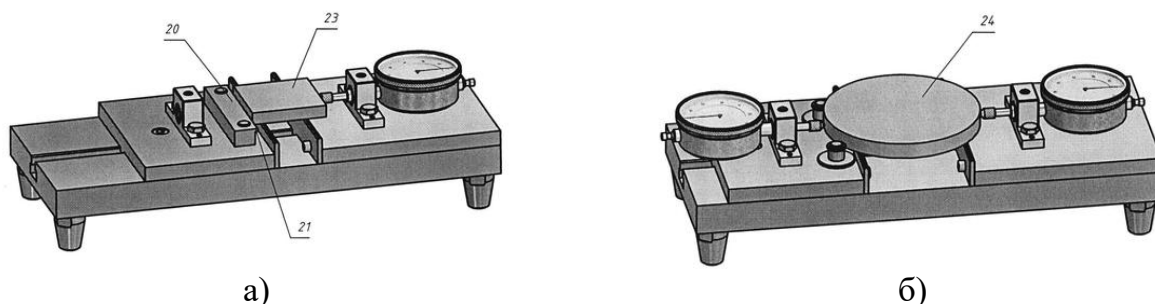


Рисунок 3 – Устройство с образцами прямоугольной формы (а) и в форме диска (б)

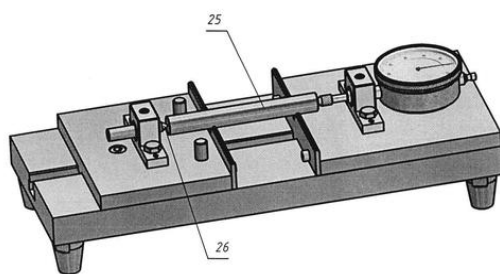


Рисунок 4 – Устройство с образцом в форме стержня

Аналогично производится измерение температурного линейного расширения образцов другой формы и размеров (рис. 2, 3, 4), используя соответствующие центрирующие и упорные элементы устройства, например, при использовании образцов прямоугольной формы 23 (рис. 3) на цилиндрические стержни 16 и 17 устанавливают упорную пластину 20. Образец 23 помещают на пластины 6 и 7 между упорным гребнем 21 и измерительным наконечником индикаторной головки 14. При определении температурных удлинений цилиндрических образцов 25 вместо съемной индикаторной головки устанавливают жесткий упор 26 (рис. 4).

Результаты и обсуждение

Сравнение конструкций подобных рассматриваемому устройству [2,3], показало, что они имеют достаточно большую погрешность измерений, сложны в эксплуатации, не имеют возможности исследования нескольких образцов одновременно в идентичных условиях и предназначены в основном для работы в стационарных лабораториях научных учреждений.

Конструкция предлагаемого устройства по сравнению с рассмотренными обладает существенными отличиями:

1. Простота конструкции позволяет изготовить детали устройства на любом промышленном предприятии, в научном или учебном институте;
2. Конструкция устройства позволяет достаточно точно базировать образцы или детали для определения температурных линейных деформаций;
3. Проводить исследования различных по форме и размерам деталей, например, в виде цилиндрических колец и дисков, призматических образцов и цилиндрических стержней и т. д.;
4. Устройство позволяет проводить вместе с другими приборами исследования структурных изменений металлов при нагревании и охлаждении;
5. Устройство обладает достаточно высокой точностью;
6. Устройство обладает возможностью проводить оперативные измерения в идентичных условиях нагрева двух и более образцов.

Работа предлагаемого устройства была проверена в лабораторных условиях. На рисунке 5 представлены экспериментальные зависимости деформаций опытных образцов от температуры для разных металлов: сталь 20X13, сталь 20, медь, алюминий. На рисунке 6 представлено фото опытного образца устройства. Достоверность полученных данных подтверждается хорошей сходимостью с данными, приведенными в справочниках.

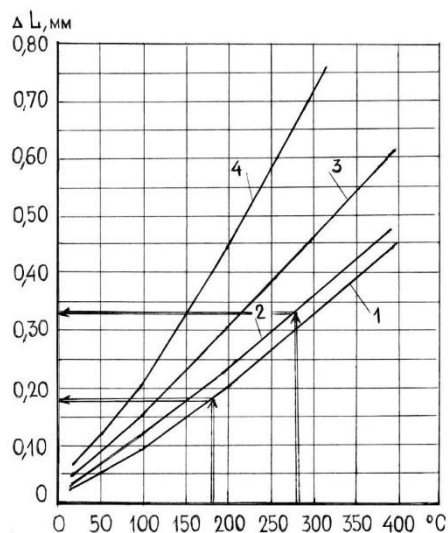


Рисунок 5 – Зависимость деформаций опытных образцов металлов от температуры: 1 – сталь 20X13; 2 – сталь 20; 3 – медь; 4 – алюминий

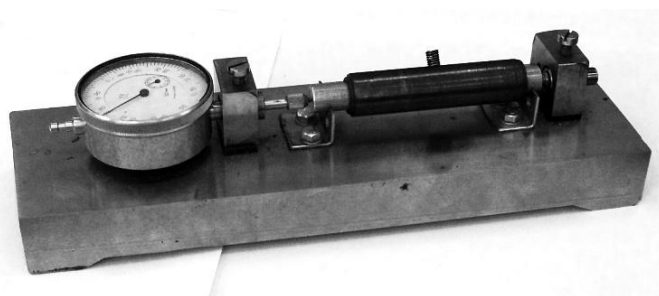


Рисунок 6 – Фото опытного образца устройства для определения температурных деформаций

Заключение

Опытный образец инновационного устройства спроектирован, изготовлен (рис. 6) и внедрен в образовательный процесс на кафедре Химии и материаловедения по дисциплине Материаловедение и технология конструкционных материалов в интересах Военно-Морского Флота по направлению «Научно-исследовательские теоретические и экспериментальные работы в области точных и естественных наук.

Применяемый метод измерения температурных деформаций позволяет на разработанном устройстве определить и в дальнейшем учесть изменение линейных размеров деталей, входящих в состав узлов и агрегатов как энергетических установок кораблей, так и деталей любого другого энергетического оборудования, в том числе и новых материалов, что в свою очередь повысит их работоспособность и надежность уже на стадии проектирования, или в процессе ремонта и восстановления.

Проведенные натурные испытания показали достаточную простоту в эксплуатации, высокую точность измерений. Работоспособность установки проверена на многочисленных экспериментах при проведении лабораторных работ в составе с лабораторным исследовательским комплексом, по дисциплине Материаловедение и технология конструкционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгун А.П., Костылева Е.Н., Федоров А.Л., Палеха В.А. «Устройство для определения температурных линейных расширений твердых материалов». Патент на изобретение №2709601 RU2709601C1 2019г.
2. Гольдштейн Р. В., Козинцев В.М., Подлесных А.В. Способ дилатометрии А.С. 2014119158/28, 2014.
3. Коста Дж., Манджини С., Отонелло П. Измерение теплового расширения при помощи спеклинтерферометра // Приборы для научных исследований. 1987 – №1. - С. 81–85.

E.N. Kostyleva, A.P. Dragun, A.L. Fedorov
Federal State State Military Educational Institution of Higher Education "Military Educational and Scientific Center of the Navy" Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov "Military Institute (Naval Polytechnic), Saint Petersburg, Pushkin, Russia, kostileva_elen@mail.ru

DEVICE FOR DETERMINING TEMPERATURE DEFORMATIONS OF CONTACTING DETAILS

Abstract

The article provides a description and operation of a simple in design, universal device for determining the temperature deformations of mating parts and materials. It refers to instrumentation and can be used to control the linear dimensions of mating parts under operating conditions, in solving design problems and selecting contacting structural materials. At the same time, the device provides a high controlled accuracy of the metrological system, allowing the determination of linear temperature expansions of parts of various shapes, sizes and materials.

Keywords: coefficient of linear thermal expansion, structural materials, metrology, quality control, mating parts.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.9:621.31

А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский, В.Э. Завистовский
«Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой»,
Новополоцк, Республика Беларусь, a.kirienko@psu.by

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЕМ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР В ГИБКИХ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

Аннотация

Авторами статьи представлены результаты теоретического исследования получения ленточного шлифовального инструмента с управляемым ориентированием абразивных зерен в электростатическом поле, что позволяет повысить производительность отделочной обработки поверхностей деталей машин. Это решает важные для промышленного производства задачи по снижению материалоемкости продукции и повышению эффективности. Становится возможным получение нового инструмента с ориентированными относительно тканевой основы зернами электрокорунда 14А, обладающего повышенной в 1,3–1,5 раза режущей способностью и стойкостью, в сравнении с известными однослойными шлифовальными инструментами на гибкой основе.

Ключевые слова: шлифовальный инструмент, поверхностный слой, ориентированность зерен абразива, электростатическое поле, производительность.

Введение

В настоящее время наибольший интерес в производственной деятельности для членов Всемирной организации безопасности абразивных материалов OSA и Европейской Федерации Производителей Абразивных Товаров FEPA представляет возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик шлифовальных инструментов на стадии проектирования и достижения необходимых параметров при изготовлении и последующей эксплуатации [1].

Для получения высоких показателей производительности отделочной обработки необходимо стабилизировать условия резания в контакте поверхности детали и зерна абразива. Рационально ориентированные зерна абразива обладают повышенной режущей способностью, поскольку резание материала происходит по изученным законам лезвийной обработки. Для решения этой задачи возникла потребность в исследовании, разработке и технологическом обеспечении процесса ориентации зерен абразива в электростатическом поле. При моделировании эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента

необходимо выявить влияние формы геометрии и направленной ориентации абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. По сравнению с другими инструментами форма и геометрия режущей части, которых определена и известна, геометрия и форма вершин зерен традиционного абразивного инструмента неопределенна [2].

Известна зависимость между определенным образом сориентированными структурами рабочих слоев шлифовальных инструментов, геометрия которых влияет на напряженно-деформированное состояние абразивных зерен при шлифовании и эксплуатационными характеристиками самого инструмента.

Предлагается повысить производительность отделочной обработки ленточным инструментом путем образования наиболее рациональной ориентации зерен абразива в рабочем слое, схема которой показана на рисунке 1.

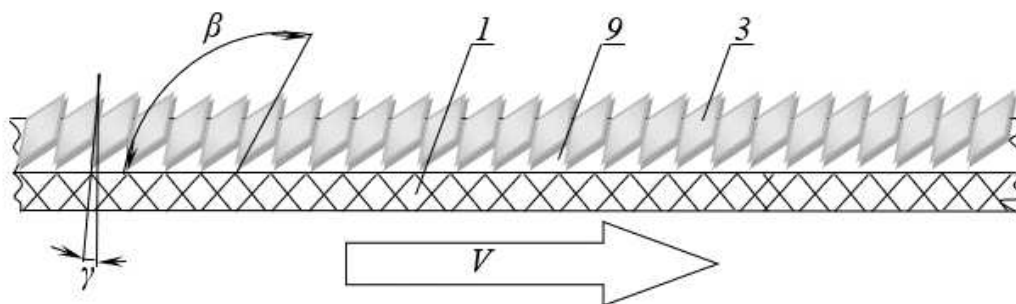


Рисунок 1 – Схема рациональной ориентации зерен абразива в рабочем слое относительно движения резания
1– эластичная основа; 2 – клеевая связка; 3– абразивный материал;
 γ - передний угол резания, град.;
 β - угол ориентированности абразива относительно основы, град.

Однако, не были известны научно обоснованные и экспериментально подтвержденные способы технологического обеспечения получения ориентированных ленточных шлифовальных инструментов и значений углов ориентирования абразива в рабочих слоях инструментов, используемых для шлифования конкретных конструкционных материалов. В связи с чем, указанная проблема является актуальной для изучения с целью управления поведением зерен абразива при формировании рабочего слоя инструмента для регулирования его эксплуатационных характеристик за счет реализации электростатического нанесения рабочего слоя из абразивных материалов [2-4].

Методы

Для достижения поставленной цели использовали анализ теоретических и практических знаний, закономерностей и факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики ленточных шлифовальных инструментов. Практические исследования базировались на методике комплексной оценки механических и эксплуатационных характеристик, включающей: отбор абразивных материалов для получения шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя по размерам, форме и восприимчивости абразивов к воздействию электростатического поля; исследование технологических параметров электростатического нанесения рабочего слоя из электрокорунда; исследование

характера расположения зерен абразива относительно поверхности тканевой основы и вектора направления движения резания; исследование эксплуатационных характеристик ленточного шлифовального инструмента с ориентированными зернами электрокорунда; статистическую обработку результатов исследований получения ленточного шлифовального инструмента методом электростатического нанесения рабочего слоя из ориентированных зерен электрокорунда.

Результаты и обсуждение

Процесс нанесения рабочего слоя инструмента под действием электростатического поля, схематично представленный на рисунке 2, описывается тремя последовательно протекающими стадиями: заряджение частицы, образование заряженного диполя с последующей его ориентацией в направлении действия электростатического поля; отрыв от поверхности электрода и полет заряженного диполя под действием электростатического поля; контакт и проникновение движущейся частицы в вязкую основу.

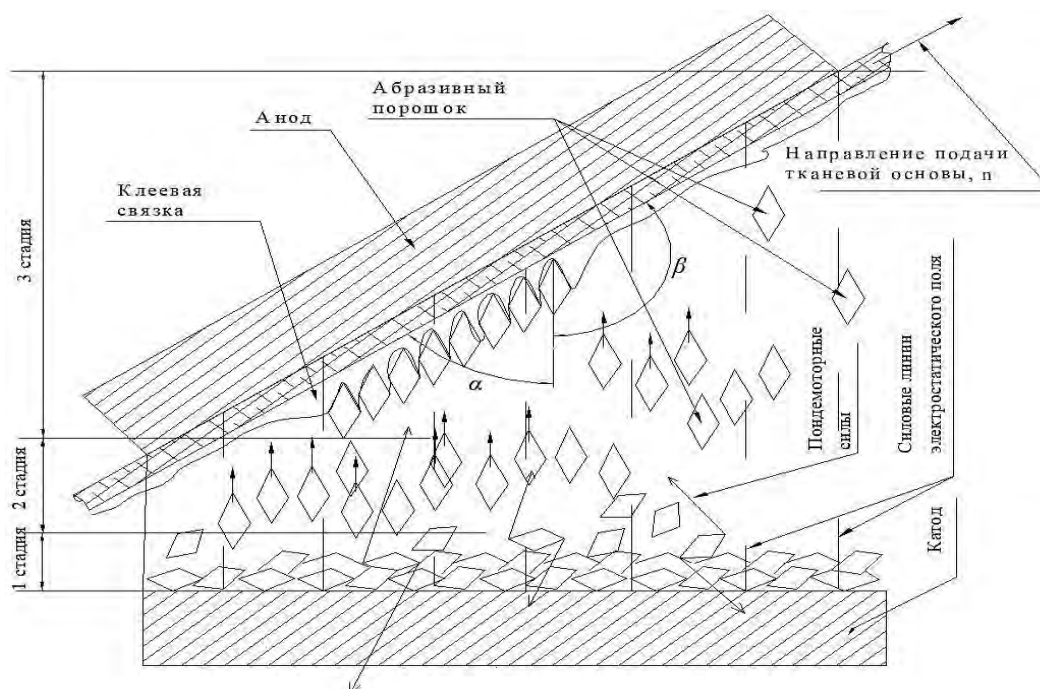


Рисунок 2 – Стадии процесса получения рабочего слоя ленточного шлифовального инструмента в электростатическом поле

В соответствии с требованиями неравноосности формы абразивных зерен принята физическая модель зерна абразива с соотношением сторон 4 к 1 в виде цилиндра с коническими концами и углом конусности 2γ . Для адекватного описания эффективного формирования рабочего слоя инструмента из зерен, ориентированных в электростатическом поле разработана система математических выражений, включающая зависимость, определяющую размеры зерен абразива от условий электростатического поля:

$$a \leq \frac{27\varepsilon_0\varepsilon}{4g\rho(\varepsilon + 2\varepsilon_0)} E^2 \quad (1)$$

где a – размер абразивного материала, м; E – напряженность электростатического поля, кВ/м; ρ – плотность абразивного материала, кг/м³, ε – относительная диэлектрическая

проницаемость частицы; ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

Зависимость, определяющую оптимальную дистанцию перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от размеров зерна, скорости и условий электростатического поля:

$$L = \frac{\pi 3a^3 \rho}{2} \frac{V^2}{9\varepsilon_0 E^2 - 4\rho a g} \quad (2)$$

где L – оптимальное расстояние нанесения абразива на проклеенную основу, м ;

Зависимость, определяющую скорость проникновения абразива v_0 , м/с в клеевую среду основы от размеров абразивного материала, действующих сил сопротивления при величине угла проникновения – γ :

$$v_0 = \sqrt{-\frac{2}{5} b H_{\max}^{5/2} F\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)} \quad (3)$$

при угле атаки $\alpha = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$, $\lambda \neq 0$, комплексном параметре гипергеометрической функции F и максимальной глубине проникновения абразива в клеевую среду H_{\max} , м ;

Зависимость, определяющую оптимальное расстояние перемещения абразива при его нанесении на тканевую основу от технологических параметров напряженности электростатического поля, марки и размера абразива, глубины и углов проникновения абразива, учитывая, что $V = v_0$:

$$L = \frac{\pi a^3 \rho b H}{\max_{\frac{5}{2}\left(-\frac{\alpha}{3\lambda}, \frac{5}{6}; \frac{11}{6}; -\lambda H_{\max}^3\right)}^{5(9\varepsilon_0 E^2 - 4\rho a g)}} \quad (4)$$

Описанные выражения являются основой для определения технологических параметров формирования рабочего слоя нанесением абразива в электростатическом поле. При получении инструмента важно обеспечить ориентированность абразивного зерна относительно эластичной основы на оптимальный угол. Попытки связать те или иные преимущества абразивного материала с различной формой и геометрией зерен не учитывают взаимное расположение зерен в рабочем слое инструмента, характер и степень перекрытия траекторий зерен в процессе движения, условия взаимодействия материала абразивного зерна с обрабатываемым материалом и образовавшейся стружкой, т.е. кинематические и динамические условия процесса шлифования. Различие в форме и геометрии ориентированных зерен не только не объясняет, а, наоборот, вуалирует приобретаемые в связи с их ориентированностью преимущества. Поэтому для анализа работы ориентированных зерен требуется заменить «неопределенные» зерна зернами эквивалентной формы, поддающимися математическому описанию. Такая операция связана с упрощением геометрических параметров и утратой некоторых физических свойств реальных зерен, однако позволяет определить влияние ориентированности абразивных зерен в рабочем слое на работоспособность инструмента и эффективность шлифования. В работах П.И. Ящерицына и А. Г. Зайцева, В. Н. Бакуля, А.В. Королева, М. Мацуи, Сато Седзаки при моделировании встречаются следующие допущения: 1) абразивные зерна приводят к форме шара одного радиуса r_0 ; 2) абразивные зерна заменяют цилиндром или эллипсоидом вращения с постоянным соотношением полуосей; 3) режущие вершины зерен заменяют эквивалентным конусом или пирамидой, имеющими угол при вершине, равный некоторой постоянной величине 2γ , т.е. не эквивалент зерна, а

модель его режущей части. Рассмотрим взаимодействие абразивного зерна и обрабатываемой поверхности заготовки при шлифовании. При врезании абразивного зерна в металл в нем возникают зоны текучести [6]. Удельная мощность взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла при шлифовании определили из зависимости

$$N_{y\delta} = K\rho V \cdot \sigma B \cdot \sin\Delta\beta \cdot V \quad (5)$$

где $K\rho V$ – коэффициент, учитывающий рост давления в контакте «зерно – металл»; σB – временное сопротивление разрушению обрабатываемого металла; $\Delta\beta$ – угол наклона контакта абразивного зерна к поверхности заготовки; V – скорость резания. При ударном взаимодействии абразивного зерна и заготовки, в поверхностном слое которой образуются зоны текучести, возникает неустойчивость и локализация пластической деформации. Из [6] известно, что засаливание абразивного зерна снижается по мере роста глубины внедрения абразивного зерна, что приводит к росту объема застойной зоны у передней поверхности, формированию ударной волны, приводящей к переводу металла в пластическое состояние. Соответственно, для повышения удельной мощности взаимодействия абразивных зерен и обрабатываемого металла при прочих равных условиях необходимо сориентировать абразивные зерна в рабочем слое инструмента. В связи с этим представим геометрию резания ориентированным абразивным зерном в соответствии с рисунком 3.

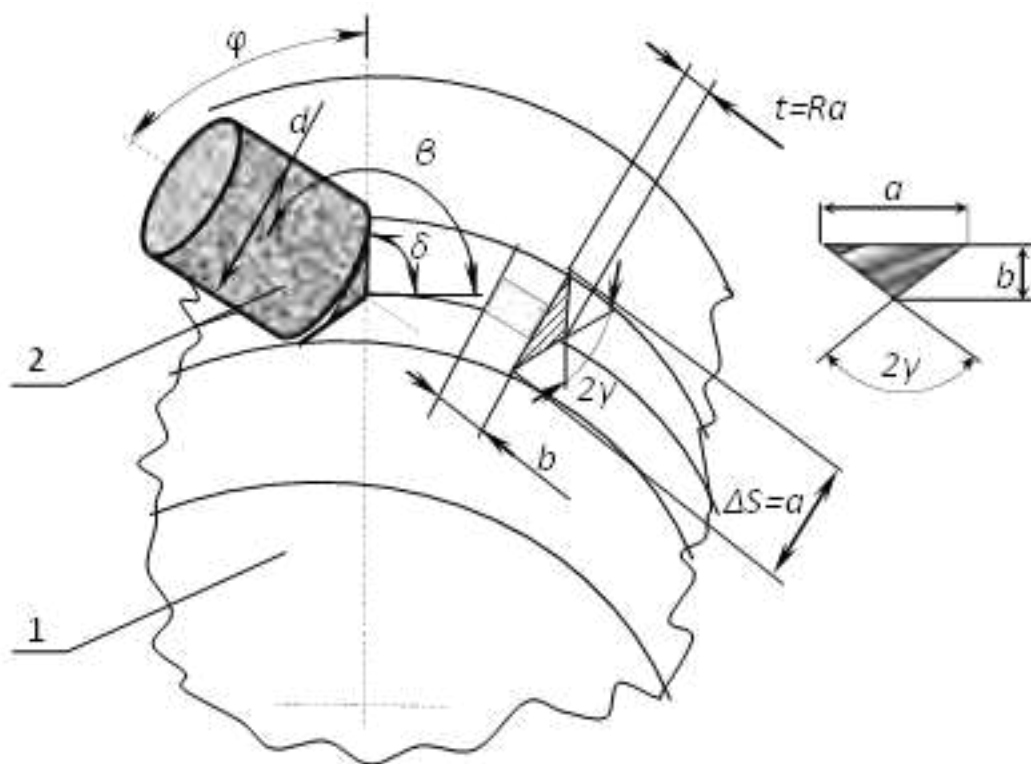


Рисунок 3– Схема резания ориентированным абразивным зерном
1 – обрабатываемая заготовка, 2 – абразивное зерно

При исследовании процесса шлифования поверхности заготовки одиночным зерном абразива учтено, что величина глубины резания t и ширина срезаемого слоя b находятся в прямой зависимости от размеров и геометрии абразивного зерна. Режущую способность ленточного шлифовального инструмента с направленной

ориентацией абразивных зерен в рабочем слое определили соотношением объема сошлифованного материала $V_{общ}$ с заготовки за единицу времени τ по формуле

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n a \cdot \sin\beta}{4\tau} \cdot n_i \cdot \pi D \cdot l \cdot n_{об} \quad (6)$$

Исходя из того, что при традиционной схеме хаотического расположения абразива в шлифовальных инструментах примерно 78% зерен являются не режущими, 12% – давящими и только 10% – режущими, можно предположить, что у инструмента с ориентированными зернами все зерна являются режущими [2]. Следовательно, можно допустить, что шлифовальный инструмент с ориентированными зернами абразива в рабочем слое имеет максимальную режущую способность Q_{max} , а инструмент с хаотическим расположением зерен минимальную Q_{min} . В соответствии с проведенными расчетами выявлено, что при ориентировании зерен абразива в рабочем слое ленточного шлифовального инструмента его режущая способность может изменяться в диапазоне от $q_{min} = 0,5k/0,75k = 0,66k$ до $q_{max} = k/0,75k = 1,33k$ раз, поскольку $q_{nom} = 1,33k/0,66k = 2$ раза. В соответствии с выражением (6) определены расчетные значения режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента при углах ориентированности β зерен абразива зернистостью a равной 0,10 мм, 0,16 мм и 0,20 мм (рисунок 4) [3]. В соответствии с данными расчетов для всех зернистостей абразивных зерен максимальное значение режущей способности Q_{max} достигается при угле ориентированности абразива относительно основы $\beta=90^\circ$. Например, для абразивных зерен зернистости $a = 0,1$ мм режущая способность $Q_{max} = 255$ мм³/мин. Оптимальные значения углов ориентированности β для исследуемых зернистостей абразива установили в соответствии со статистическим методом графического определения оптимальных границ, проведя отрезок из точки 0(90) под 45° на рисунке 4.

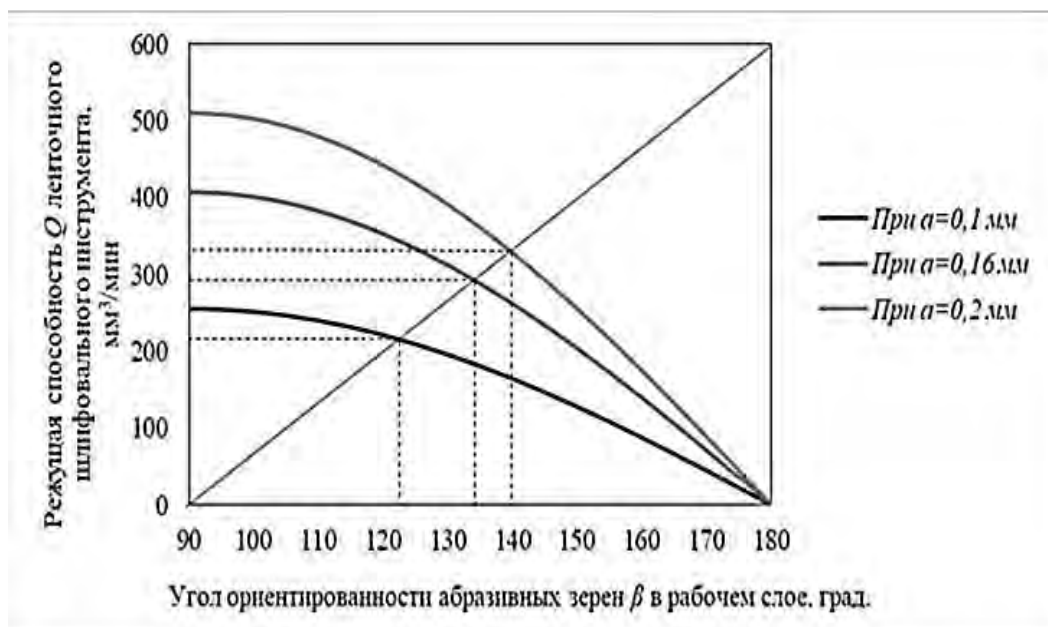


Рисунок 4 – Зависимость режущей способности Q ленточного шлифовального инструмента от угла ориентированности абразивных зерен β

В результате для зерен размером $a = 0,1$ мм оптимальное значение угла ориентированности $\beta = 123^\circ$ при котором режущая способность $Q = 214 \text{ мм}^3/\text{мин}$, что согласуется с алгебраическими расчетами. Для зерен размером $a = 0,16$ мм $\beta = 135^\circ$, а $Q = 288,98 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Для зерен размером $a = 0,2$ мм $\beta = 140^\circ$, а $Q = 328,46 \text{ мм}^3/\text{мин}$ [5].

При целенаправленном ориентировании зерен абразива размером $a = 0,1$ мм под углом $\beta = 123^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 214/165 = 1,3$ раза. При ориентировании зерен абразива размером $a = 0,16$ мм под углом $\beta = 135^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 288,98/200 = 1,4$ раза, а при ориентировании зерен абразива размером $a = 0,2$ мм под углом $\beta = 140^\circ$ режущая способность инструмента увеличится в $q = 328,46 \cdot 214/216 = 1,5$ раза, что соответствует прогнозируемому [7].

Заключение

Значительное влияние на режущую способность и стойкость абразивного зерна оказывает его ориентированность относительно движения резания, и изменение угла ориентирования зерен абразива в рабочем слое на $120-140^\circ$ относительно основы должно приводить к увеличению производительности примерно в 1,5 раза, что является весьма ощутимым резервом использования абразивных материалов в шлифовании. Повышению долговечности инструмента будет способствовать применение эластичных связок, обладающих высокой адгезионной способностью к наполнителю, способных выдерживать без разрушения перемещение абразивного зерна до половины его размера. Расположение зерен абразива под углом β к эластичной основе требует применения связок, исключающих возможность образования пор при отверждении. Благодаря наличию растягивающих напряжений в прилегающих к режущей кромке областях и периодическому разрушению кромок при резании ориентированным абразивом обеспечивается его самозатачивание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, Ch. Guo // New York :IndustrialPressInc. - 2008. - 372 p.
2. Никифоров, И.П. Состояние и перспективы производства абразивных материалов / И.П. Никифоров // Труды ППИ. Сер. Машиностроение. Электротехника. - 2012 -№ 15.3. - С. 265-270.
3. Кириенко, А.С. Влияние технологических параметров формирования рабочего слоя инструмента с ориентированными зёрнами на его эксплуатационные характеристики / А.С. Кириенко // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр./ редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. - Минск: Беларус. навука, 2018. Вып. 41. - С.257-262.
4. Кириенко, А.С. Инновационные решения в области изготовления эластичных шлифовальных инструментов / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : материалы Международной научно-технической конференции, Брест, 27-28 мая 2019 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: М. В. Нерода [и др.]. - Брест : БрГТУ, 2019. - С. 83-85.
5. Кириенко, А.С. Ленточный шлифовальный инструмент с ориентированным рельефом абразивосодержащего поверхностного слоя / А.С. Кириенко // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. - 2018. - № 6. - С. 90-95.
6. Никифоров, И.П. Роль внешнего и внутреннего трения в процессе микрорезания абразивным зерном / И.П. Никифоров, П.Н. Мальцев // Вестник Псковского

государственного университета. Сер. Экономические и технические науки. - 2012. - № . - С. 116-123.

7. Кириенко, А.С. Оптимизация расположения зерен абразива при электростатическом нанесении рабочих слоев эластичного инструмента с управляемой режущей способностью / А. С. Кириенко, С. Э. Завистовский // Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. Ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега; д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок. - Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. - С. 136-141.

A.S. Kiryienka, S.E. Zavistovsky, V.E. Zavistovsky
Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus,
a.kirienko@psu.by

IMPLEMENTATION OF TECHNOLOGY FOR MANAGING THE FORMATION OF ORIENTED STRUCTURES IN FLEXIBLE ABRASIVE TOOLS

Abstract

The authors of the article present the theory and practice of implementing the technology for obtaining single-layer abrasives containing surfaces of elastic grinding tools with abrasive grains oriented in an electrostatic field. The manufacture of modern elastic grinding tools solves important tasks for industrial production to reduce the material intensity of products and increase efficiency. As a result of the work done, a new tool with 14A electrocorundum grains oriented relative to the fabric base was obtained, which has an increased cutting power and resistance by 1.3-1.5 times at a 1.8 times lower cost, in comparison with the known single-layer grinding tools on a flexible basis.

Keywords: grinding tool, surface layer, orientation of abrasive grains, electrostatic field, productivity.

В.Н. Кудрявцев, В.С. Кобчиков
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 Санкт-Петербург, Россия, kudryavtsevvn@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫМ ПОЛИРОВАНИЕМ

Аннотация

В работе проведено исследование обрабатываемости твёрдых сплавов магнитно-абразивным полированием. По результатам исследования предложена методика более простого технологического расчёта процесса магнитно-абразивной обработки, что позволит значительно расширить сферу применения этого метода обработки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, магнитно-абразивное полирование, твёрдый сплав, магнитно-абразивный порошок, объемный удельный съём

Введение

В настоящее время промышленностью выпускается более 150 марок твердых сплавов, которые отличаются друг от друга своими физико-механическими свойствами. Для определения степени влияния их (физико-механических свойств) на интенсивность магнитно-абразивного полирования (МАП) и направлено данное исследование.

Применение МАП показало высокую эффективность в машиностроении [1]. Применительно к твёрдым сплавам применение МАП показало неоднозначное влияние на производительность и качество обработанной поверхности [2].

Предпринимаются различные попытки описания процессов, протекающих при магнитно-абразивной обработке [3]. При этом исследования проводились для немагнитных заготовок (рис. 1). Твёрдосплавные материалы могут очень сильно изменять свои магнитные свойства, поэтому приведенные модели имеют ограниченное применение для магнитно-абразивной обработки (МАО) твёрдосплавных материалов [4].

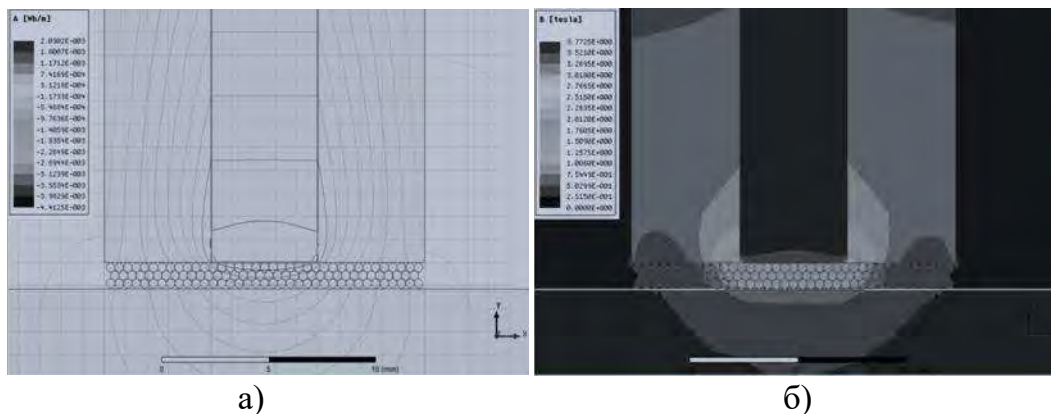


Рисунок 1 – Графическое отображение МАО: а) – картина силовых линий магнитного поля; б) – распределение магнитной индукции

В твердых сплавах, как правило, ферромагнитны только кобальт или небольшое количество железа или никеля. Карбид вольфрама, а также хрупкие двойные карбиды, которые могут образовываться при недостатке углерода или неправильном спекании, немагнитны. В намагничивании участвует, следовательно, только кобальтовая составляющая, не связанная в виде двойного карбида. По значениям магнитной индукции можно таким образом судить о содержании кобальта, а если содержание углерода определено химическим анализом, то и о наличии фазы и, следовательно, о неполном науглероживании WC-Co твердых сплавов. В твердом сплаве двойные карбиды, увеличивающие хрупкость, очень нежелательны. Измеряя магнитное насыщение, можно проверить хрупкость без разрушения образца (иначе эту фазу можно установить только металлографически).

Методы

При экспериментальном определении обрабатываемости режим:

Таблица 1 – Условия проведения эксперимента

Условия	Величина
1. Магнитная индукция на полюсах	$B=1,2Тл$
2. Окружная скорость образца	$v_0 = 0,79 м/с$
3. Подача	$s_n = 82 мм/мин$
4. Рабочие зазоры	$\delta = 1 мм$
5. Частота осцилляции образца	$n_{osci} = 450 1/мин$
6. СОЖ – 5%-ный раствор эмульсола Э2 в воде	
7. Коэффициент заполнения межполюсного пространства порошком	$K = 1,0$
8. Начальная шероховатость обрабатываемых поверхностей образцов, полученная алмазным шлифованием	$R_z = 2,7 мкм$

В исследовании применялись методы прямого физического эксперимента, методики планирования полнофакторного эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Для сравнения обрабатываемости были выбраны марки твердых сплавов BK8, T15K6, T5K10, а также безвольфрамовые сплавы KHT16 и TH20. Обобщенные данные по обрабатываемым материалам сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства твердых сплавов

Материал	Твёрдость, HRA	Предел прочности на изгиб $\sigma_{изг}$ ГПа	Плотность, $г/см^3$
BK8	87,5	1,72	14,6
T5K10	88,5	1,49	12,7
T15K6	90	1,15	11,3
KHT16	89	1,15	5,8
TH20	89,5	1,00	5,6

В качестве магнитно-абразивных порошков были выбраны наиболее производительные: механическая смесь АСМ-Fe и МАП-А.7.315.Н.

Результаты и обсуждение

Оценивали обрабатываемость по удельному съёму q_1 . Наилучшей обрабатываемостью обладали сплавы Т15К6, ТН20 и Т5К10. Твёрдый сплав ВК8 обрабатывается хуже. Так как плотности вольфрамсодержащих и безвольфрамовых твёрдых сплавов неодинаковы (табл.2), то значение массового удельного съёма q_1 не позволяет сравнить обрабатываемость этих сплавов и были пересчитаны на удельный объём q_1' по формуле

$$q_1' = \frac{q_1}{\rho}, \text{ мм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}, \quad (1)$$

где q_1 – массовый удельный съём, мг/(см²·мин);
 ρ – плотность мг/мм³.

Полученные результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Характеристики обрабатываемости твёрдых сплавов МАП

Обрабатываемый материал	Порошок	q_1 , мг/(см ² ·мин)	m	τ_{Rz} , мин	q_1' , мм ³ /(см ² ·мин)
ВК8	мех. смесь АСМ-Fe	5,2	0,98	-	0,36
	МАП-А.7.315.Н	7,1	0,98	3	0,49
Т5К10	мех. смесь АСМ-Fe	6,4	0,99	-	0,5
	МАП-А.7.315.Н	8,8	0,99	2	0,69
Т15К6	мех. смесь АСМ-Fe	9,4	0,99	-	0,83
	МАП-А.7.315.Н	12,8	0,99	1	1,13
КНТ16	мех. смесь АСМ-Fe	6,1	0,97	2	1,05
	МАП-А.7.315.Н	8,4	0,98	0,8	1,45
ТН20	мех. смесь АСМ-Fe	7,3	0,97	1,5	1,3
	МАП-А.7.315.Н	10,0	0,98	0,8	1,79

Сопоставление величин объёмного удельного съёма q_1' с физико-механическими свойствами сплавов (табл. 2) позволяет предположить взаимосвязь предела прочности на изгиб $\sigma_{изг}$, твёрдости HRC с объёмным удельным съёмом q_1' . Для проверки этой гипотезы использовали корреляционный анализ. Коэффициенты корреляции получились близкими к единице, что подтверждает наличие функциональной зависимости между обрабатываемостью с одной стороны и

пределом прочности на изгиб и твёрдостью – с другой. Взаимозависимость между объёмным удельным съёмом q_1' и пределом прочности на изгиб σ_{izg} более явно выражена. Полученные отрицательные значения коэффициента корреляции при статистическом анализе экспериментальных данных говорят о том, что объёмный удельный съём q_1' уменьшается с увеличением предела прочности на изгиб σ_{izg} . Из табл. 2 видно, что чем больше предел прочности на изгиб σ_{izg} для твёрдого сплава, тем меньше твёрдость этого сплава. А, следовательно, с увеличением твёрдости обрабатываемого материала объёмным удельным съёмом q_1' должен возрасти, что и подтвердил корреляционный расчёт.

Обработка данных табл. 2 и 3 методом наименьших квадратов показала, что между пределом прочности на изгиб σ_{izg} и объёмным удельным съёмом q_1' существует математическая зависимость вида:

$$q_1' = \frac{a}{\sigma_{izg}^p}, \text{ мм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}, \quad (2)$$

где a – коэффициент зависящий от режима МАП;

p – показатель степени, характеризующий влияние на обрабатываемость твёрдого сплава.

Этот коэффициент будет общим для двух выбранных порошков, с которыми были проведены исследования. Расчёт позволил определить показатель степени p . Он равен значению 2,4. Следовательно обобщённая зависимость примет вид:

$$q_1' = \frac{a}{\sigma_{izg}^{2,4}} \text{ мм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}. \quad (3)$$

Полученные значения коэффициента a приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Значения коэффициентов a при МАП твёрдых сплавов

Порошок	Коэффициент a , мм ³ ·ГПа/(см ² ·мин)
мех. смесь АСМ-Fe	1,3
МАП-А.7.315.Н	1,8

Зависимость объёмного удельного съёма q_1' от твёрдости обрабатываемого материала имеет математическую зависимость в виде:

$$q_1' = c(HRC)^K, \text{ мм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}. \quad (4)$$

Для этой зависимости расчётные коэффициент c и показатель степени K даны в табл. 5.

Таблица 5 – Расчётные значения коэффициентов c и показателей степени K при МАП твёрдых сплавов

Порошок	c	K
мех. смесь АСМ-Fe	$1,5 \cdot 10^{-5}$	29
МАП-А.7.315.Н	$1,7 \cdot 10^{-5}$	30,1

Заключение

В ходе выполнения исследования в чётко заданных условиях определены характеристики обрабатываемости твёрдых сплавов методом МАП. При этом были найдены функциональные зависимости между физико-механическими свойствами твёрдых сплавов и обрабатываемостью их МАП. Получены математические формы этих зависимостей и найдены необходимые коэффициенты и показатели. Полученные математические зависимости позволяют значительно упростить технологическую подготовку производства при обработке твёрдых сплавов в промышленных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. - Л.: Машиностроение, 1986. - 176 с.
2. Кобчиков В.С. Технология магнитно-абразивного полирования изделий из твёрдых сплавов: автореф., дисс. ... канд. Техн. Наук/ В.С. Кобчиков; Ленингр. политех. ин-т. - Ленинград: 1983. - 16 с.
3. Исследование состояния равновесия зерен магнитно-абразивного порошка / С. Л. Леонов, А. М. Иконников, Р. В. Гребеньков // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2018. - № 3. - С. 10-14.
4. Кульавик, А.А. Расчет магнитных сил, действующих на зерна ферромагнитного порошка в процессе магнитно-абразивной обработки / А.А. Кульавик, С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении: сб. тр. III всерос. молодеж. науч.-практ. шк. (29- 30 нояб. 2017 г.). - Кемерово: КузГТУ, 2017. - Режим доступа:
<http://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/School/utec/2017/school/pages/Articles/108.pdf>.

V.N. Kudryavtsev, V.S. Kobchikov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, kudryavtsevvn@mail.ru

IMPROVEMENT OF METHODS OF WORKABILITY OF HARD ALLOYS BY MAGNETIC ABRASIVE POLISHING

Abstract

In this work, a study was made of the machinability of hard alloys by magnetic-abrasive polishing. Based on the results of the study, a method for a simpler technological calculation of the magnetic-abrasive machining process was proposed, which will significantly expand the scope of this processing method.

Keywords: magnetic abrasive machining, magnetic abrasive polishing, carbide, magnetic abrasive powder, volumetric specific removal

А.И. Попов, А.С. Фумин, С.А. Кислицын, А.П. Веселовский, М.М. Радкевич
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, popov_ai@spbstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА СТРУИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО КАТОДА К МЕТАЛЛИЧЕСКОМУ АНОДУ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБРАБОТКИ

Аннотация

В работе рассмотрено влияние угла наклона струи электролитического катода к поверхности металлического анода при атмосферном давлении и объемных расходах электролита до 90 л/ч. Исследование проводилось при углах наклона струи к обрабатываемой поверхности до 10°, температурах потока электролита до 80°C и межэлектродных промежутках до 25 мм. Показано, что наибольшее влияние на электрическое сопротивление столба электролита оказывает температура электролита, межэлектродное расстояние и этот угол наклона струи к обрабатываемой поверхности. Сопротивление межэлектродного промежутка является величиной обратной величине тока на поверхности металлического анода и в свою очередь определяет скорость съема материала с поверхности изделия. Результаты данных исследований могут быть использованы при обработке криволинейной поверхности турбинных лопаток.

Ключевые слова: температура, электролитический катод, углы наклона струи металлический анод, межэлектродный промежуток, турбинные лопатки.

Введение

В настоящее время развитие производственных процессов, определяющих развитие предприятий и территорий во многом зависит от применения современных технологий [1, 2].

К числу таких современных методов можно отнести технологические методы, формирующие поверхность за счет локальной обработки. Среди этих методов можно отметить такие как обработка лазером, гидроабразивная обработка, обработка струей плазмы и газа [3-5]. Преимущество данных технологий заключается в формировании локальной зоны обработки, в которой происходит собственно технологический процесс и которую можно перемещать как в ручном сканировании по поверхности, так и в автоматизированном [6, 8]. Это позволяет с малыми затратами энергии обрабатывать достаточно большие изделия, которые невозможно или трудно поместить в технологический объем (ванну) и подать энергию для обработки всей конструкции. Метод струйной электролитно-плазменной обработки входит в число методов локальной обработки. Это позволяет обрабатывать поверхность с малыми размерами и низким потреблением энергии 2,5–7 кВт [9-15]. Однако применение струйной обработки требует знания закономерностей, связанных с электрическими параметрами процесса, которые как предполагается во многом зависят от угла подачи электролита на поверхность изделия, температуры процесса и межэлектродного промежутка. Однако несмотря на значительный объем исследований электрических параметров межэлектродных промежутков при малых расстояниях от 5-500 мкм, вопрос измерения электролитической струи при разных углах наклона к поверхности,

температурах и межэлектродных промежутках в литературных источниках является мало изученным [16-23]. Поэтому целью нашей работы является изучение закономерностей процесса струйной электролитно-плазменной обработки при разных температурах, углах наклона и межэлектродных промежутках.

Методы

При измерении электрических параметров струйного электролитно-плазменного разряда использовалась следующая схема измерения (рис.1).

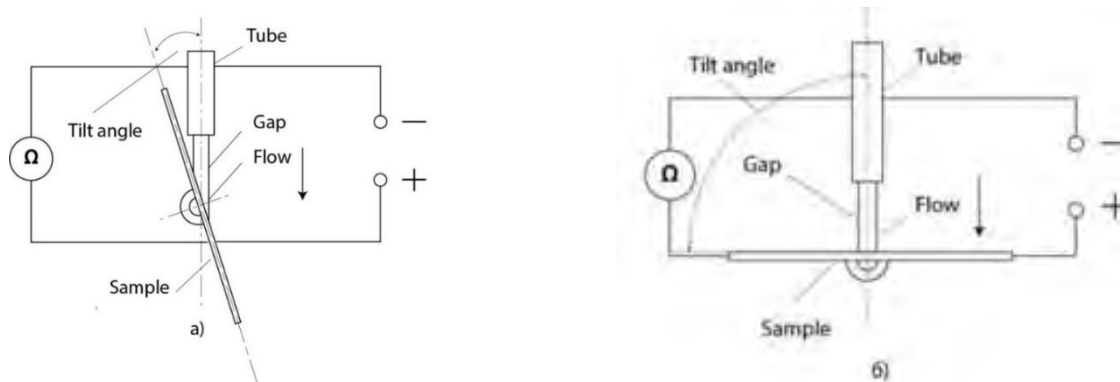


Рисунок 1 – Схема измерения сопротивления столба электролита:
а) исходное положение образца; б) конечное положение образца

Электрод-инструмент в виде медной трубки, наружным диаметром 5мм и внутренним 3 мм располагался над поверхностью анода на расстоянии от 3 до 25 мм.

Поверхность металлического анода из нержавеющей стали 08X18Н9Т, с размером образца 45*45*1 мм имела ось вращения относительно электрода инструмента. При этом угол наклона струи к обрабатываемой поверхности устанавливался от 10-90°.

На металлический анод и трубку полого напряжение не подавалось. Измерение электрического сопротивления проводилось при изменении угла наклона струи к обрабатываемой поверхности, изменении межэлектродного промежутка, изменении температуры поступающего в межэлектродный промежуток электролита. В качестве электролита использовались NaNO_3 концентрацией $k = 50$ г/л, объемным расходом от 20 -50 л/ч и Na_2SO_4 с концентрацией $k = 30$ г/л, объемным расходом от 13 л/ч. Температура электролита контролировалась ртутным термометром. Электрическое сопротивление измеряли цифровым мультиметром UT61B.

Результаты и обсуждение

В результате измерений нами была получена зависимость сопротивления столба электролита NaNO_3 от высоты межэлектродного зазора и температуры при объемном расходе электролита 21 л/ч (рис 2.). Анализ зависимости показывает, что с увеличением величины межэлектродного промежутка пропорционально увеличивается его электрическое сопротивление. При увеличении температуры с 20 до 80°C электрическое сопротивление уменьшается до 3-6 раз (рис.3).

При постоянной величине межэлектродного промежутка равной 10 мм и изменении угла наклона струи к обрабатываемой поверхности были и малых объемных расходах получены следующие результаты.

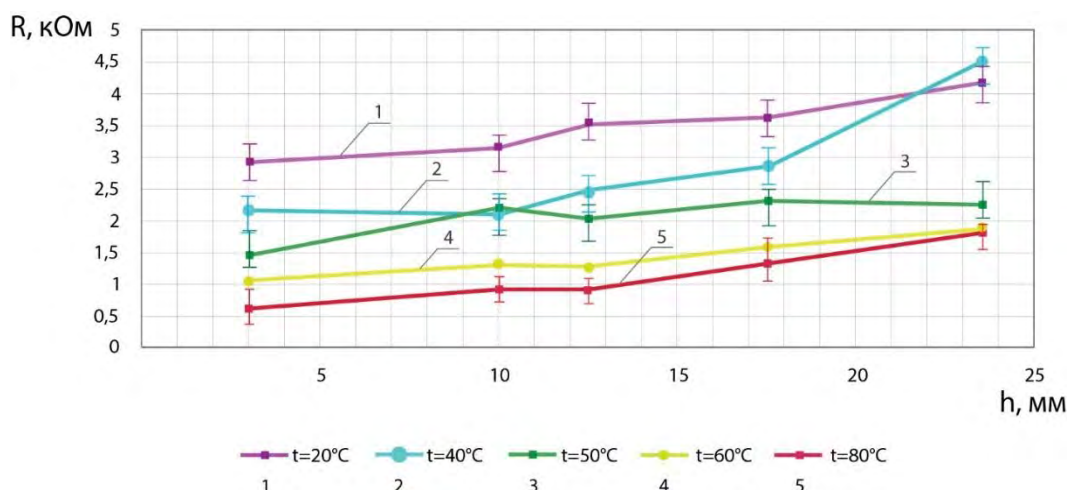


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления столба электролита NaNO₃ от высоты межэлектродного зазора и температуры (объемный расход электролита 20 л/ч).

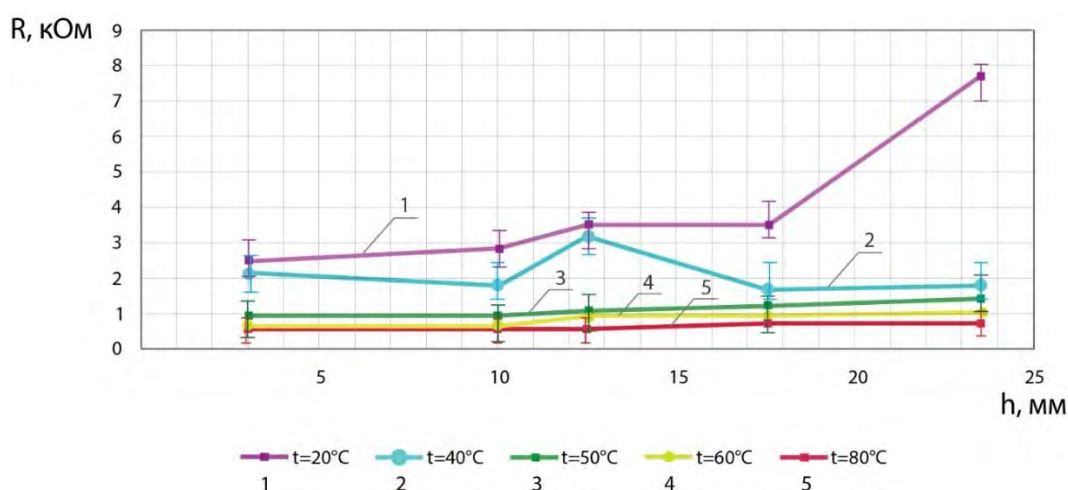


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления столба электролита NaNO₃ от высоты межэлектродного зазора и температуры (объемный расход электролита 50 л/ч).

Сопротивление межэлектродного промежутка при комнатной температуре электролита значительно возрастает при уменьшении угла наклона струи к обрабатываемой поверхности. При этом разница при вертикальном положении струи и угле падения в 10° отличается в семь раз. Увеличение температуры электролита приводит в этом случае к уменьшению разброса значений электрического сопротивления в зависимости от угла наклона струи к обрабатываемой поверхности.

Результаты данных исследований могут найти свое технологическое применение для обработки поверхности турбинных лопаток [2-4].

Заключение

Электрическое сопротивление столба электролитической струи имеет значительный разброс по значениям. Это обусловлено параметром электрического сопротивления, как величины обратно пропорциональной значениям тока, определяющего в конечном итоге значения скорости съема материала с поверхности

образца. Однако уменьшение значения угла наклона струи к обрабатываемой поверхности приводят к возрастанию электрического сопротивления и соответственно уменьшению величины тока, проходящего через локальную область. Повышение температуры электролита приводит к «выравниванию» электрического сопротивления между различными значениями угла наклона струи к обрабатываемой поверхности и межэлектродного промежутка.

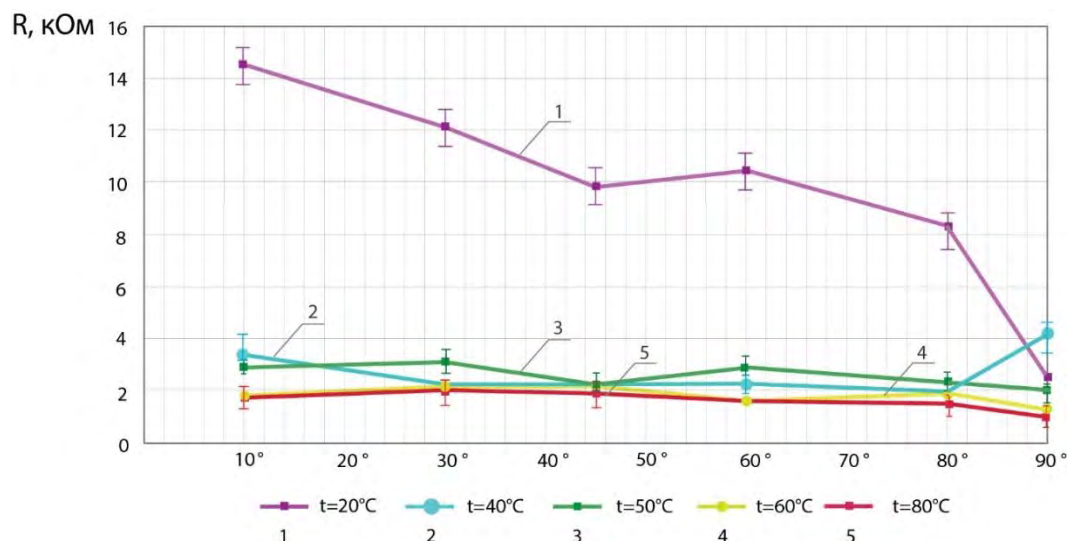


Рисунок 4– Зависимость сопротивления столба электролита NaNO_3 от угла наклона струи к обрабатываемой поверхности и температуры (объемный расход электролита 20 л/ч).

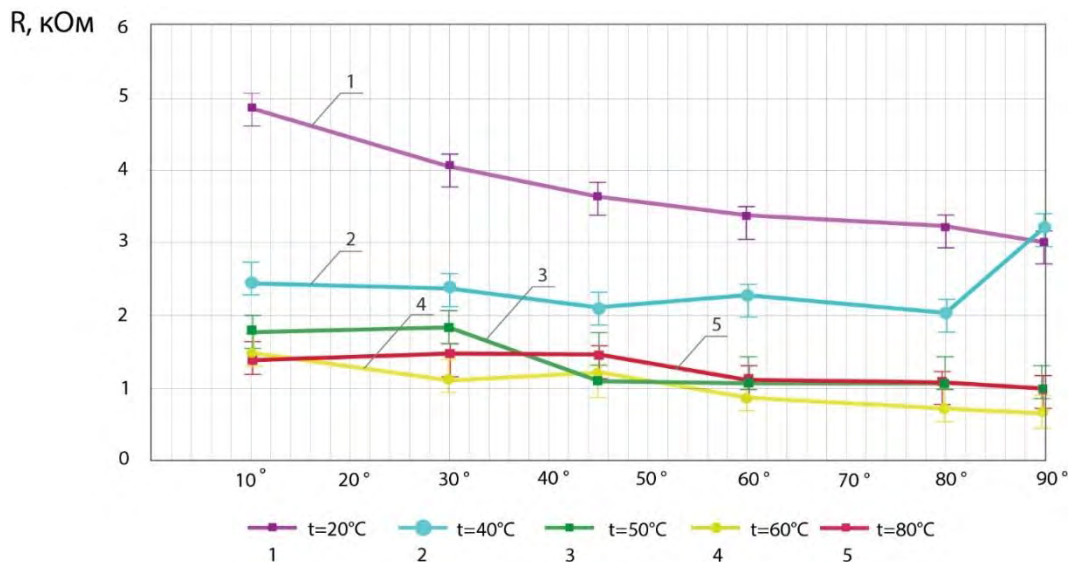


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления столба электролита NaNO_3 от угла наклона струи к обрабатываемой поверхности и температуры (объемный расход электролита 50 л/ч).

Выводы

1. Выходные параметры процесса обработки во многом зависят от угла наклона струи к обрабатываемой поверхности.

2. Необходимо учитывать тот факт, что при ортогональном положении струи электролитического катода достигаются максимальные значения силы тока в межэлектродном промежутке.

3. Уменьшение угла наклона струи к обрабатываемой поверхности приводит при любых значениях температуры к увеличению удельного сопротивления и значит к снижению скорости съема материала с поверхности металлического анода.

4. Повышение температуры поступающего в межэлектродный промежуток электролита позволяет значительно выровнять значения электрического сопротивления в зависимости от угла наклона струи к обрабатываемой поверхности и высоты межэлектродного промежутка.

Благодарность

Авторы выражают свою признательность графическому дизайнеру Поповой Диане Александровне за подготовку иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попова, А. И. Северо-Западный регион в системе мирохозяйственных связей / А. И. Попова // Интеграция экономики в систему мирохозяйственных связей: Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23-25 октября 2012 года. - Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2012. - С. 100-102. - EDNWDWGQF.

2. Институциональные аспекты инновационной экономики: монография / Т. И. Безденежных, В. В. Шапкин, О. В. Угольникова [и др.]; Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики, 2012. - 131 с. - ISBN 978-5-228-00590-7. - EDNTLVEJZ.

3. Дуганов, В. Я. Обработка поверхностей лазером в машиностроении / В. Я. Дуганов, А. Г. Корнюшина // Научоемкие технологии и инновации: сборник докладов международной научно-практической конференции, Белгород, 06-07 октября 2016 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. - Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. - С. 46-49. - EDNYNLXWV.

4. Иванов, П. А. Обработка материалов на установке гидроабразивной резки / П. А. Иванов // Advances in Science and Technology: Сборник статей XXIV международной научно-практической конференции, Москва, 31 октября 2019 года. - Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность. РФ", 2019. - С. 120-121. - EDNVHXTZR.

5. Кузьмин, И. В. Плазменная обработка - один из прогрессивных технологических процессов обработки металлов / И. В. Кузьмин, И. С. Царенко // В мире научных открытий : Материалы IV Всероссийской студенческой научной конференции (с международным участием), Ульяновск, 20-21 мая 2015 года. - Ульяновск: Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина, 2015. - С. 159-161. - EDNUHORID.

6. Бочкарев, Д. Применение лазеров, как метод повышения автоматизации технологического процесса / Д. Бочкарев // Сборник студенческих работ "Первые шаги в науку»: 2017-2018 учебный год, Майкоп, 29 апреля 2018 года / Майкопский

государственный технологический университет, Инженерно-экономический факультет. - Майкоп: Индивидуальный предприниматель Кучеренко Вячеслав Олегович, 2018. - С. 38-39. – EDNVBVVOO.

7. Сницар, Л. Р. Эволюция лазерной обработки материалов / Л. Р. Сницар, И. Н. Леденева // Парадигмальные установки естественных и гуманитарных наук: междисциплинарный аспект: Материалы XVI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях, Ростов-на-Дону, 30 декабря 2021 года. - Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «ИЗДАТЕЛЬСТВО ВВМ», 2021. -С. 554-556. - EDN ZRHTSE.

8. Popov A.I., Radkevich M.M., Kudryavtsev V.N., Zakharov S.V., Kuzmichev I.S. Installation for electrolytic-plasma treatment of turbine blades. Patent for invention of the Russian Federation No. 2623555. Cl. IPC: C25F7 / 00. 27.06.2017.

9. Popov A.I., Popova A.I., Popova D.A., Process aspects of jet electrolytic plasma processing, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology, 25 (4 2019).

10. Bagautdinova, L.N., Gaisin, F.M. A multichannel discharge in conducting liquid at atmospheric pressure. High Temp 48, 126 – 128 (2010).
<https://doi.org/10.1134/S0018151X10010153>.

11. Gaisin A.F., Basyrov R.Sh. and Son E.E. “Model of a Glow Discharge between an Electrolyte Anode and Metal Cathode,” Teplofiz. Vysok. Temp. 53 (2), 193 - 197 (2015) (rus.).

12. Popov, A.I., Novikov, V.I. & Radkevich, M.M. Characteristics of the Development of Electric Discharge between the Jet Electrolyte Cathode and the Metal Anode at Atmospheric Pressure. High Temp 57, 447 – 457 (2019).
<https://doi.org/10.1134/S0018151X19030118>.

13. Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G. Thinnest finishing treatment with a focused jet of electrolytic plasma. Lecture Notes in Mechanical Engineering (см. в книгах). 2020. P. 139-149.

14. Ushomirskaya L. A., Veselovsky A. P., Golovitsky A. P., Kuminov S. Ye./ Osobennosti razvitiya elektricheskogo razryada pri elektrolitno-plazmenom polirovanii (Features of the development of an electric discharge during electrolytic-plasma polishing) // Metalloobrabotka (Metal processing). 2006. No. 4. P. 13-15 (rus.).

15. Kulikov I.S. Osnovnye osobennosti i perspektivy primeneniya tekhnologii elektrolitno-plazmennoj obrabotki materialov (Main features and prospects of application of technology of electrolytic-plasma processing of materials) // Sovremennye problemy zheleznodorozhnogo transporta: sbornik trudov po rezul'tatam mezhdunarodnoj internet-konferencii (Modern problems of railway transport: a collection of works based on the results of an international Internet conference) - V.2 , ed. K.A. Sergeev, 2019. - P. 8 -14 (rus.).

16. Slovetskiy D.I., Terent'ev S.D., Plekhanov V.G. The mechanism of plasma-electrolyte heating of metals High Temperature, 24:2 (1986), 277-285.

17. Nestler K., Böttger-Hiller F., Adamitzki W., Glowa G., Zeidler H., and Schubert A. // Plasma Electrolytic Polishing - An Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range // Procedia CIRP. 2016. V. 42. P. 503-507.

18. Alekseev Yu.G., Korolev A.Yu. Parshuto A.E. Niss V.S. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka pri nestacionarnykh rezhimakh v usloviyah vysokogradientnogo elektricheskogo polya (Electrolytic-plasma treatment under non-stationary modes in a high-

gradient electric field) // Nauka i tekhnika (Science and Technology). 2017. Vol.16, No. 5. p.391 (rus.).

19. Zakharov, S.V., Korotkikh, M.T. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model 2020 Lecture Notes in Mechanical Engineering c. 193-208.

20. Danilov, I., Paul, R., Hackert-Oschätzchen, M., Zinecker, M., Quitzke, S., Schubert, A. Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasmaelectrolytic polishing of stainless-steel Procedia CIRP Volume 95, 2020, Pages 981-986 20th CIRP Conference on ElectroPhysical and ChemicalMachining, ISEM 2020; Zurich, Online; Switzerland; 19 January 2021 до 21 January 2021.

21. Korolyov A. YU. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka v upravlyaemyh impul'snyh rezhimah (Electrolytic-plasma treatment in controlled pulse modes) // Nauka i tekhnika (Science and technology). 2021. V. 20, No 4. P. 279-286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286> (rus.).

22. Yerokhin A., Pilkington A., Matthews Pulse A. current plasma assisted electrolytic cleaning of AISI 4340 steel Journal of Materials Processing Technology Volume 210, Issue 1, 1 January 2010, Pages 54-63.

23. Galimzyanov I.I., Gaisin A.F., Fakhrutdinova I.T., Shakirova E.F., Akhatov M.F., Kayumov R.R. "Characteristics of the development of electric discharge between jet anode and liquid cathode", TVT, 56:2 (2018), 306 - 309; High Temperature, 56:2 (2018), 296 - 298.

24. Управление жизненным циклом лопаток паровых турбин за счет применения УЗК - контроля / А. И. Попова, А. И. Попов, М. И. Тюхтяев, В. С. Медко // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2014. - № 4. - С. 1188-1198. - EDNSMNLTB.

A.I. Popov, A.S. Fumin, S.A. Kislitsyn, A.P. Veselovsky, M.M. Radkevich
PetertheGreatSt. PetersburgPolytechnicUniversity,
Saint Petersburg, Russia, popov_ai@spbstu.ru

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ANGLE OF TILT OF THE ELECTROLYTIC CATHODE JET TO THE METAL ANODE ON THE OUTPUT PROCESSING PARAMETERS

Abstract

The paper considers the influence of the angle of inclination of the jet of an electrolytic cathode to the surface of a metal anode at atmospheric pressure and electrolyte volumetric flow rates up to 90 l/h. The study was carried out at angles of inclination of the jet to the treated surface up to 10°, electrolyte flow temperatures up to 80°C and interelectrode gaps up to 25 mm. It is shown that the greatest influence on the electrical resistance of the electrolyte column is exerted by the temperature of the electrolyte, the interelectrode distance is the angle of inclination of the jet to the treated surface. The resistance of the interelectrode gap is the reciprocal of the current on the surface of the metal anode and, in turn, determines the rate of removal of material from the surface of the product. The results of these studies can be used in the processing of the curved surface of turbine blades.

Keywords: temperature, electrolytic cathode, jet inclination angles, metal anode, interelectrode gap, turbine blades.

А.И. Попов, Г.А. Дудко, В.Г. Теплухин, А.А. Безбородов,
В.С. Кобчиков, Ф.Л. Глухих, М.В. Яковицкая
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, popov_ai@spbstu.ru

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ СТРУЙНЫМ ЗАГЛУБЛЕННЫМ ТОКОПОДВОДОМ

Аннотация

В работе рассмотрено влияние струйного заглубленного токоподвода на морфологию поверхности образцов из нержавеющей стали 08X18H9T. Исследование проводилось в среде электролита на основе хлорида натрия. Показано, что струя электролита, направленная на поверхность катода, оказывает значительное влияние на удельный съем материала с поверхности анода и значительное влияние на морфологию поверхности. При комнатной температуре электролита формируется преимущественно электроэрозионное воздействие на поверхность анода с формированием поверхностного слоя с высоким уровнем шероховатости. Отмечается, что обработка происходит как по краям анода, на его поверхности, так и в элементах, лежащих ниже уровня поверхности. Результаты данных исследований могут быть использованы при обработке криволинейной поверхности турбинных лопаток.

Ключевые слова: заглубленный токоподвод, электролит, электролитическая струя металлический анод, межэлектродный промежуток, турбинные лопатки.

Введение

Развитие инновационных технологических процессов, является одним из факторов, определяющих развитие как малых, так и предприятий, входящих в большие кластеры, что в конечном счете является фактором, ускоряющим в развитии территорий [1 - 8].

Одной из технологий которая уже вышла на промышленный уровень производства является технология селективного лазерного сплавления. Однако широкое промышленное применение данной технологии сдерживается существенными трудностями, которые возникают при постобработке таких деталей. Процесс еще более усложняется если напечатанная деталь имеет сложную наружную и внутреннюю конфигурацию.

Среди методов, позволяющих производить данную постобработку можно отметить ручное шлифование, как один из самых дорогостоящих методов, лазерное полирование, виброабразивную и гидроабразивную обработку [9 - 13]. Однако каждый из этих методов обладает рядом недостатков и ограничений. На наш взгляд применение одной из новых технологий, которой является электролитно-плазменная технология позволит, частично или полностью решить поставленную задачу. Данная технология имеет несколько различных технологических применений, основными из которых являются обработка деталей в электролитической ванне и обработка струей электролита [14 - 18]. На наш взгляд комбинированное применение данных способов, каждый из которых обладает своими особенностями и существенными преимуществами позволит решить вопрос съема с поверхности изделия грубого дефектного слоя и осуществить финишную полировку изделия.

Цель нашей работы изучение закономерностей процесса, определяющих струйную электролитно - плазменной обработку заглубленным токоподводом.

Методы

Для проведения исследований нами была использована, установка струйной электролитно - плазменной обработки. Данная установка была разработана в Высшей школе машиностроения СПбПУ [19]. Установка содержит блок питания постоянного тока и рабочую зону с расположенными сверху направляющими, позволяющими осуществлять движение в трех координатах. Внизу механизма перемещения располагали электролитическую ванну 1, изготовленную из диэлектрического материала. В ванну погружали маркированный пластическим деформированием образец из нержавеющей стали 08Х18Н9Т размерами 40*40*1 мм и подключали его к аноду. Изолированный катод в виде Г-образной медной трубки с внутренним диаметром $\varnothing_{вн} = 3$ мм устанавливали напротив анода и подавали электролит с объемным расходом $Q = 45$ л/ч.

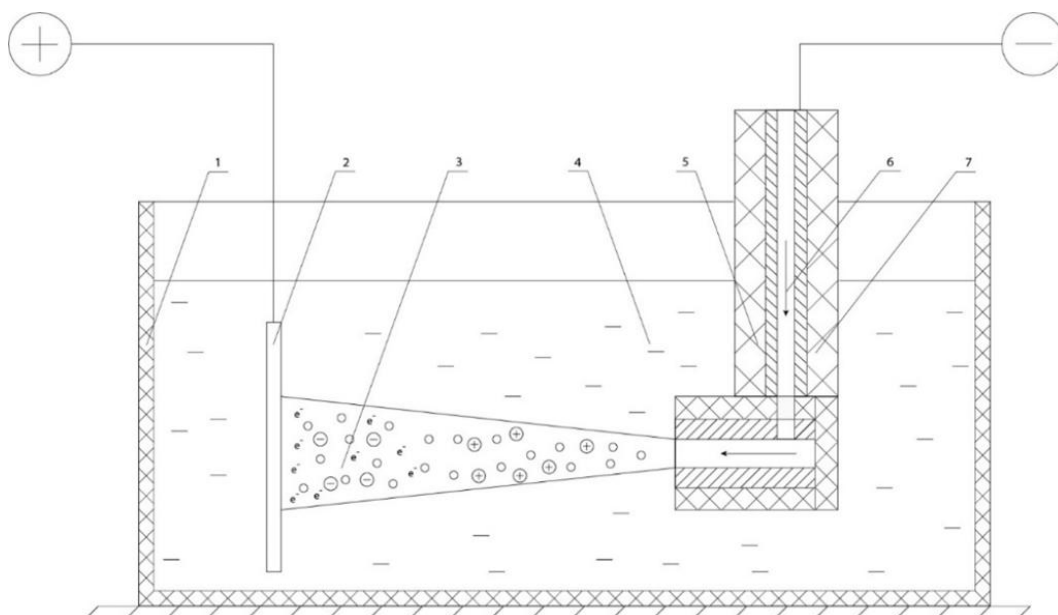


Рисунок 1 – Схема обработки струйным заглубленным токоподводом:

- 1- корпус электролитической ванны,
- 2 - металлический анод (образец), 3 – электролитическая струя,
- 4 - электролит, 5 - изолятор, 6 – поток электролита, 7 -катод.

Межэлектродный зазор устанавливали в диапазоне от 10 до 30 мм. На металлический анод и трубку полого подавали напряжение смещения $U_{в}$ в диапазоне от 145-225 В. В качестве электролита использовался NaCl с концентрацией $k = 100$ г/л. Использовали электролит комнатной температуры (20 ° С). Время обработки каждого из образцов составляло 60 с.

Результаты и обсуждение

В результате исследований нами были зафиксированы две наиболее характерные морфологии поверхности при $U = 145$ В и $U = 225$ В (рис.2). При подаче

напряжения $U = 145$ В и приближении трубки полого токоподвода к поверхности металлического анода наблюдается достаточно быстрое изменение цвета электролита от светло зеленого до темно-коричневого. Это предполагает, что в электролитическую ванну выделяется достаточно большой объем материала анода. При этом при высоких температурах в области формирования разной длительности искровых и микродуговых разрядов возможно образование следующих химических реакций.

Реакции окисления железа кислородом:



Реакции взаимодействия железа с хлором:



Оценка морфологии поверхности показывает, что поверхность после обработки более матовая, чем исходная. Поверхность имеет многочисленными микродефекты. При этом для $U = 145$ В размеры дефектов находятся в диапазоне 30-40 мкм, а для $U = 225$ В в диапазоне 50-70 мкм. Дополнительно к этому можно отметить наличие по краям зоны обработки канавок или проточек, образованных движением электролита за счет его высокой скорости и вымывания продуктов физико-химического взаимодействия с поверхности образца нержавеющей стали (рис.2, г).

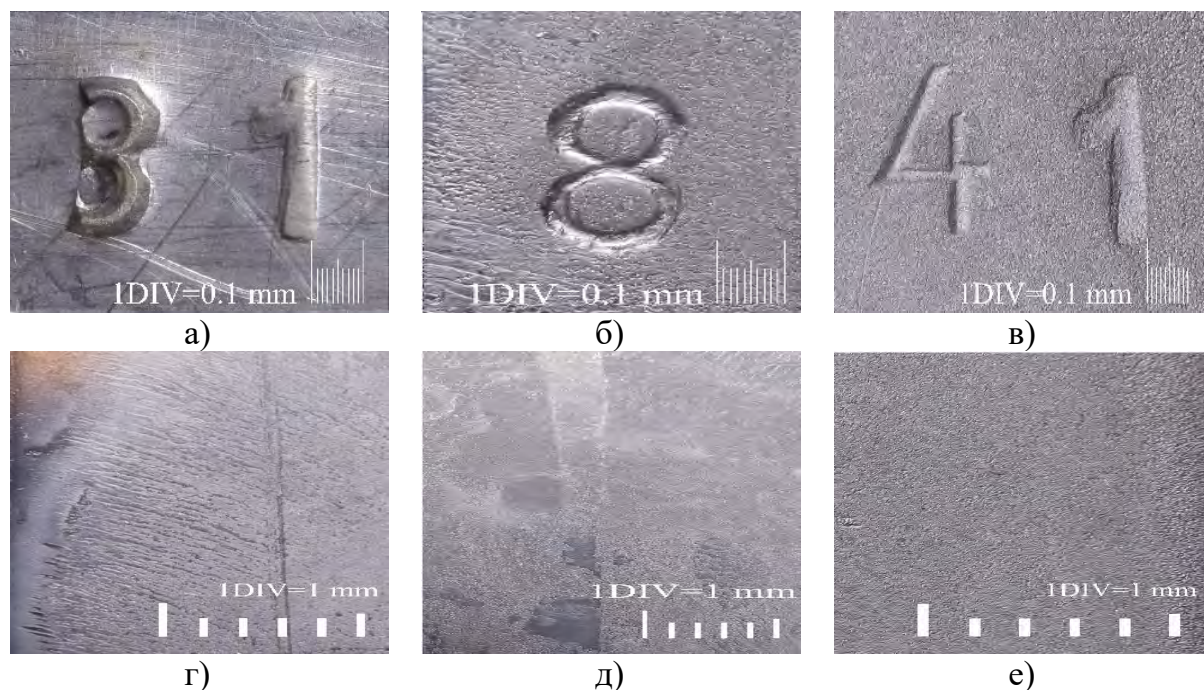


Рисунок 2 – Изменение морфологии поверхности при обработке заглубленным струйным токоподводом: а) – фрагмент исходной поверхности образца с углублением; б) - фрагмент обработанной поверхности с углублением ($U=145$ В); в) - фрагмент обработанной поверхности с углублением ($U=225$ В); г) - краевые эффекты обработки обработанной поверхности ($U=145$ В); д) область поверхности между двумя обработанными зонами ($U=145$ В); е) – сплошная обработка поверхности после ($U=225$ В)

Анализ поверхности образца, обработанного при $U = 225$ В показывает, что поверхность визуально имеет более значимый сьем. При этом фиксируется что поверхность также имеет значительное число микродефектов в виде лунок, что может говорить об эрозионном воздействии струйного заглубленного токоподвода на металлический анод. Размеры эрозионных лунок в этом случае значительно больше, чем при напряжении $U = 145$ В. Это может являться следствием более высокой напряженности электрического поля с одной стороны и увеличением доли электрохимического и электролитно-плазменного механизмов дополнительно к эрозионному. Характерной особенностью является то, что обработка происходит не только по поверхности, но и внутри конструктивных элементов, выполненных путем пластической деформации (рис.2, б, в).

Изучение вольт-амперной характеристики при заглубленном токоподводе показывает пропорциональный рост тока от напряжения до 190 В (рис. 3.). После этого значения процесс переходит в динамический режим накопления и разряда мощности конденсаторных батарей.

Температура электролита в ванне на всем протяжении процесса плавно увеличивается.

Одним из важных технологических применений данного способа обработки, может быть, обработка поверхности материалов, спеченных лазером, поверхности механически обработанных турбинных лопаток, для уменьшения стоимости обработки и увеличения жизненного цикла данных изделий [20].

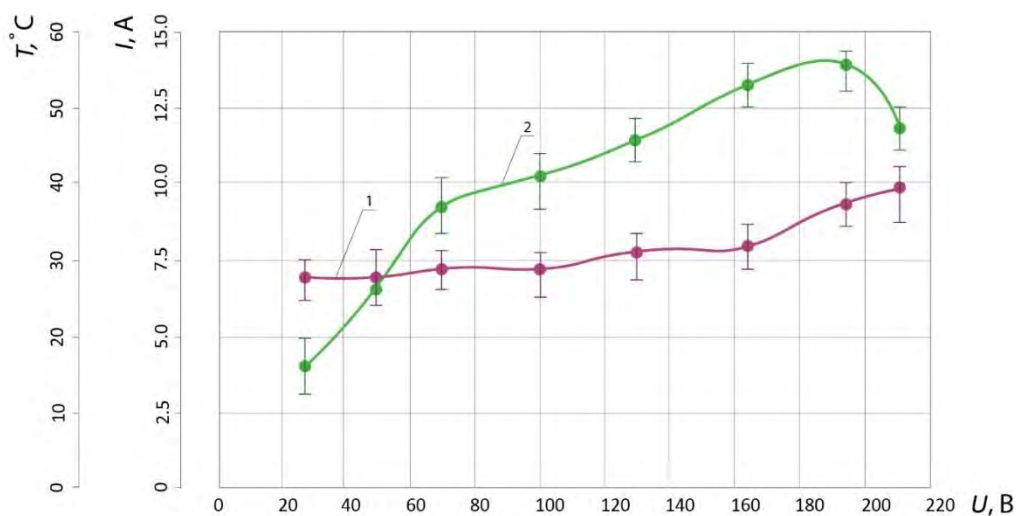


Рисунок 3 – Вольтамперная и температурная характеристика процесса при заглубленном токоподводе

Заключение

Воздействие струйного заглубленного электролитно - плазменного потока оказывает существенное влияние на поверхность металлического анода. При малых напряжениях до 145 В фиксируется относительно малый размер дефектов 30-40 мкм на поверхности, поверхность имеет характерные следы движения струй электролита в стороны и «размытия» поверхностного слоя. Однако следует отметить, что при данных условиях обработки для снятия поверхностных слоев большой глубины (100-1000 мкм) требуется достаточно большой период времени. При увеличении величины рабочего напряжения до 225 В процесс обработки проходит значительно интенсивнее. Это прежде всего характеризуется развитой морфологией поверхности

прежде всего за счет импульсных и микро дуговых разрядов с размерами эрозионных лунок до 50-70 мкм. В данном случае мы рассматриваем несколько конкурирующих механизмов разрушения поверхностного слоя. В меньшей мере химический, и электролитно-плазменный в большей мере эрозионный механизм разрушения поверхности. Характерной особенностью данного режима является то, что обработка происходит не только на гладкой поверхности образца, но и внутри конструктивных углублений поверхности.

Показанные результаты обработки позволяют сделать предположение, что данный вид обработки позволит использовать ее для обработки сложно профильных изделий таких, как спеченные лазером изделия и турбинные лопатки.

Выводы

1. Характер изменения морфологии поверхности в зависимости от температуры позволяет рассматривать несколько механизмов удаления поверхностных слоев, химический, электроэрозионный, электролитно-плазменный.

2. Изменение величины напряжения позволяет изменять плотность тока на образце и, следовательно, регулировать скорость съема.

3. Температура электролита в ванне во многом зависит от параметров тока в электролитической цепи.

4. Напряжение смещение между токоподводами существенно влияет на морфологию поверхностно слоя.

Благодарность

Авторы выражают свою признательность графическому дизайнеру Поповой Диане Александровне за помощь в подготовке иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попова, А. И. Основные факторы инновационнотехнологического развития / А. И. Попова // Интеграция экономики в систему мирохозяйственных связей: Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23-25 октября 2012 года. - Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2012. - С. 123-125. - EDNWDWGTH.

2. Попова, А. И. Кластерный подход в поддержке малого и среднего предпринимательства в Санкт-Петербурге в условиях глобализации / А. И. Попова // Процессы глобальной экономики: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26-27 октября 2020 года. - Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. - С. 66-75. - EDNRHIDPB.

3. Институциональные аспекты инновационной экономики: монография / Т. И. Безденежных, В. В. Шапкин, О. В. Угольникова [и др.]; Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики, 2012. - 131 с. - ISBN 978-5-228-00590-7. - EDNTLVEJZ.

4. Попова, А. И. Инфраструктурный комплекс поддержки предпринимательства / А. И. Попова // Право, экономика и управление: теория и практика: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 02

декабря 2021 года / Гл. редактор Э.В. Фомин. - Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2021. - С. 148-150. - EDNXXJRQM.

5. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

6. Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С. Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.

7. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.

8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

9. Дуганов, В. Я. Обработка поверхностей лазером в машиностроении / В. Я. Дуганов, А. Г. Корнюшина // Научно-практическая конференция, Белгород, 06-07 октября 2016 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. - Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. - С. 46-49. - EDNYNLXWV.

10. Иванов, П. А. Обработка материалов на установке гидроабразивной резки / П. А. Иванов // Advances in Science and Technology: Сборник статей XXIV международной научно-практической конференции, Москва, 31 октября 2019 года. - Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность. РФ", 2019. - С. 120-121. - EDNVHXTZR.

11. Кузьмин, И. В. Плазменная обработка - один из прогрессивных технологических процессов обработки металлов / И. В. Кузьмин, И. С. Царенко // В мире научных открытий : Материалы IV Всероссийской студенческой научной конференции (с международным участием), Ульяновск, 20-21 мая 2015 года. - Ульяновск: Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина, 2015. - С. 159-161. - EDNUHORID.

12. Бочкарев, Д. Применение лазеров, как метод повышения автоматизации технологического процесса / Д. Бочкарев // Сборник студенческих работ "Первые шаги в науку": 2017-2018 учебный год, Майкоп, 29 апреля 2018 года / Майкопский государственный технологический университет, Инженерно-экономический факультет. - Майкоп: Индивидуальный предприниматель Кучеренко Вячеслав Олегович, 2018. - С. 38-39. - EDNVBVVOO.

13. Сницар, Л. Р. Эволюция лазерной обработки материалов / Л. Р. Сницар, И. Н. Леденева // Парадигмальные установки естественных и гуманитарных наук: междисциплинарный аспект: Материалы XVI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях, Ростов-на-Дону, 30 декабря 2021 года. - Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «ИЗДАТЕЛЬСТВО ВВМ», 2021. - С. 554-556. - EDNZRHTSE.

14. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов. Монография / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. - Минск: Белорусская наука, 2010. - 232 с. - ISBN 978-985-08-1215-5. - EDNRBAУХТ.

15. Гайсин, А. Ф. Электролитно-плазменная обработка поверхности детали, изготовленной с применением аддитивной технологии / А. Ф. Гайсин, А. Х. Гильмутдинов, Д. Н. Мирханов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 2018. - № 2(752). - С. 69-74. - EDNYUCJPC.
16. Specific Features of Surface Morphology During Plasma Electrolytic Processing / A. Popov, A. Popova, V. Novikov [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. - 2022. - Vol. 247. - P. 101-112. - DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_11. - EDN CTZZES.
17. Processes of Contact Interaction of an Electrolyte Plasma Jet with a Surface / A. I. Popov, A. I. Popova, S. V. Zakharov [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering, Saint Petersburg, Russia, 01 июня 2021 года*. - Cham: Springer, 2022. - P. 176-184. - DOI 10.1007/978-3-030-91553-7_19. - EDN LASTDC.
18. Popov A.I., Popova A.I., Popova D.A. Process aspects of jetelectrolyticplasma processing, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology, 25 (4 2019)
19. Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G. Thinnest finishing treatment with a focused jetelectrolyticplasma. *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (см. в книгах). 2020. P. 139 -149.
20. Управление жизненным циклом лопаток паровых турбин за счет применения УЗК - контроля / А. И. Попова, А. И. Попов, М. И. Тюхтяев, В. С. Медко // *Современное машиностроение. Наука и образование*. - 2014. - № 4. - С. 1188-1198. - EDNSMNLTB.

A.I. Popov, G.A. Dudko, V.G. Teplukhin, A.A. Bezborodov,
V.S. Kobchikov, F.L. Glukhikh, M.V. Yakovitskaya
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
popov_ai@spbstu.ru

ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT OF SURFACE OF SAMPLES BY JET BURIED CURRENT LEAD

Abstract

The work considers the effect of the jet buried current lead on the morphology of the surface of 08Kh18N9T stainless steel samples. The study was conducted in an electrolyte medium based on sodium chloride. It has been shown that the electrolyte jet directed at the cathode surface has a significant effect on the specific removal of material from the anode surface and a significant effect on the surface morphology. At room temperature of the electrolyte, an electroerosive effect is formed mainly on the surface of the anode with the formation of a surface layer with a high level of roughness. It is noted that the treatment takes place both at the edges of the anode, on its surface, and in elements lying below the surface level. The results of these studies can be used in the treatment of the curved surface of turbine blades.

Keywords: buried current lead, electrolyte, surface morphology, electrolytic jet, metal anode, interelectrode gap, turbine blades.

К.А. Садыров
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Бишкек, Кыргызская Республика, ksadyrov@gmail.com

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ ПРИ СВАРКЕ ТИТАНА И ИХ КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

Аннотация

В работе рассмотрены процессы образования газовых пузырей, их роста и отрыва от поверхности твердого тела, измерение в реальном времени критического размера газовых пузырей в сварочной ванне, а также микроскопическое изображение пор в затвердевшем металле. Проведены сравнение экспериментальных данных с теоретическими значениями, которые близки по значению.

Ключевые слова: поры, гидрид титана, водород, микрорадиография, критические размеры газовых пузырей.

Введение

При сварке плавлением титана и его сплавов основным видом дефекта является пористость. Влияние пористости на свойства сварных соединений и методы предотвращения пористости были предметом большого количества исследований [1-11]. Предполагается, что основными причинами пористости являются загрязнение поверхности основных металлов и присадочных материалов [2,3], наличие примесей в защитном газе [4], наличие внутренних дефектов в виде микропор в свариваемых заготовках [5,6], водород, растворенный в основном металле [1,4,7,9-11] и образование полостей, содержащих пленки влаги и органических соединений внутри расплавленной ванны [6].

Сливинский В.А. и др. [8] предложили модель, в которой гидрид титана (TiH_2) в титане и его сплавах является основным источником образования стабильных зародышей газа в сварочной ванне. Даже 0,002 % водорода в титане (массовая доля) способствует образованию гидроксида титана в виде включения, которое можно рассматривать как вторую фазу с размером частиц 10 мкм. При температуре от 257 °С до 317 °С гидрид титана находится в нестабильном состоянии и начинает распадаться. При сварке плавлением из-за нагрева основного металла гидрид титана начинает разрушаться на ранней стадии сварки. В интервале от 800 °С до 1000 °С гидрид титана полностью распадается с образованием свободных атомов водорода внутри основного металла:



Следовательно, образующийся водород инициирует микропоры. Считается, что радиус этих микропор находится в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-5} мм. Размеры микропор на данном этапе не могут быть измерены в режиме реального времени. Радиусы микропор становятся от 10^{-2} до 10^{-1} мм за счет многократного слияния. Во время сварки эти микропоры попадают в сварочную ванну и приводят к образованию зародышей газовых пузырьков в расплавленной ванне. Это первая стадия зарождения пузырьков [8]. Дальнейшая диффузия большего количества водорода из более горячей зоны сварочной ванны внутрь каждого пузыря и, наконец, расширение пузыря под действием высокой температуры сварочной дуги вызывает рост

инициированных пузырей. Критический размер зародышей газовых пузырьков внутри расплавленной ванны определяется формулами [5,8]

$$r_{кр} = \frac{2\sigma V\Phi}{KT \ln\left(\frac{P_g}{P_0}\right)} \quad (1)$$

где $r_{кр}$ – критический радиус зародыша газового пузыря;
 σ – поверхностное натяжение между жидким металлом и газом;
 V – атомный объем газовой фазы;
 P_g/P_0 – степень пересыщения метастабильной газовой фазы;
 Φ – поправочный коэффициент для неоднородной среды;
 K – постоянная Больцмана;
 T – температура (в градусах Кельвина).

Если внутреннее давление пузырька равно или превышает сумму атмосферного давления, гидростатического давления и сил, обусловленных поверхностным натяжением ванны расплава, то он стабилен и может начать расти внутри расплавленной ванны [5,6]

$$P_z \geq P_{атм} + P_{гст} + \frac{2\sigma}{r_n} \quad (2)$$

где P_z – парциальное давление газа;
 $P_{атм}$ – атмосферное давление;
 $P_{гст}$ – гидростатическое давление расплавленной ванны;
 r_n – радиус пузыря.

Стабильный пузырек достигает состояния, когда он начинает отделяться от своего положения и поднимается к свободной поверхности расплавленной ванны. Уравнение Фрица [12-14] дает критический радиус пузырька на основе баланса сил, действующих на пузырек в расплавленной ванне в момент отрыва:

$$r_{н.кр} = 7,5 \times 10^{-4} \theta \left[\frac{2\sigma}{(\rho_x - \rho_z)g_c} \right]^{1,2} \quad (3)$$

где $r_{н.кр}$ – критический радиус пузырька в момент отрыва;
 θ – угол контакта в градусах;
 σ – поверхностное натяжение между жидкостью и газом;
 ρ_x, ρ_z – массовая плотность жидкости и газа соответственно;
 g_c – гравитационная постоянная.

Методы

В работах [15-16] проведены исследования по изучению в реальном масштабе времени механизма образования газовых пузырей, их роста и отрыва от поверхности твердого тела, а также измерение в реальном времени критического размера газовых пузырей в сварочной ванне. Здесь также представлена схема экспериментальной установки в комнате экспонирования и управления. В работе [16] опубликованы часть результатов работы, где показаны какие типы образцов были использованы для проведения экспериментов (для разных образцов вставные отверстия сначала заполняют разным количеством гидрида титана (TiH_2) чистотой 98% в качестве искусственного источника образования пузырьков при сварке, а затем покрывают титановым порошком).

Режимы горения дуги были следующие: ток дуги 30...40 А, напряжение дуги 11,2...12,5 В. Были представлены рентгеновское изображение образца перед зажиганием дуги, различные кадры образования и слияния пузырьков, шесть различных кадров, показывающих стабильный пузырек, его рост и выход из расплавленной ванны, а также шесть различных кадров образования газового пузыря, его роста и отрыва от твердой поверхности в расплавленной ванне и микроскопическое изображение пор в затвердевшем металле.

Результаты и обсуждение

Проведем анализ как влияют различные факторы на критический радиус пузырьков в расплавленной ванне и сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Количество гидроксида титана внутри отверстий мало влияет на критический радиус пузырьков, поэтому графические данные не приводятся.

На рисунке 1 показан размер пузырьков во время отрыва в зависимости от диаметра вставленных отверстий. Судя по этой кривой, размер отверстий оказывает некоторое влияние на критический размер пузырьков. Увеличение количества гидроксида титана и диаметра отверстия вызывает увеличение скорости роста газовых пузырьков и количества инициированных пузырьков. Увеличение скорости роста пузырьков газа приводит к более быстрому отрыву и уменьшению критического радиуса. В ходе эксперимента было замечено, что отрыв пузырьков от места их расположения к свободной поверхности может происходить на разной глубине в расплаве ванне.

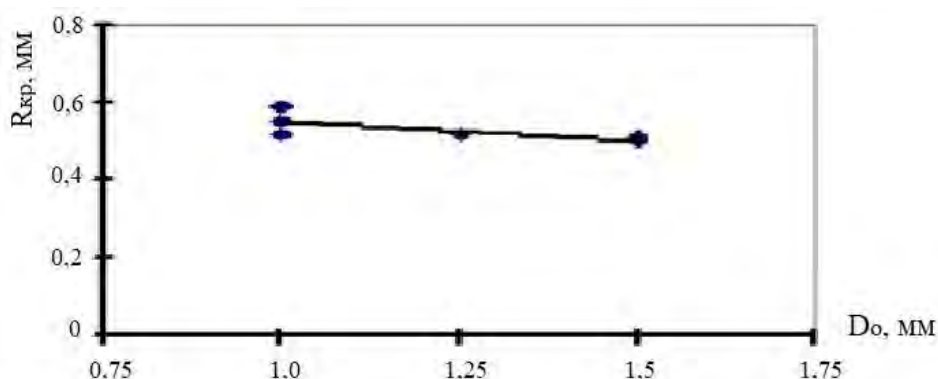


Рисунок 1 – Влияние диаметра отверстия D_0 на критический радиус $R_{кр}$

На рисунке 2 показаны радиусы оторвавшихся пузырей в зависимости от их глубины расположения внутри расплавленной ванны. Судя по этой кривой, глубина расплавленной ванны (гидростатическое давление) очень мало влияет на размер оторвавшихся пузырьков. При образовании пузырей в сварочных ваннах необходимо проанализировать два важных фактора: во-первых, скорость роста пузырей внутри расплавленной ванны; во-вторых, продолжительность времени между зарождением газового пузыря и моментом, когда он достигает своего критического размера и, наконец, отрывается.

На рисунке 3 представлена динамика роста газовых пузырей в ванне расплава под сварочной дугой при различных мощностях дуги: $q_1 = 242$ Дж/с, $q_2 = 225$ Дж/с и $q_3 = 202$ Дж/с. Анализ скорости роста газового пузыря показывает три различные области. В начале зарождения газового пузыря можно наблюдать быструю скорость

роста; после этого периода пузырек медленно растет и, наконец, достигнув своего критического радиуса, вырывается из расплавленной ванны. Объяснением высокой скорости роста пузырьков в первой области является сильное разрушение гидрида титана, что приводит к большому количеству микропор, которые входят в ванну расплава, образуя мелкие пузырьки газа. Множественное слияние этих мелких пузырьков вызывает быстрый рост пузырьков в первой области. Во второй области наблюдается более низкая скорость роста пузырьков газа, потому что недостаточно источника газа, чтобы способствовать росту пузырьков.

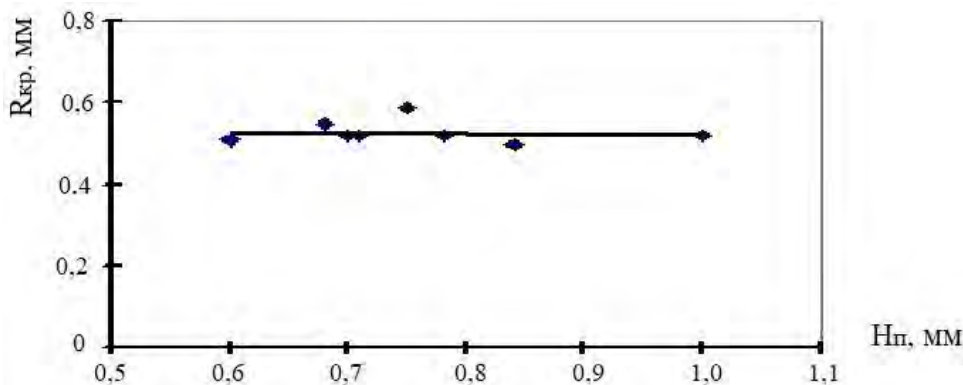


Рисунок 2 – Зависимость критических радиусов $R_{кр}$ от их глубины внутри расплавленной ванны H_p

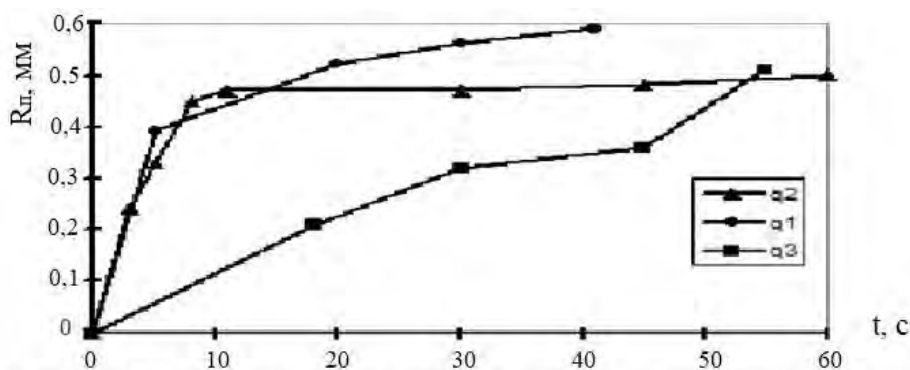


Рисунок 3 - Динамика роста газового пузыря R_p в расплавленной ванне

В этом эксперименте использовалась относительно небольшая входная мощность дуги по сравнению с практической ситуацией, чтобы поддерживать ванну расплава в течение более длительного времени перед рентгеновской трубкой. Как показано на рисунке 3, при увеличении входной мощности дуги можно наблюдать более высокую скорость роста пузырьков газа.

На рисунке 4 показано влияние подводимой мощности дуги на критический радиус пузырьков газа. Кажется, что увеличение мощности подводимой дуги мало влияет на критический радиус пузырька. Причиной этого опять же является использование низких значений входной мощности дуги во время эксперимента. Можно ожидать значительного влияния подводимой мощности дуги на критический радиус пузырьков газа в процессе сварки, когда применяемая подводимая мощность дуги примерно в 5-10 раз больше той, которая использовалась в этом эксперименте.

Критические размеры газовых пузырей, полученные в ходе эксперимента, сравниваются с теоретическими расчетами по уравнению Фрица (уравнение 3). На

рисунке 5 показано сравнение двух разных краевых углов 120° [12] и 100° [14] с экспериментальными данными.

Различные параметры уже определены. Для этого расчета используются следующие значения: плотность титановых сплавов: от 4400 до 4800 кг/м^3 и плотность газа: $\rho_g = 0,0841 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 1,51 \text{ Дж/м}^2$, $g_c = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Значения критического радиуса измеряются для двух различных краевых углов: 100° и 120° . Для нашего случая плотность титанового сплава – $\rho = 4650 \text{ кг/м}^3$.

Как видно из данных табл. 1, экспериментальные значения и теоретические расчеты критического радиуса пузырьков газа близки. В теоретической модели критический радиус пузырьков газа зависит от краевого угла между газовой фазой и твердой фазой. При сварке газовый пузырек может располагаться в любом месте сварочной ванны; поэтому его расположение и связанный с ним контактный угол играют важную роль в размере критического радиуса. Из-за того, что граница между расплавленной ванной и твердой фазой на рентгенографическом изображении нечеткая, расчет фактического краевого угла нецелесообразен.

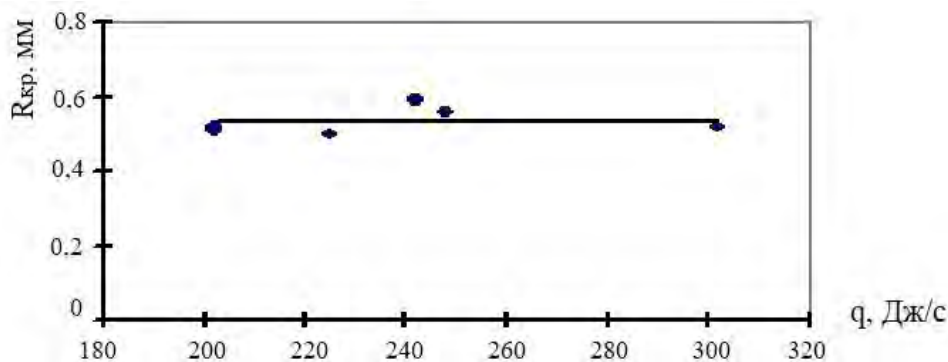


Рисунок 4 – Влияние мощности дуги q на критический радиус $R_{кр}$

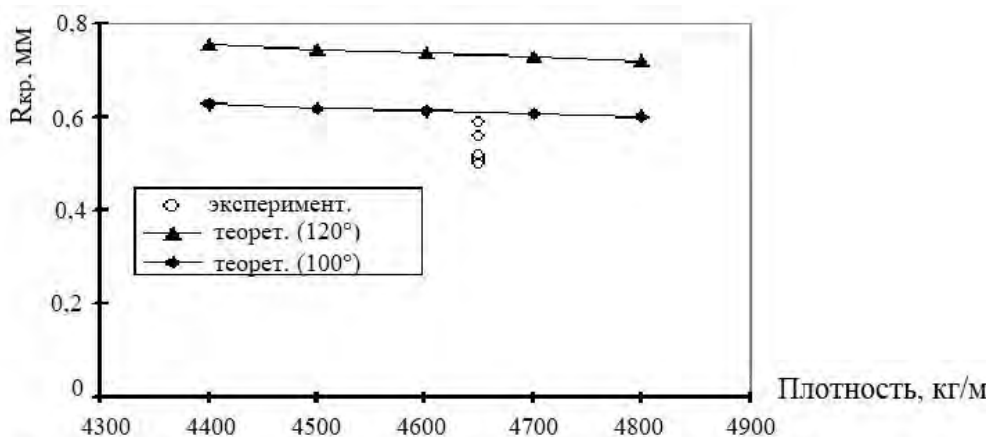


Рисунок 5 – Сравнение между критическими размерами газовых пузырей, полученных экспериментальным путем и теоретическим расчетом

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами критического радиуса

Критический радиус газового пузыря	Теоретическая модель	Экспериментальные данные
$R_{кр}$, мм	0,61 для $\theta = 100^\circ$ 0,73 для $\theta = 120^\circ$	От 0,50 до 0,59

Заключение

1. Первичное зарождение очень мелких пузырьков газа внутри расплавленной ванны представляет собой первую стадию и радиус стабильного газового пузыря на этой стадии называется *первым критическим радиусом* $R_{кр1}$, который можно рассчитать по уравнению (1). На второй стадии происходит рост устойчивого пузыря внутри ванны расплава за счет слияния мелких пузырьков газа и диффузия газа внутрь пузырька на этой стадии. Третья стадия характеризуется тем, что происходит отрыв газового пузыря от границы между твердым и жидким металлом. На этой стадии радиус газового пузыря достигает определенного значения, которое назвали *вторым критическим радиусом* $R_{кр2}$, которую можно определить по уравнению Фрица (3). Последней стадией процесса является взаимодействие оторвавшегося газового пузыря с фронтом кристаллизации в процессе сварки. На этой стадии, если скорость всплытия пузырька меньше скорости кристаллизации сварочной ванны, то пузырь может быть захвачен и в конечном итоге образуются поры в сварном шве.

2. Экспериментальные значения и теоретические расчеты критического радиуса пузырьков газа близки. В теоретической модели критический радиус пузырьков газа зависит от краевого угла между газовой фазой и твердой фазой.

3. Предложенные количественные критерии могут быть использованы при разработке систем управления процессом сварки титановых сплавов для предотвращения образования пор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов, В.В. О влиянии водорода на образование пор при аргодуговой сварке титана / В.В. Фролов, А.И. Горшков // Сварочное производство. - 1966. - № 6. - С. 7-10.
2. Yonesawa, K. Welding of titanium and titanium alloys / K. Yonesawa // Journal of Light Metal Welding and Construction. - 1987. - № 25(4). - P. 149-163.
3. Mitchell, D.R. Porosity in titanium welds / D.R. Mitchell // Welding Journal - 1965. - № 44(8). - P. 157-167.
4. Andrea D', M.M.Jr. Sources and causes of porosity in titanium arc welds / M.M.Jr. D'Andrea // Welding Journal. - 1966. - № 45. - P. 178-187.
5. Редчиц, В.В. Механизм зарождения в сварочной ванне пузырьков газа при сварке активных металлов / В.В. Редчиц, Г.Д. Никифоров // Сварочное производство. - 1977. - № 8. - С. 53-57.
6. Никифоров, Г.Д. Частные случаи механизма образования пор при сварке плавлением титановых сплавов больших толщин / Г.Д. Никифоров, В.В. Редчиц // Автоматическая сварка. - 1981. - № 10. - С. 42-45.
7. Замков, В.Н. Образование пор в сварных соединениях титанового сплава ВТ6, выполненных электронно-лучевой сваркой / В.Н.Замков, А.Д.Шевелев // Автоматическая сварка. - 1979. - № 12. - С. 50-54.
8. Сливинский, В.А. Роль гидридов в порообразовании при сварке титана / В.А. Сливинский, В.Н. Замков, Г.С. Кириченко // Автоматическая сварка. - 1994. - №5-6. - С. 10-13.
9. Сейдгазов, Р.Д. Экспресс-проектирование технологии лучевой сварки с минимизацией порообразования // Сборник материалов и докладов Международной конференции электронно-лучевой сварки и смежных технологий (17-20 ноября 2015 г., Москва). М.: Издательство МЭИ. - 2015. - С. 554-565.

10. Муравьев, В.И. Определение содержания водорода в титановых сплавах в ходе технологического цикла / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, С.З. Лончаков, В.В. Григорьев // Сварочное производство. - 2018. - № 3. - С. 14-20.

11. Муравьев В.И. Исследование влияния электронно-лучевой сварки титановых сплавов на распределение водорода в сварном шве. / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, В.В. Григорьев, О.Г. Шакирова, С.А. Исхаков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. - 2019. - Т. 18. - № 4. - С. 157-168.

12. Fritz, W. On the growth and rise of individual vapour bubbles in nucleate pool boiling / W. Fritz // Physik. - 1965. - № 36. - P. 379.

13. Szekely Von J. Rate Phenomena in Process Metallurgy / Von J. Szekely, N. J. Themelis // Wiley Interscience, a Division of John Wiley & Sons Inc., New York-London-Sydney-Toronto/ - 1971.

14. Oystein G. Metallurgical Modelling of Welding / G. Oystein // Pub. By Institute of Materials, London, England. - 1994.

15. Zoofan B. Quantitative microradiography and its applications to microdamage assessment / B. Zoofan // Dissertation for the Degree Doctor of Philosophy: The Ohio State University, Columbus. - 2004 - 246 p.

16. Садыров, К.А. Микрорадиография при исследовании и управлении металлургическими и сварочными процессами / К.А. Садыров, Э.С. Молдобаев // Известия КГТУ им. И.Раззакова. - 2013.- Бишкек. - №28. - С. 265-269.

К.А. Sadyrov
Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov
Bishkek, the Kyrgyz Republic, ksadyrov@gmail.com

THE MECHANISM FOR THE FORMATION OF GAS BUBBLES IN TITANIUM WELDING AND THEIR CRITERIA EVALUATION

Abstract

The paper considers the processes of formation of gas bubbles, their growth and detachment from the surface of a solid body, real-time measurement of the critical size of gas bubbles in the weld pool, as well as microscopic imaging of pores in a solidified metal. The experimental data are compared with theoretical values, which are close in value.

Keywords: pores, titanium hydride, hydrogen, microradiography, critical sizes of gas bubbles.

Е.В. Овчинников¹, Т.Ф. Григорьева², Е.И. Эйсымонт¹, И.И. Музыка¹
¹Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь
²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Российская Федерация

МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Аннотация

Статья посвящена изучению структуры механоактивированных частиц и использованию этих нанофазных объектов для модификации полимерных материалов, применяемых в тяжело нагруженных узлах трения автомобильных агрегатов. Основным аспектом является использование полимерных материалов и их композиций в конструкции карданных передач. Показано, что комплексный подход к решению задачи повышения износостойкости карданных передач наземной техники и сельскохозяйственной техники позволил разработать на базе отечественного сырья ряд материалов различного функционального назначения, объединенных единым методологическим подходом, основан на регулировании структурных характеристик полимерных матриц с помощью низкоразмерных модификаторов.

Ключевые слова: механоактивация, частицы, структура, свойства, высокомолекулярные соединения

Введение

В последние десятилетия в автомобильной промышленности широко применяют композиционные материалы, заменяя традиционные материалы. Это обусловлено тем, что композиционные в большинстве обладают легкой массой, что снижает вес автомобиля без ущерба для качества и надежности. Универсальный шарнир или карданный вал - это механический компонент, используемый для передачи крутящего момента и мощности от двигателя к дифференциалу заднеприводных автомобилей. Основным материалом для изготовления данного тяжело нагруженного узла автотракторной техники является высококачественная сталь (сталь 45, сталь 45, 1044, SM45C и т.п.). В случае, когда длина карданного вала превышает 1500 мм, стальные универсальные шарниры обычно изготавливаются из двух частей для увеличения собственной частоты основного тона. Композитные материалы имеют много преимуществ перед сталью из-за высоких значений удельного модуля упругости, что позволяют использовать цельный композитный вал в качестве замены стального, состоящего из двух частей. Валы, изготовленные из композиционных материалов, резонируют при более высоких частотах вращения и сохраняют более высокий запас прочности по сравнению с карданными валами, изготавливаемыми из стали. Несмотря на широкую номенклатуру разработанных композиционных материалов на основе полимерных матриц, промышленное применение в отечественном машиностроении получило ограниченное число марок с заданными функциональными характеристиками [1-3].

Методы

В качестве исходных матриц для создания полимерных композиционных материалов (ПКМ) использовали традиционные многотоннажно выпускаемые отечественной промышленностью полимеры: эпоксидные, полиэфирные и эпоксидно-полиэфирные смолы. Образцы для проведения испытаний в зависимости от состава матрицы получали методом литья в форму на промышленном оборудовании при режимах, рекомендованных для переработки базового полимерного материала в соответствии с требованиями соответствующих ГОСТ и ТУ. Исследование физико-химической структуры полимеров, композиционных материалов и модификаторов проводили традиционными методами рентгеноструктурного анализа, оптической, ИК-спектроскопии по общепринятым методикам.

Результаты и обсуждение

Специфические условия эксплуатации изделий из термопластичных материалов конструкционного назначения обуславливают необходимость целевого модифицирования полимерных матриц, которое приводит к снижению недостатков базовых и, часто, к приобретению новых свойств термопластов, усилению их достоинств. К основным недостаткам традиционных конструкционных термопластов относят сравнительно невысокие физико-механические характеристики в сочетании с удовлетворительными триботехническими и теплофизическими характеристиками. Эти особенности термопластов практически не позволяют использовать их в немодифицированном виде для изготовления изделий, эксплуатирующихся в широких диапазонах температур и нагрузок, в различных условиях воздействия нагрузки, а также в средах пассивного и агрессивного характера. Активные центры макромолекул, наличие которых обусловлено химическим строением цепей и условиями синтеза, при агрессивном воздействии на полимерный материал, как правило, являются очагами разрушения матрицы [4-7]. При этом взаимодействие активных центров макромолекул с различными реагентами эксплуатационной среды (кислород, низкомолекулярные продукты деструкции полимера, влага и т.п.) приводит к снижению эксплуатационных характеристик материала.

Целевое модифицирование промышленно выпускаемых полимеров с использованием различных технологических приемов, физических воздействий, введения активированных ингредиентов, либо применение в качестве полимерной матрицы многокомпонентных полимер-олигомерных и полимер-полимерных гибридных смесей является наиболее простым и эффективным путем повышения служебных характеристик базовых полимерных связующих. Реализация данного подхода экономична, с точки зрения технологии сравнительно проста и не требует больших затрат. Как следует из литературных данных, наполнение – есть сочетание полимеров с твердыми, жидкими, газообразными ингредиентами, которые относительно равномерно распределяются в объеме с непрерывной полимерной фазой [8-9].

Таким образом, многие задачи конструкционного полимерного материаловедения могут быть успешно решены с помощью оптимального выбора наполнителей и модификаторов. Выбор конкретного приема получения композиционного материала с заданными характеристиками зависит от совокупности экономических, эксплуатационных, технологических и др. аспектов.

Механическая активация (МА) - это хорошо известный метод с доисторических времен, когда во время измельчения различного типа материалов могли возникнуть

реакции физико-химические реакции случайно. Например, при обработке такого природного материала как кремень, при производстве из него изделий для переработки изделий растительного и животного сырья, производства различного типа оружия. В дальнейшем данный материал, как и технология воздействия на него нашел активное применение при производстве первых огнестрельных вооружений, в частности ружей и пистолетов. Первые записи о систематических исследованиях механохимии были зарегистрированы Спринг и Леа в конце 19 века. Тем не менее, впервые термин механохимия ввел Оствальд, чему была посвящена научная работа, вышедшая в 1919 г. Механическая активация обычно проводится на различных типах мельницах. Первыми прототипами мельниц была ступа и пестик, которые изготавливались из различного типа материалов исходя из требований твердости к измельчаемому материалу. Во времена промышленной революции, процесс измельчения твердых пород значительно облегчился благодаря изобретению привода паровой машины (после 1850 г.), таким образом появились шаровые или вальцовые мельницы. Вертикальные валковые мельницы были созданы между 1900 и 1920 годами, а в середине 20 века - автогенные и полусамозмельченные мельницы. Первая истирательная мельница была изобретена Сегвари примерно в 1930 году, она представляла собой низкоскоростную вертикальную мельницу с мешалкой. Высокоскоростная мельница с мешалкой была представлена примерно в 1990 году. Для описания процессов, происходящих при измельчении твердых тел, Тиссен предложил модель «магма-плазма» (Thiessen и др., 1967). Согласно этой теории, многие процессы возбуждения возникают из-за механической энергии, характеризующейся разными временами релаксации (Baláz, 2008). Суть данного наиболее распространенного метода заключается в рассмотрении действия одиночного удара о твердую поверхность. В зависимости от энергетического воздействия при ударе возможно протекание следующих процессов: экзоэмиссия электронов, образование микроочага плазмы, вызванного повышением температуры в точке удара, искажение структуры поверхности. В настоящее время существует достаточное количество моделей в области механохимии, например, Ткацова и Балаз из Словакии, Болдырева из России, Gock из Германии (Gock, Kurrer, 1998), Опочки и Юхас из Венгрии (JuhászandOpoczky, 1990), Сенна из Японии (Сенна, 2017), Кумар из Индии (Кумар и др., 2010), Такач и Сурьянараяна из США (Такач, 2013; Сурьянараяна, 2001). Механическая активация и механическое легирование являются основными методами для создания дополнительной высокой добавленной стоимости при производстве композиционных материалов из различных веществ. Данный метод является экологически безвредным и относится к «зеленым» технологиям, позволяя в большинстве случаев заменить активацию материалов с применением вредных растворителей. Многочисленные статьи и обзоры, посвященные вопросам механохимии, в большинстве своем сосредоточены на изложении материала по диспергированию веществ, однако фактически не затрагивают фазовое превращение твердого материала, которое сильно зависит от технологии и конструкции применяемого оборудования. Более того, обстоятельства, связанные со структурными превращениями, являются ключевыми, которые можно использовать для управления механохимическими реакциями, чтобы реализовать потенциал метода по сознательному созданию дизайна получаемого продукта, т.е. осуществлению инженерии частиц [10-11].

На рисунке 1-3 представлены типичные рентгенограммы смесей материалов, получаемых после механоактивации. На представленных дифрактограммах

полимерного композита основные рефлексы каолинита сохраняются, уменьшается лишь их интенсивность: $d_1 = 7,17\text{\AA}$ ($I/I_s = 100$), $d_2 = 3,57\text{\AA}$ ($I/I_s = 80$) и $d_3 = 3,37\text{\AA}$ ($I/I_s = 35$) (d_1, d_2, d_3 - межплоскостные расстояния соответствующих рентгеновских рефлексов; I, I_s - интенсивность исследуемого и максимального рефлекса соответственно). Рефлексы полимерных материалов налагаются на серию рефлексов каолинита в области $d = 4,47-3,74$, поэтому нельзя судить о каких-либо изменениях параметров рефлексов полимерных материалов. Однако наблюдается перераспределение интенсивностей в рентгенограммах исследуемых материалов, что может свидетельствовать об структурных изменениях в исследуемых механоактивированных наноконпозиционных порошковых материалах.

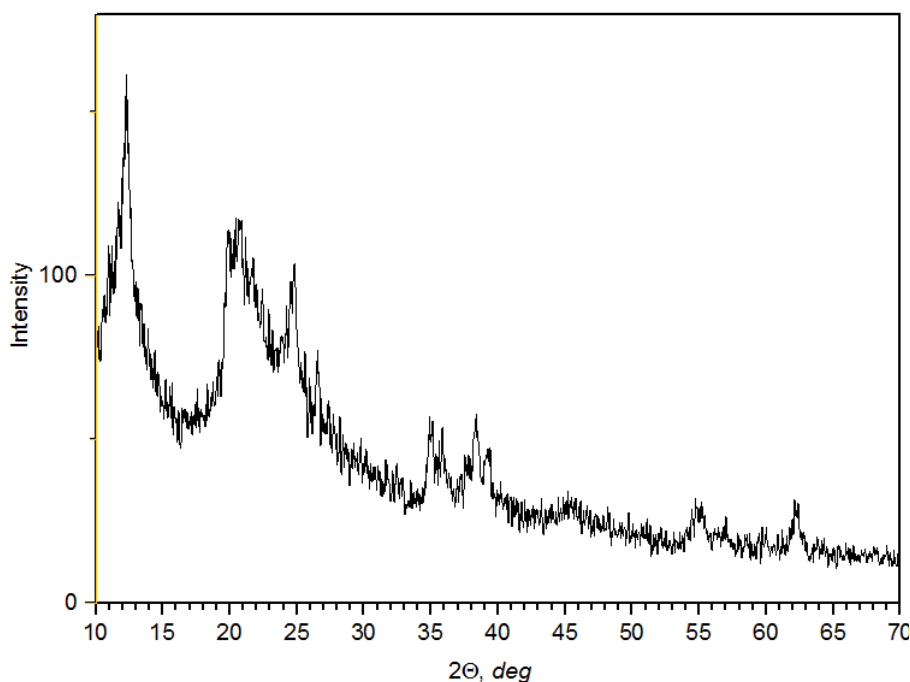


Рисунок 1 – Рентгенограмма механоактивированных композиционных порошковых материалов системы «поливинилпирролидон ПВП + каолинит».

Уменьшение интенсивности рефлексов каолинита, их «размытие» в случае механоактивации смеси «поливинилпирролидон ПВП + каолинит» может свидетельствовать как об аморфизации кристаллитов данной смеси, так и об уменьшении геометрических размеров кристаллитов, т.е. увеличении дисперсности механоактивированных порошкообразных материалов. Это обусловлено более длительными временами механоактивации порошков исследуемого материала по сравнению с системами «поливинилбутираль ПВП + каолинит», «поливиниловый спирт + каолинит».

Определение теплофизических характеристик для данных механоактивированных наноконпозиционных материалов подтверждает процессы аморфизации кристаллических фаз при проведении процесса МА.

Разработана серия наноконпозиционных материалов на основе алифатических полиамидов, предназначенных для нанесения триботехнических покрытий на шлицевое соединение карданных валов. При введении в состав полимерной матрицы механоактивированных наноразмерных частиц «поливинилбутираль ПВП +

каолинит», «поливиниловый спирт + каолинит» обеспечиваются повышенные значения адгезионной прочности и износостойкости вследствие формирования нанофазной структуры с повышенным упрочнением полиамидной матрицы в периферии наночастиц модификатора. Такие покрытия эффективны в узлах трения, эксплуатируемых с ограниченным подводом внешней смазки.

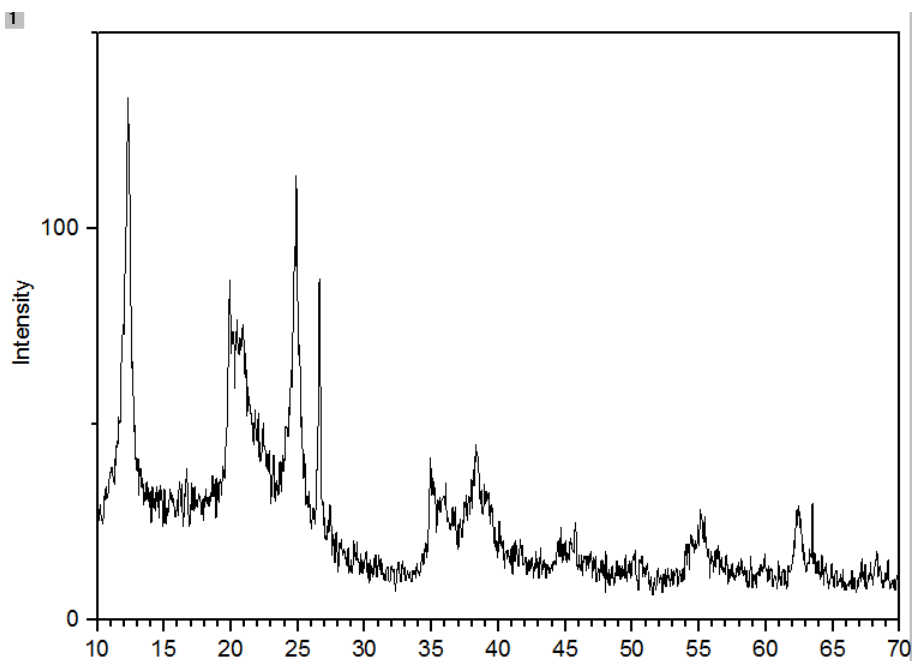


Рисунок 2 -- Рентгенограмма механоактивированных композиционных порошковых материалов системы «поливинилбутираль ПВП + каолинит»

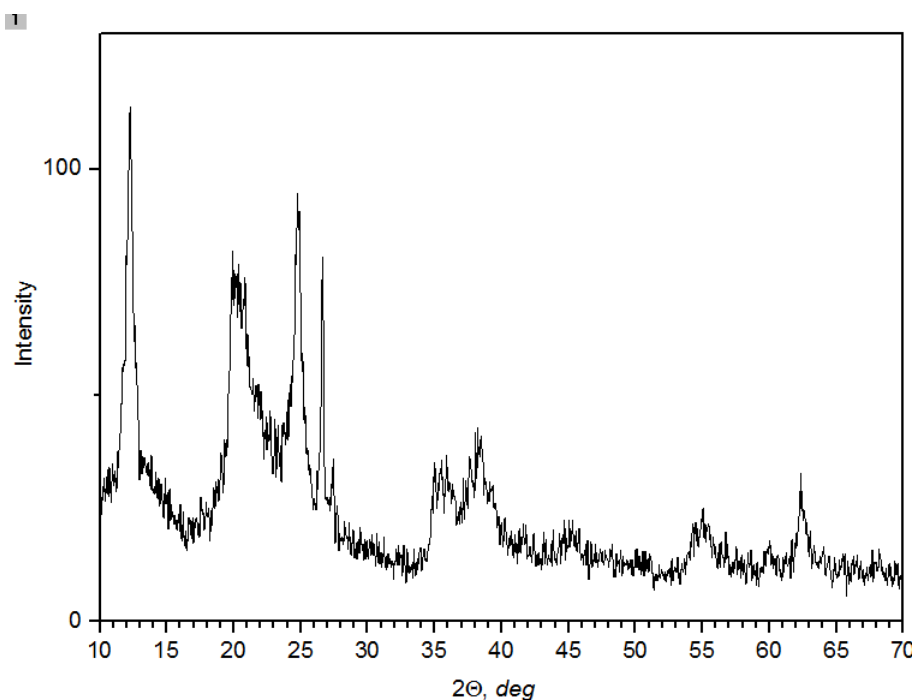


Рисунок 3 -- Рентгенограмма механоактивированных композиционных порошковых материалов системы «поливиниловый спирт + каолинит»

Для карданных валов грузовых автомобилей разработан состав композиционного материала, в котором использована синергическая смесь «поливинилбутираль ПВП + каолинит», «поливиниловый спирт + каолинит» и фторсодержащего модификатора. Благодаря наличию модифицирующих добавок различного состава и механизма действия формируется структура с повышенной износостойкостью благодаря образованию на поверхностях трения разделительного слоя из фторсодержащих и силикатсодержащих продуктов трибохимического превращения. Для формирования триботехнических покрытий узлов трения, эксплуатируемых без смазки, разработан композиционный материал на основе алифатических полиамидов, в котором роль смазочного компонента выполняют полиолефины. При достижении в зоне контакта повышенных температур происходит плавление фазы полиолефина и образование на поверхностях трения разделительной пленки, снижающей коэффициент трения и интенсивность изнашивания.

Повышенной износостойкостью обладают покрытия из композиционного триботехнического материала на основе полиамида 6, модифицированного механоактивированной полимерной добавкой и сухой смазкой. Использование в качестве полимерной добавки дисперсного порошка механоактивированного полиамида 11 позволяет снизить уровень остаточных напряжений в покрытии и уменьшить расход дорогостоящего импортного полимера («Rilsan»), нашедшего в настоящее время широкое распространение в машиностроении [6-8].

Заключение

Для карданных валов с повышенным эксплуатационным ресурсом разработан состав композиционного материала для триботехнических покрытий, в котором использована смесь механоактивированных наноразмерных наполнителей, одним из которых является фторсодержащий олигомерный продукт. Наличие в структуре фторсодержащего компонента обуславливает формирование на поверхностях трения разделительной пленки с низким сопротивлением сдвигу и способностью к знакопеременному переносу. Кроме того, механоактивированный фторсодержащий модификатор способствует упрочнению полиамидной матрицы благодаря формированию пространственной сетки межмолекулярных водородных связей по месту амидных и фторсодержащих групп. В результате такого модифицирования повышаются устойчивость к воздействию термоокислительных сред и гидрофобность покрытий на основе полиамида 6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко В.И. Структура и технология композиционных материалов для конструкций карданных передач серии «Белкард-2000». Дисс. канд. техн. наук: 05.02.01. - Гродно, 2001, - 140 с.
2. V.S Bhajantri, S.C Bajantri, A.M Shindolkar, S.S Amarapure, Karl Roll, "Design and Analysis of Composite Drive Shaft", International Journal of Research in Engineering and Technology - 2014 - № 3 - V.3 - P.738-745
3. Harshal Bankar, Viraj Shinde, P. Baskar, "Material Optimization and Weight Reduction of Drive Shaft Using Composite Material", Journal of Mechanical and Civil Engineering - 2013 - №10 - V.1 - P. 39-46.
4. Низкоразмерные системы: Сб. науч. трудов/ Под ред. В.Ф. Стельмаха и А.К. Федотова. - М.: 2000 г. - 100 с.
5. Чвалун С.Н. Полимерные нанокомпозиты// Природа. - 2001. - № 1. - С. 1-12.

6. Овчинников, Е. В. Физико-механические характеристики углеродных волокон, модифицированных поверхностно-активными веществами // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - 2019. - № 3 (66). - С. 38 - 47.

7. Витязь П.А. Нанокристаллические алмазы и перспективы их использования// Наноструктурные материалы: получение и свойства. - Минск: НАНБ, 2000. - С. 8-20

8. Липатов Ю.С. Наполнение // Энциклопедия полимеров. - М.: Химия, 1974. - Т.2.- С.325 - 332.

9. В.В. Коврига, Л.М. Рагинская, Г.А. Сутырина. Наполненные полимеры. Свойства и применение. // Журн. Всесоюзн. Хим. Об-ва им. Д.И. Менделеева. - 1989. - Т.34. - №5. - С.501 - 506.

10. Энергетические аспекты технологии композиционных термопластичных материалов для металлополимерных конструкций. / Е.И. Эйсымонт, Т.Ф. Григорьева, А.Н. Бурцев, Е.В. Овчинников, С.В. Авдейчик // Горная механика и машиностроение. - 2015. - №3. - С. 89-102.

11. Механоактивированные наполнители для полимерных нанокомпозитов на основе регенерированных термопластов / Т.Ф. Григорьева, Н.З. Ляхов, И.А. Ворсина, А.В. Чекель, Е.В. Овчинников, В.А. Струк, В.В. Андрикевич // Веснік ГрДУ, сер. 6. - 2011. - № 1 (116). - С. 25-28

Ye.V. Ovchinnikov¹, T.F. Grigoryeva², E.I. Eisymont¹, I.I. Muzyka¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

²Institute of Solid State Chemistry And Mechanochemistry of The Siberian Branch of The Russian Academy Of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

MECHANICALLY ACTIVATED COMPOSITE COATINGS FOR HEAVY-LOADED FRICTION NODES

Abstract

The paper presents the study of mechanically activated particles' structure and modification of polymeric materials for heavily loaded automotive friction nodes with these nanophase objects. The main issue is using polymeric materials and their compositions in the design of cardan gears. It is shown that the integrated approach to the problem of increasing the wear resistance of cardan gears in ground and agricultural equipment allows designing various functional materials on the basis of domestic raw materials. The approach is based on the regulation of the structural characteristics of polymer matrices with the help of low-dimensional modifiers.

Keywords: mechanical activation, particles, structure, properties, macromolecular compounds

МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.735

М.М. Радкевич, С.С. Гроховский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, radmich@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ПРОГРАММНОЙ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы, связанные с формированием дислокационной структуры в процессе горячей пластической деформации при программной механико-термической обработке. Приведены результаты исследований влияния режимов ПМТО на деформационное упрочнение изделий из сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов.

Ключевые слова: программная механико-термическая обработка, рекристаллизация, перераспределение и плотность дислокаций, разупрочнение, мелкодисперсные фазы, кристаллическая решетка, механические свойства.

Введение

Наиболее известная и важная особенность процесса горячей пластической деформации состоит в возможности достижения больших степеней деформации при высоких скоростях процесса. Кроме того, при определенных условиях горячей деформации не наблюдается деформационное упрочнение, что связано с развитием динамического разупрочнения. Поскольку горячая деформация осуществляется при температурах, превышающих температуру рекристаллизации, то природу динамического разупрочнения связывают с рекристаллизацией. Однако это предположение не нашло подтверждения в промышленности при анализе большинства технологических процессов горячей пластической деформации. На основании обобщения выполненных в последние годы исследований, в том числе и авторских, по влиянию условий горячего деформирования на структурные изменения материала в цикле деформационно-термической обработки стальных изделий дано научное обоснование разработки упрочняющих технологий, базирующихся на программном механико-термическом воздействии на обрабатываемый материал. Показана возможность целенаправленного регулирования получения структурных состояний конечных структур в условиях непрерывного охлаждения и достижения заданного комплекса механических свойств изделий.

Важно, разделять процессы структурных изменений, которые протекают после окончания пластической деформации и процессы, протекающие во время деформации. Следует также иметь в виду, что критическая степень деформации для

развития динамической рекристаллизации значительно выше, чем для развития статической рекристаллизации.

Результаты

Анализ номенклатуры поковок, изготавливаемых штамповкой, показал, что в реальных условиях производства поковок формирование которых требует больших степеней деформации, инициирующие динамическую рекристаллизацию, практически нет. Кроме того, необходимо иметь в виду и тот факт, что рекристаллизация ни при каких обстоятельствах не может произойти мгновенно, а для своего развития требует определенного времени.

Время штамповки поковки, как правило, меньше, времени, необходимого для развития рекристаллизации, а поэтому можно утверждать, что динамическое разупрочнение путем рекристаллизации во время горячей пластической деформации возможно только в исключительных случаях.

Определяющими для протекания структурных изменений в процессе деформации, в том числе, обуславливающих разупрочнение, являются динамический отдых и полигонизация. Динамическая полигонизация определяет образование разветвленной субструктуры, в которой дислокации связаны в стабильные конфигурации. Эти процессы также зависят от времени, но в меньшей мере, чем рекристаллизационные, поскольку движение отдельных дислокаций или даже их скоплений требует меньшего времени, чем миграция большеугловых границ, которая контролирует рекристаллизацию в объеме металла.

Можно предположить, что если времени для перераспределения дислокаций будет недостаточно, в случае быстрой деформации, то будут образовываться дислокационные структуры горячего наклепа, которые по своей природе ничем не будут отличаться от структур холодного наклепа. При определенных условиях горячей пластической деформации, т.е. при высоких скоростях и больших степенях деформации, а также при низких температурах деформирования, будет формироваться обычная ячеистая структура, характерная для холодной деформации.

При реализации ПМТО сталей температурно-временные параметры в каждый момент времени должны соответствовать условию получения более равновесного состояния системы. При этом кроме обычного диффузионного перераспределения дефектов, осуществляется также их движение к границам раздела и выделение мелкодисперсных фаз, которые располагаются в наиболее слабых областях кристаллической решетки. Перестройка дислокационной структуры, полученной в ходе горячей пластической деформации, наиболее полно будет происходить при температурах, определяющих развитие самодиффузии.

Коэффициент самодиффузии для металлов, имеющих решетки с высокой симметрией,

$$D_{\text{ср}} = a^2 / \tau = D_0 \exp(-U_{\text{сд}} / kT), \quad (1)$$

где a – параметр решетки; τ – усредненное время перескока атома, определяющее заметное развитие самодиффузии при данных T , k ; $U_{\text{сд}}$ – энергия активации самодиффузии, кДж/моль.

Для большинства металлов самодиффузия связана с температурой плавления следующей зависимостью $U_{\text{сд}} = 0,16 T_{\text{пл}}$.

Используя основные положения теории диффузии и выбрав значения

параметров ($D_0 = 0,1 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau = 10^3 \text{ с}$, $a = 10^{-8} \text{ см}$) [1], получим значение температуры $T_{\text{пер}} = 0,5 T_{\text{ПЛ}}$, оценивающее температурную границу, выше которой возможно переползание дислокаций ($T_{\text{пер}}$). Ниже этой температуры ($0,35 T_{\text{ПЛ}}$) будет происходить холодная деформация. При температурах ($0,3 - 0,6 T_{\text{ПЛ}}$) деформация будет теплой. Для теплой деформации характерно то, что в ходе пластической деформации одновременно происходит перестройка тонкой структуры посредством переползания дислокаций, но без существенной миграции границ. При температурах выше ($0,6 - 0,7 T_{\text{ПЛ}}$) имеет место горячая деформация, которая сопровождается интенсивной перестройкой дислокационной структуры. При этом сохраняются только устойчивые при этих температурах дислокационные построения и сопровождается миграцией границ, связанных с развитием различных стадий разупрочнения.

Суждение о том, что степень упрочнения закаленной стали определяется, прежде всего, уровнем прочности деформированного аустенита и не зависит от температуры, при которой был достигнут этот уровень прочности [2]. Однако это не означает, что конкретная температура деформирования аустенита не играет какой-либо роли, в упрочнении стали. Действительно, деформированием аустенита при разных температурах можно получить структурное состояние с одинаковым уровнем прочности, но для этого при более высокой температуре необходима большая степень деформации. Так как, интенсивность упрочнения металла определяется изменением не только дислокационной структуры (повышением плотности дислокаций), но и тепловой активацией, необходимой для преодоления барьеров движущимися дислокациями. Приведенные данные показывают, что природа высокопрочного состояния стали является весьма сложной, а механизм упрочнения зависит от воздействия комплекса структурных факторов: образования дефектов кристаллического строения и особой субструктуры, от которой наследуется дислокационная структура мартенсита; упрочнения в результате дисперсионного твердения и изменения характера выделений карбидов при отпуске; измельчения зерна мартенсита, а также предпочтительной ориентации его кристаллов.

Вряд ли целесообразно объяснять природу упрочнения при термомеханической обработке действием какого-либо одного фактора. В работах [3, 4] показано, что получаемый при этом эффект упрочнения стали не связан с размером зерна мартенсита или аустенита и, что предпочтительная ориентация не оказывает определяющего влияния на уровень прочности.

Безусловно, эффект упрочнения металла при деформационно-термической обработке обуславливается одновременным или последовательным воздействием всего комплекса факторов, вызванных протеканием различных процессов. При этом понятно, что относительная роль каждого фактора будет зависеть, как от технологии, так и от режимов обработки. В материале, при деформационно-термическом воздействии, протекают сложные структурные преобразования, имеющие место, как в процессе самой пластической деформации аустенита, так и во время мартенситного превращения предварительно наклепанного аустенита. Здесь, полиморфное превращение накладывает на перемещение образовавшихся дислокаций, стимулируя при этом образование больших поверхностей нарушения правильности кристаллического строения.

В работах [5, 6] изучено влияние температуры и пластической деформации на морфологические особенности аустенита, сопровождающие пластическую

деформацию. Ограничимся лишь самыми общими комментариями. В данных работах было показано, что в широком интервале температур ($0,1T_{пл} < T < 0,5T_{пл}$) и степеней обжата ($0 - 85\%$) структура хрома, молибдена, ванадия и сплавов на их основе может принимать три качественно различных модификации: однородно распределенные по объему дислокации; рыхлые, не создающие разориентировок дислокационные конфигурации типа жгутов, клубков, плетений и т.п.; ячеистая структура. Последнюю подразделяют на простую ячеистую и разориентированную ячеистую структуру.

Конкретный вид структурного состояния деформированного материала определяется температурой и степенью обжата. Как отмечено в [2], при низкотемпературной деформации с низкой энергией дефектов упаковки, когда вместо порогов образуются плоские скопления, ячеистая структура не формируется.

Существенное влияние на формирование дислокационной структуры оказывает температура деформирования. Понижение температуры способствует более однородному распределению дислокаций, но при этом затрудняется зарождение ячеистой структуры. Кроме температуры и степени деформации на формирование ячеистой структуры оказывает влияние размер зерна. Чем мельче зерно, тем легче образуется ячеистость и, тем при меньших степенях деформации она заменяет однородное распределение дислокаций.

После больших обжатий ячейки представляют собой сильно вытянутые в направлении течения металла кристаллиты пластинчатой формы. С ростом температуры степень вытянутости уменьшается, а с ростом степени деформации, наоборот, увеличивается. По мере накопления деформации изменяются не только размеры ячеек, но и их строение. При этом плотность дислокаций в них уменьшается, межячеистые границы становятся прямолинейней, совершеннее. Увеличиваются и разориентировки между ними. Так, по данным [6] типичными являются углы $\theta = 2 - 3^\circ$, но могут достигать значений $10 - 15^\circ$.

В такой структуре значительная часть границ представляет собой отнюдь не дислокационные образования, а обычные сильно разориентированные границы межзеренного типа. В [7] было предложено называть такую структуру фрагментированной, а процесс формирования структуры — фрагментизацией.

Обобщение материала по исследованию эволюции дислокационной структуры в результате пластической деформации, позволило отметить следующие особенности влияния температуры деформирования на дислокационную структуру.

При низких температурах дислокационная структура состоит из длинных равномерно распределенных винтовых дислокаций с порогами и небольших призматических петель. С повышением температуры отмечается тенденция к образованию дислокационных клубков, в которых размеры и плотность дислокаций растут с увеличением степени деформации. При температуре около $0,2 T_{пл}$. на ранней стадии деформирования образуется неоднородная структура, которая с увеличением степени деформации переходит в ячеистую структуру [8].

Программное механико-термическое упрочнение сталей, заключающееся в регулировании процессов структурообразования при горячей пластической деформации, обеспечивает наиболее равномерное распределение дислокаций по объему материала, благодаря их упорядоченному расположению в дислокационных стенках, причем без значительного повышения их плотности. Образующиеся стенки пронизывают весь упрочняемый объем материала, обеспечивая более однородную

субструктуру.

В таком структурном состоянии материал способен сравнительно равномерно поглощать производимую энергию всем нагруженным объемом.

Характерной особенностью изделий, изготовленных в результате ПМТО, являются повышенный комплекс механических свойств и снижение их анизотропности. Проведенные исследования механических свойств различных сталей показали, что в результате ПМТО возможно достижение более однородного их распределения по сечению изделий [9, 10].

Очевидно, что ПМТО позволяет приблизить механические свойства с точки зрения изотропности к стандартной термообработке, но при этом наблюдается общее их повышение.

При классических структурных изменениях и их влиянии на комплекс свойств необходимо учитывать не только плотность дислокаций, но и расстояние между ними. Последний критерий в значительной мере характеризует способность металла к перераспределению пластической деформации. Это особенно важно и потому, что высокая плотность дислокаций и неравномерность их распределения приведут к локализации деформации. В этой связи очень важное значение приобретает понимание того каково влияние неравномерности распределения дислокаций при довольно высоких значениях плотности.

С учетом влияния неравномерности распределения дислокаций на диаграмме И.А. Одингга (рис. 1.) указаны не только значения плотности дислокаций, но и среднее расстояние между ними:

$$d = 1/\sqrt{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность дислокаций, см^{-2} ; d – расстояние между ними, Å .

При плотностях дислокаций 10^8 , 10^9 , 10^{11} , 10^{12} , 10^{13} и 10^{14} см^{-2} среднее расстояние между ними будет соответственно равным 10 000, 3000, 1000, 300, 100, 30 и 10 Å .

Таким образом, в стали не может быть достигнута весьма такая высокая плотность дислокаций, как $\rho = 10^{13}$ и 10^{14} см^{-2} , ибо в этих случаях должно происходить «насыщение» ими и их аннигиляция. Взаимодействие силовых полей от этих дефектов кристаллической решетки будет приводить к образованию нарушений и склонности металла к возникновению микротрещин. При даже незначительных зональных напряжениях, а они всегда имеются, например, в процессе быстрого охлаждения после нагрева в изделиях, будут возникать трещины. Следует согласиться с Ивановой В. С. в том, что значительное увеличение плотности дислокаций будет приводить к падению прочности и даже разрушению. Данное обстоятельство проиллюстрировано штриховой линией на диаграмме (рис. 1). Известно, что деформационно-термическая обработка приводит к увеличению плотности дислокаций в закаленном металле. При этом, как уже отмечалось, очень важно учитывать расстояния между дислокациями и характер их распределения. Если принять, что после обычной (объемной) закалки инструментальных сталей расстояние между дислокациями примерно составляет 250 — 800 Å , то после ПМТО соответственно 150 — 250 Å . Повышая плотность дислокаций, уменьшаем расстояние между ними в два-три раза. Необходимо отметить, что увеличение плотности дислокаций делает их распределение более равномерным. Это благоприятный фактор, но при некотором значении плотности возможно перекрытие, и взаимодействие полей напряжений от близко расположенных дислокаций, а отсюда

и образование микронесплошностей и даже трещин.

При сравнении плотности дислокаций и расстояния между ними после ПМТО и заводской обработки сталей 08X18H10T и 20X13 можно отметить, что для различных режимов ПМТО стали 08X18H10T плотность дислокаций колеблется в пределах $\rho = 6 \cdot 10^9 - 2,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, для стали 20X13 соответственно $\rho = 1,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (рис. 2).

Электронно-микроскопические исследования показали, что ПМТО обеспечивает более однородное распределение дислокаций (рис. 3, 4) при достаточно высокой их плотности.

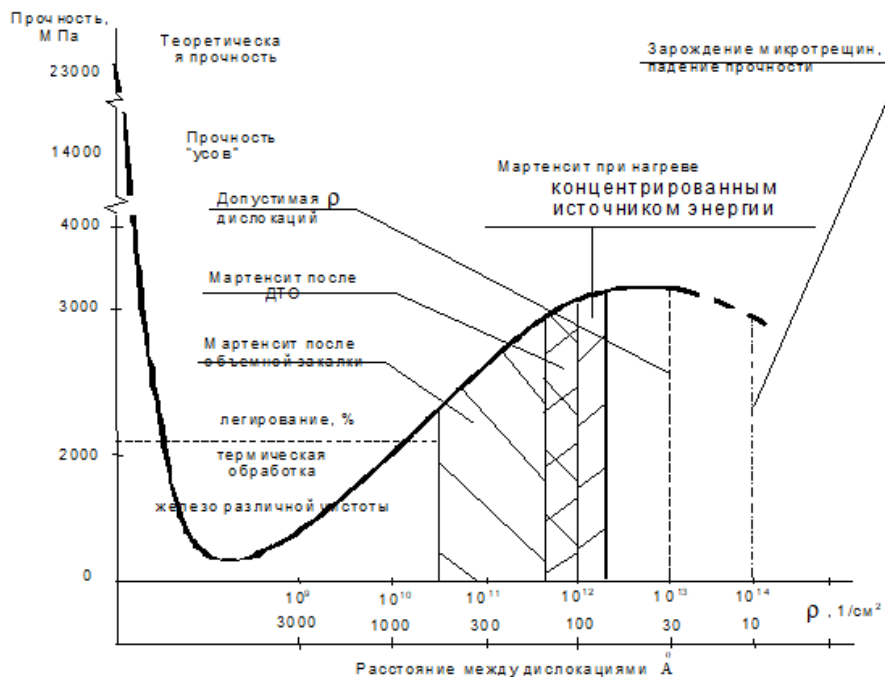


Рисунок 1 – Схема прочности стали в зависимости от плотности и равномерности распределения дислокаций

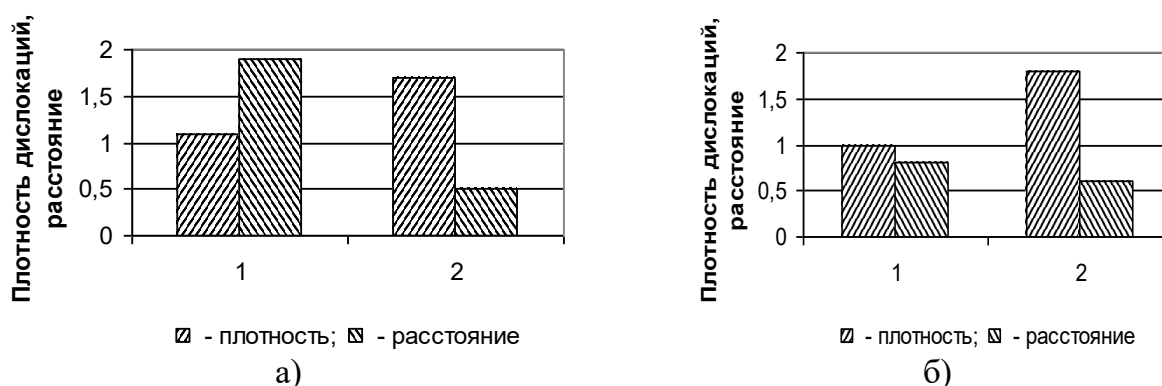


Рисунок 2 – Плотность дислокаций ($\rho \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) и расстояние между дислокациями ($d \cdot 10^3 \text{ Å}$): а – сталь 20X13; б – сталь 08X18H10T: 1 – Заводская технология; 2 – ПМТО

Заключение

Характерной особенностью изделий, изготовленных в результате ПМТО, являются повышенный комплекс механических свойств и снижение их анизотропности. Проведенные исследования механических свойств различных сталей показали, что в результате ПМТО возможно достижение более однородного их

распределения по сечению изделий [11].

Очевидно, что ПМТО позволяет приблизить механические свойства с точки зрения изотропности к стандартной термообработке, но при этом наблюдается общее их повышение.

При классических структурных изменениях и их влиянии на комплекс свойств необходимо учитывать не только плотность дислокаций, но и расстояние между ними. Последний критерий в значительной мере характеризует способность металла к перераспределению пластической деформации. Это особенно важно и потому, что высокая плотность дислокаций и неравномерность их распределения приведут к локализации деформации. В этой связи очень важное значение приобретает понимание влияния неравномерности распределения дислокаций и плотности при довольно высоких их значениях.

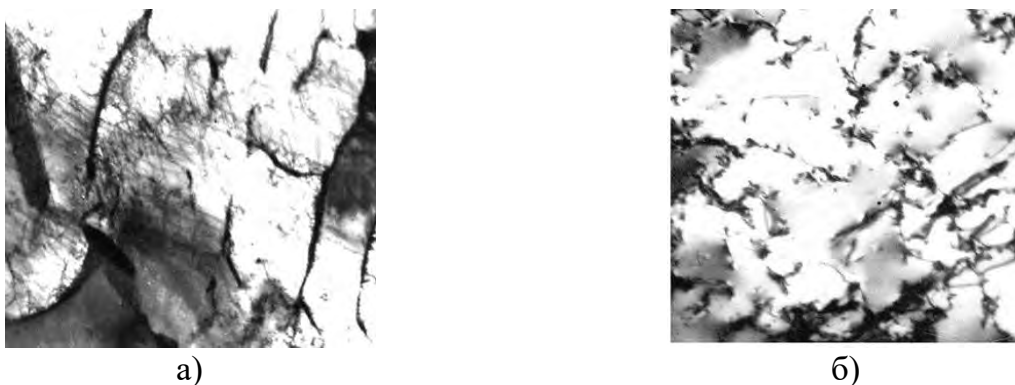


Рисунок 3 – Дислокационная структура стали 20X13. Электронная микрофотография x 33000: а – распределение дислокаций после заводской обработки; б – распределение дислокаций после ПМТО



Рисунок 4 – Дислокационная структура стали 08X18N10T. Электронная микрофотография x 33000: а – распределение дислокаций после заводской обработки; б – распределение дислокаций после ПМТО

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей. Спр.изд./Бернштейн М.Л., Добаткин С.В., Капуткина Л.М., Прокошин С.Д. -М.: Металлургия, 1989. 544 с.
2. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
3. Бернштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка металлов. 1960. N 10. с. 31.

4. Skarek J., Habrovec F., Kounicky J. The inheritance of defects by martensite during ausforming. // J.Iron and Steel Inst. 1967.Vol. 205. ; № 3. P. 330 – 335.

5. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Иващенко Р.К. Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена. Киев.: Наукова думка.1983. 232 с.

6. Аккузин С, Литовченко И, Тюменцев А.Н. Тюменцев Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства аустенитной стали с дисперсными частицами. Материалы международной конференции по физической мезомеханике. Материалы с многоуровневой иерархической структурой и интеллектуальной технологией производства. Декабрь 2020. с.1-5.

7. Трефилов В.И. В кн.: Физика деформационного упрочнения монокристаллов. Киев.: Наукова думка.1972.191 с.

8. Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. – М.: Металлургия, 1990. 336 с.

9. Атрошенко А.П., Радкевич М.М., Спиринов В.Д., Берлет Ю.Н. Влияние параметров ВТМО на механические свойства конструкционных сталей. В кн.: Повышение качества, надежности и долговечности изделий из конструкционных, жаропрочных и инструментальных сталей. Л.1977.с.79-81.

10. Атрошенко А.П., Радкевич М.М., Спиринов В.Д. Повышение прочности деталей машин высокотемпературной термомеханической обработкой. //Вестник машиностроения.1980.N10.с.63-35.

11. Паршин А.М. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионных сталей и сплавов. Челябинск.: Металлургия, 1988. 646 с.

12. Радкевич М.М. Технология упрочняющей механико-термической обработки. Издательство «Инфра-Инженерия», Москва, Вологда.2022. 210с.

M.M. Radkevich, S.S. Grokhovskiy

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,

radmich@mail.ru

DISLOCATION STRUCTURE FORMATION AT PROGRAMMED MECHANICAL AND THERMAL PROCESSING

Abstract

The paper considers the aspects of dislocation structure formation at hot plastic deformation under programmed mechanical and thermal processing. The influence of preliminary mechanothermal processing modes on strain hardening of pearlitic, martensitic and austenitic steels is analyzed.

Keywords: programmed mechanical and thermal processing, recrystallization, redistribution and distribution of dislocations, softening, fine particles, crystal lattice, mechanical properties.

И.В. Калатошишвили, В.С. Мамутов, К.С. Арсентьева, В. Авдеенко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, ivank300@gmail.com

КРИВАЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация

Сделана оценка корректности применения параметров кривой деформационного упрочнения металлов, полученной испытанием стандартных образцов на растяжение в качестве зависимости эффективного напряжения от эффективной деформации при конечно-элементном моделировании процесса. Для анализа проведен численный эксперимент по растяжению виртуального образца. Установлена значительная неравномерность этих характеристик.

Ключевые слова: кривая деформационного упрочнения, виртуальные испытания растяжением стандартного образца, оценка неоднородности эффективных напряжений и деформаций по длине образца.

Введение

В настоящее время для расчета процессов обработки металлов давлением (ОМД) все чаще применяют численные методы решения. Это связано с нелинейностью краевых и смешанных задач математической физики, которые достоверно описывают течение и разрушение металла в процессах ОМД. Наиболее часто для численного решения применяют методы конечных элементов (КЭ) [1]. Среди уравнений и соотношений механики сплошных сред в решателе КЭ комплекса свойства металлов в большей степени задаются в определяющих уравнениях или соотношениях. В основу этих уравнений положены факты опытного происхождения, полученные в результате макроэксперимента, в ходе которого измеряются механические величины, входящие в определяющие уравнения [2]. Результатом такого макроэксперимента применительно к ОМД является кривая деформационного упрочнения металла – зависимость между напряжением текучести и интенсивностью тензора деформаций (инженерных, относительных или тензора Генки, логарифмических) [3,4]. Обычно применяют испытание образцов на растяжение, используя методику, описанную в ГОСТ 1497 [5]. Образец растягивают до разрушения, а затем обрабатывают кривую «усилие – изменение длины образца», получая кривую деформационного упрочнения. Из этой кривой можно получить все характеристики металла, необходимые для формул в инженерных расчетах процессов ОМД: относительное удлинение при разрыве δ , физический предел текучести σ_{s0} , условный предел текучести σ_{02} и предел прочности σ_B [6]. При этом предполагается, что на большей части испытания за исключением этапа образования шейки образец сохраняет свою цилиндрическую или прямоугольную форму с постоянными по длине образца напряжением и деформацией. Для КЭ расчетов данная кривая аппроксимируется зависимостью напряжения текучести от логарифмической деформации. Параметры аппроксимации задаются при построении КЭ модели.

Однако современные КЭ комплексы требуют задания зависимости эффективного напряжения от эффективной деформации.

Целью данной работы являлась оценка допустимости применения кривых деформационного упрочнения, полученных растяжением, для КЭ моделирования процесса ОМД в качестве зависимостей эффективного напряжения от эффективной деформации.

Методы

Для достижения поставленной цели был проведен численный эксперимент на виртуальном образце по оценке постоянства эффективного напряжения и эффективной деформации в процессе стандартного испытания цилиндрического образца. Под виртуальным разрывным образцом имеется в виду модель, обладающую набором свойств (геометрических, механических) как и физический разрывной образец [7]. Компьютерное моделирование осуществлялось с использованием КЭ комплекса LS-DYNA [8].

Понятия эффективного напряжения и эффективной деформации до недавнего времени не были приняты в нашей отечественной литературе. Касаясь эффективного напряжения (напряжение фон Мизеса), то его отечественный аналог – напряжение текучести Губера-Мизеса [3]. Аналог эффективной деформации пока не появился.

Ниже рассмотрено вычисление эффективной пластической деформации в решателе КЭ комплекса [8]. Полагается, что точка тела находится в пластическом состоянии и приращение интенсивности тензора деформаций положительно ($\Delta \varepsilon_i > 0$). Рассматривается бесконечно малое перемещение точки $p(t)$ деформируемой заготовки, например, за один временной шаг $\Delta t = t^{n+1} - t^n$. На рис.1 – приращение исходного вектора перемещения определено вектором (временной индекс не показан)

$$\Delta \vec{u} = \Delta u_1 \vec{e}_1 + \Delta u_2 \vec{e}_2 + \Delta u_3 \vec{e}_3 = \Delta u_i \vec{e}_i. \quad (1)$$

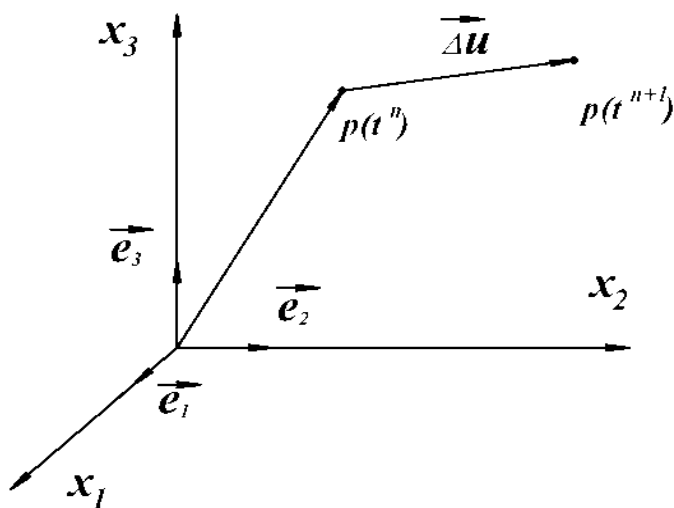


Рисунок 1 – Малое перемещение точки деформируемого тела

Компоненты вектора перемещений могут быть получены в процессе вычисления на соответствующем временном шаге. При этом тензор малых деформаций (тензор Коши) на временном шаге $n+1$ определяется соотношением:

$$\{\Delta \varepsilon_{ij}\}^{n+1} = \frac{1}{2} (\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i})^{n+1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial (\Delta u_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial (\Delta u_j)}{\partial x_i} \right]^{n+1}. \quad (2)$$

Здесь повторяющийся индекс по правилу Эйнштейна означает суммирование по этому индексу от 1 до 3, а запятая между индексами означает дифференцирование по координате, соответствующей этому индексу.

Вычисляется тензор накопленных деформаций, который в матричной форме определяется соотношением:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}^n + \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{11} & \Delta\varepsilon_{12} & \Delta\varepsilon_{13} \\ \Delta\varepsilon_{21} & \Delta\varepsilon_{22} & \Delta\varepsilon_{23} \\ \Delta\varepsilon_{31} & \Delta\varepsilon_{32} & \Delta\varepsilon_{33} \end{bmatrix}^{n+1}. \quad (3)$$

Имея на текущем временном шаге $n+1$ значения компонент тензора накопленных деформаций, можно вычислить его интенсивность (эквивалентную деформацию)

$$\varepsilon_{eq}^{n+1} = \varepsilon_i^{n+1} = \frac{2}{\sqrt{3}} [(\varepsilon_1^{n+1} - \varepsilon_2^{n+1})^2 + (\varepsilon_1^{n+1} - \varepsilon_3^{n+1})^2 + (\varepsilon_2^{n+1} - \varepsilon_3^{n+1})^2]^{1/2}, \quad (4)$$

где выражение записано через главные компоненты тензора. Далее определяется величина приращения эквивалентной деформации $\Delta\varepsilon_{eq}^n$

$$\Delta\varepsilon_{eq}^{n+1} = \varepsilon_{eq}^{n+1} - \varepsilon_{eq}^n. \quad (5)$$

Затем вычисляется эффективная пластическая деформация

$$\varepsilon_{ef}^{n+1} = \sum_{n=1}^{n+1} \Delta\varepsilon_{eq}^{n+1}. \quad (6)$$

Выражение (6) может быть выражено через тензор скоростей деформаций. Эффективная деформация в общем случае не совпадает с интенсивностью тензора накопленных деформаций (эквивалентной деформацией) вследствие возможной несоосности тензоров накопленных деформаций и скоростей деформаций. Предполагается, что в случае простого нагружения (испытания на растяжение или сжатие) эффективная деформация совпадает с интенсивностью тензора деформаций Генки или с логарифмической деформацией.

Цилиндрический пятикратный разрывной образец по ГОСТ 1497–84 (тип II, №5) представлен на рис. 2, а. Конечно-элементная разбивка с учетом осесимметричности показана на рис. 2, б.

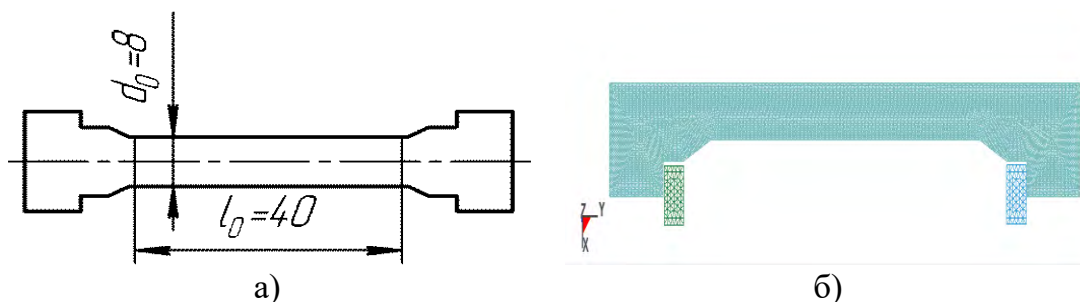


Рисунок 2 – Виртуальный образец: а) геометрия; б) конечно-элементная разбивка

В качестве материала для численного эксперимента взята сталь 10. Для конечно-элементных расчетов задавалась зависимость кривой деформационного упрочнения в виде аппроксимации по типу Холломана:

$$\sigma_s = B \varepsilon_i^m, \quad (7)$$

где σ_s – напряжение текучести, ε_i – интенсивность тензора логарифмических деформаций. Параметры зависимости (7) получались на основе степенной аппроксимации данных для стали 10, представленных в работе [9]: $B = 677.73$ МПа, $m = 0.1701$. Аппроксимация проводилась в пределах до $\varepsilon_i = 0.3$, что соответствует относительному удлинению $\delta_5 = 0.34$ [9]. Суммарное удлинение образца, чтобы обеспечить такую деформацию, задавалось 13.6 мм. Деформирование образца (рис. 2, б) вычислялось при помощи решателя КЭ комплекса LS-DYNA двойной точности.

Результаты и обсуждение

Пример расчета эффективной деформации для промежуточного этапа, когда образец сохраняет цилиндрическую форму, и момента достижения удлинения образца 13.6 мм показано на рис.3, а, б. Вследствие симметрии показана только нижняя часть образца.

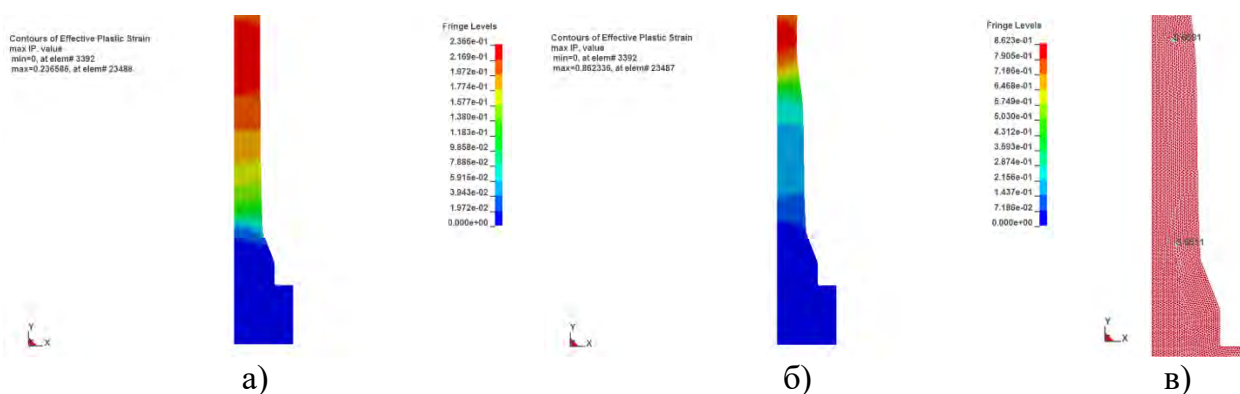


Рисунок 3 – Компьютерный расчет растяжения образца: а) эффективная пластическая деформация в момент сохранения образцом цилиндрической формы; б) эффективная пластическая деформация в момент достижения образца 13.6 мм; в) конечные элементы, отмеченные на деформированном образце

Из рисунков видно, что не имеет место постоянство эффективной деформации на расчетной длине образца, как это предполагается в испытаниях. Более точно это можно отследить для всего периода испытания для двух характерных конечных элементов, показанных на рис. 3, в.

Из графиков траектории эффективных деформаций и эффективных напряжений для двух характерных конечных элементов (рис. 4) видно, что неравномерность этих характеристик начинается практически с самого начала виртуального испытания образца и имеет разницу в конце испытания, величина, которой недопустима с точки зрения корректности компьютерных расчетов. Очевидно, что возможность применения параметров кривой деформационного упрочнения, полученной испытанием на растяжение, проблематична при проведении компьютерных расчетов с использованием современных КЭ комплексов.

Для этих целей лучше подходит комплексный метод получения кривых деформационного упрочнения, разработанный в СССР академиком А.И. Целиковым и его учениками [9]. В данном методе кривая деформационного упрочнения строится из совокупности напряжений условного предела текучести $\sigma_{0.2}$, полученных из образцов, вырезаемых из многократно осаживаемой полосы.

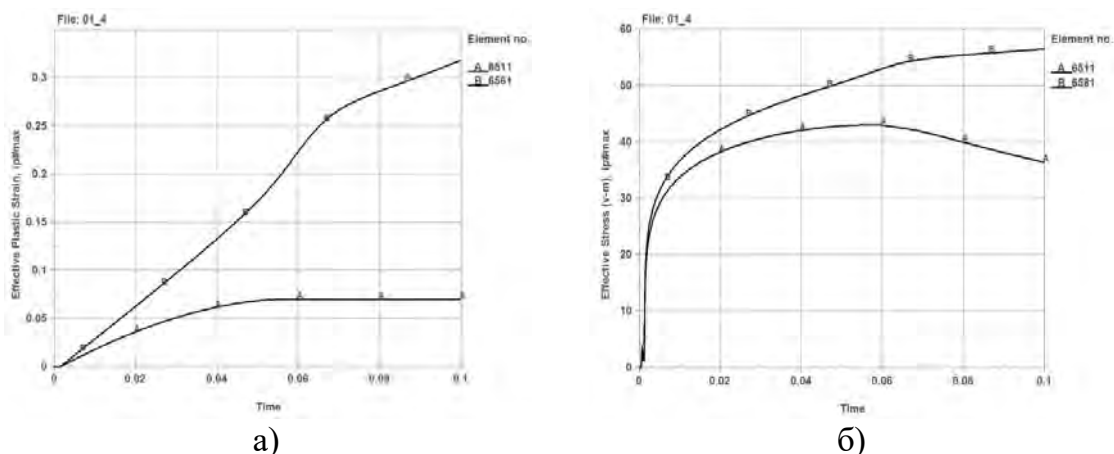


Рисунок 4 – Эффективная деформация (а) и эффективное напряжение в отмеченных конечных элементах образца (б)

Заключение

Анализ эффективных деформаций и эффективных напряжений при растяжении стандартного образца показал, что эти параметры не постоянны в процессе испытания. Поэтому корректность применения кривой деформационного упрочнения металла, полученной таким образом, проблематична при задании параметров зависимости эффективного напряжения от эффективной деформации при создании конечно-элементной модели в современных КЭ комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. - М.: Мир, 1976. - 464 с.
2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. - М.: Наука, 1979. - 744 с.
3. Гунн Г.Я. Теоретические основы обработки давлением. - М.: Металлургия. - 1980, - 456 с.
4. Akhtar S. Khan, Sujian Huang. Continuum Theory of Plasticity. John Wiley & Sons, inc., New York, 1995, 440 p.
5. Методы испытаний на растяжение. ГОСТ 1497. Москва.- Стандартинформ, 2008. - 84 с.
6. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. - Л.: Машиностроение. - 1979, 520 с.
7. Сафонов Б.П., Ерошкин В.П. Разработка аналогов диаграмм растяжения виртуальных разрывных образцов. Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: Инженерная механика, материаловедение и надежность оборудования. Новомосковск, 2008. Вып. №7 (20). - С. 88-95.
8. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.

9. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М: Металлургия, 1973.- 224 с.

I.V. Kalatozishvili, V.S. Mamutov, X.S. Arsentyeva, V. Avdeenko
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, ivank300@gmail.com

STRAIN HARDENING CURVE FOR THE SIMULATION OF PRESSWORKING

Abstract

An assessment is made of the correctness of applying the parameters of the strain-hardening curve of metals obtained by testing standard samples for tension as dependence of the effective stress on the effective strain in finite element modeling of the process. For evaluation, a numerical experiment on stretching a virtual sample was carried out. Significant unevenness of these characteristics has been established.

Keywords: strain hardening curve, virtual tensile testing of a standard sample, assessment of the inhomogeneity of effective stresses and effective strains along the length of the sample.

И.В. Калатоцишвили, В.С. Мамутов, К.С. Арсентьева, Е.В. Сидорова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия , ivank300@gmail.com

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВЫТЯЖКИ- ФОРМОВКИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КАЛИБРОВКОЙ

Аннотация

С применением конечно-элементного (КЭ) комплекса LS-DYNA разработана компьютерная модель вытяжки формовки листовой заготовки с последующей калибровкой. Данная модель учитывает волновые процессы по толщине заготовки и в матрице. Представлен пример расчета для коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Были определены параметры, определяющие качественное получение конкретной детали

Ключевые слова: вытяжка-формовка листовой заготовки с последующей калибровкой, компьютерная модель, КЭ комплекс LS-DYNA, оценка параметров процесса.

Введение

Машиностроение является одной из основных отраслей, как для экономики, так и для государства в целом. Развитие перспективных технологий толкают прогресс и экономику вперед. Одной из таких технологий является электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ). Этим методом можно выполнять все основные технологические операции листовой штамповки: вырубку, вытяжку, рельефную формовку, отбортовку, а также совмещать несколько операций.

Традиционные методы штамповочной оснастки используют два жестких рабочих инструмента – пуансон и матрицу [1,2]. Однако изготовление качественных деталей таким методом требует «подгонки» формы пуансона под матрицу. Такая операция осуществляется вручную, именно поэтому это занимает много времени и значительно увеличивает стоимость подготовки производства для изготовления деталей. Для крупносерийного и массового производства применение метода штамповки в жестких инструментальных штампах оправдано, но для мелкосерийного производства эти особенности приводят к повышению себестоимости изготовления продукции и увеличению срока подготовки производства.

В основе метода электрогидроимпульсной штамповки используются энергосиловые эффекты, связанные с электрическим разрядом в жидкости [3-6]. Схема процесса представлена на рис. 1. При подаче управляющего импульса на вспомогательный разрядник Р при разряде конденсаторной батареи электрогидроимпульсной установки создается высоковольтное напряжение на рабочих электродах 1. На данной схеме электроды расположены соосно в рабочей жидкости 3, которая заполняет камеру 2.

Плазменный канал между электродами, образованный при разряде, увеличивает объем. При этом в жидкости возникает ударная волна и гидропоток, которые воздействуют на заготовку 4 и осуществляют ее штамповку по профилю матрицы 5.

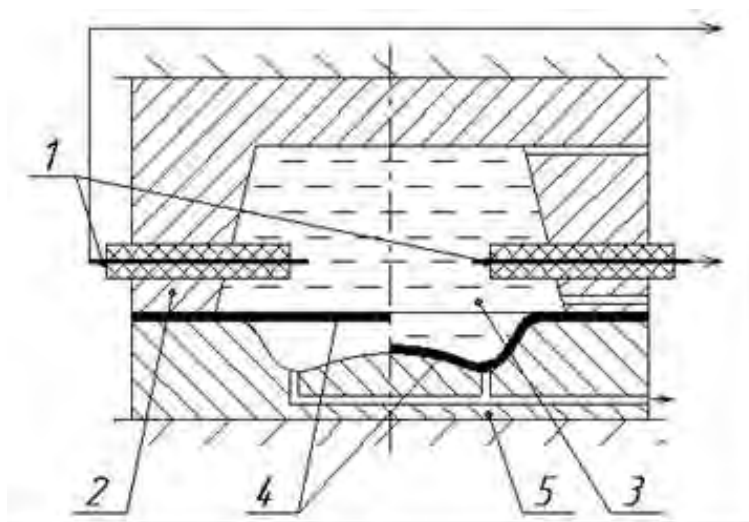


Рисунок 1 – Схема ЭГИШ применительно к операции вытяжки-формовки: 1 – соосные электроды, 2 – камера, 3 – жидкость, 4 – заготовка, 5 – матрица

Определенный интерес представляет штамповка в закрытую матрицу. Компьютерный расчет вытяжки-формовки в закрытую матрицу выполнен в работах [9,10]. При этом заготовка моделировалась моментной оболочкой. Однако, если процесс штамповки сопровождается калибровкой, то необходимо учитывать волновые процессы по толщине заготовки и в матрице. Таких исследований ранее не проводилось. Данная, важная для промышленного применения ЭГИШ вытяжки-формовки задача практически не решена до сих пор.

Целью данной работы являлась разработка расчетной модели вытяжки формовки листовой заготовки с последующей калибровкой в КЭ комплексе LS-DYNA [11].

Методы

Компьютерное моделирование осуществлялось с использованием конечно-элементного комплекса LS-DYNA Student 12.0.0.

В расчетах форма импульса давления задавалась принятым для ЭГИШ законом [9]:

$$p = p_0 N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta) \quad (1)$$

где t - время; p_0 - амплитудное значение давления; нормирующие величины N_p , a , b определяются соотношениями:

$$N_p = \exp(b - 1), a = bc; b = 1/(1 - t^* + t^* \ln t^*); t^* = t_H/\theta, \quad (2)$$

где t_H – длительность фронта давления.

Для решения задачи в осесимметричной постановке в качестве элементов использован двухмерный элемент 2DSolid 162.

Компьютерные расчеты проводились для листовой заготовки коррозионностойкой стали марки 12X18H10T толщиной 0.8 мм со степенным законом упрочнения:

$$\sigma_s = B \varepsilon_i^m, \quad (3)$$

где σ_s – напряжение текучести, ε_i – интенсивность тензора логарифмических деформаций. Параметры зависимости (3) получались на основе степенной аппроксимации данных для стали 12X18H10T, представленных в работе [12]: $B = 171$ МПа, $m = 0.43$. Была выбрана модель материала MAT_POWER_LAW_PLASTICITY с упругими константами: $E = 202$ ГПа, $\nu = 0.35$ и плотностью $\rho = 7800$ кг/м³. Модель материала матрицы задавалась по типу MAT_ELASTIC, а материала прижима MAT_RIGID. Коэффициент трения (по Кулону, при движении) задавался $\mu = 0.15$. Также была учтена осесимметричность задачи. Геометрические модели для расчета, выполненные в комплексе САПР, представлены на рис. 2. Зазоры между элементами взяты для удобства конечно-элементной разбивки. При конечно-элементном расчете зазор между заготовкой, матрицей и прижимом назначался фиксированным и равным 5% толщины заготовки.

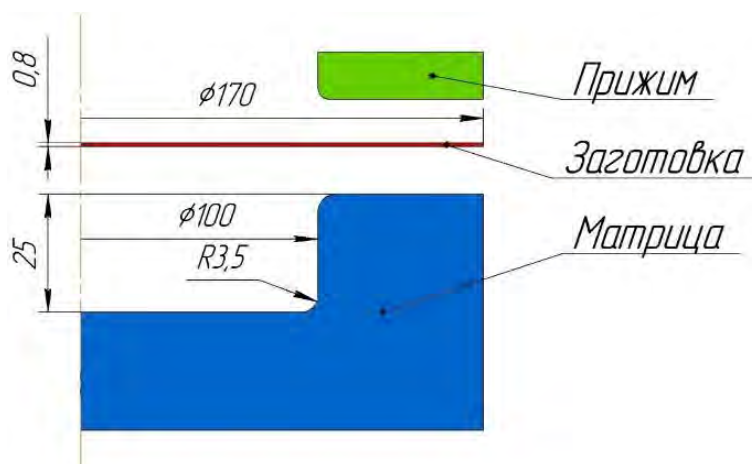


Рисунок 2 – Геометрическая модель процесса для КЭ комплекса, экспортированная из графического комплекса САПР

Результаты и обсуждение

Численный эксперимент позволил рассмотреть заполнение рельефа матрицы, а также складкообразование. Кроме того, выявлено влияние пружинения на конечные размеры детали. На рис. 3 показаны основные неблагоприятные результаты, выявленные в процессе компьютерного моделирования.

Видно, что возможен отскок заготовки (рис. 3, а), а также ее разрушение (рис. 3, б). Длительный импульс давления (до 1000 мкс и выше) улучшает заполняемость рельефа матрицы. Увеличение длительности фронта импульса также улучшает заполнение заготовкой рельефа (рис. 4). При этом эффект отскока заменяется эффектом вдавливания материала заготовки в матрицу. Это позволяет избежать разрушения заготовки при достаточной точности.

Характер протекания исследуемого процесса зависит от ряда факторов: геометрии матрицы и заготовки; параметров импульсного давления; толщины материала и волновых характеристик материала заготовки и матрицы, определяемых

характеристиками материала, а также истечения воздуха из замкнутой полости матрицы и его сопротивлением формообразованию и ряда других. В данной работе рассмотрены только часть этих факторов, что обуславливает необходимость более детального исследования данного сложного физико-механического процесса.

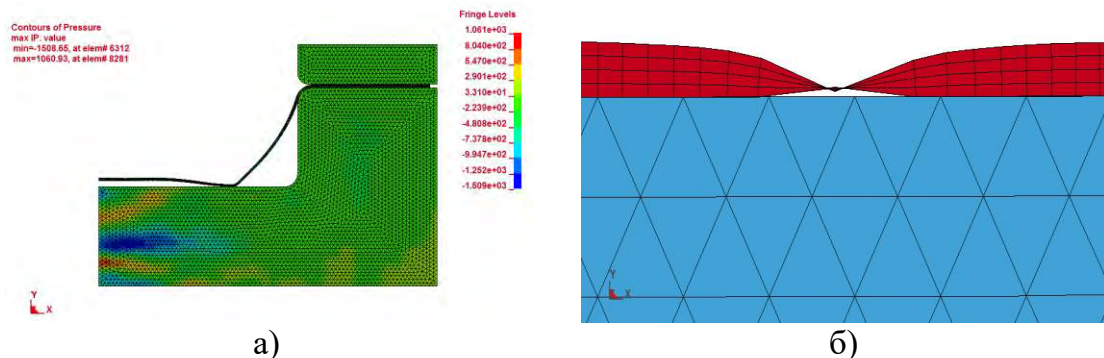


Рисунок 3 – Компьютерный расчет вытяжки-формовки листовой заготовки с последующей калибровкой: а) отскок заготовки; б) разрушение заготовки

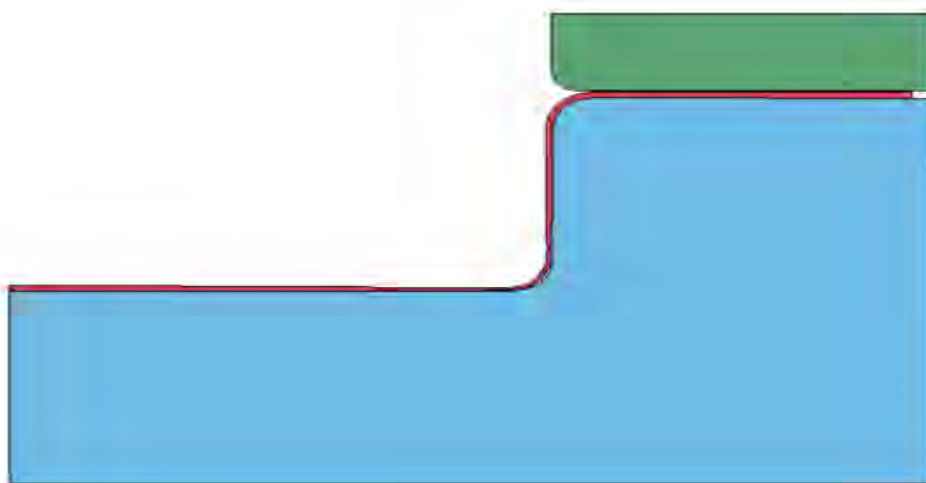


Рисунок 4 – Компьютерный расчет с полученной качественной деталью

Заключение

Разработана и обоснована компьютерная модель вытяжки-формовки листовой заготовки с последующей калибровкой в КЭ комплексе LS-DYNAStudent 12.0.0. Отражены особенности данной модели применительно к калибровке – учтены волновые процессы по толщине заготовки и в матрице. Представлен пример расчета для коррозионностойкой стали 12X18H10T. Определены параметры, определяющие качественное получение конкретной детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах. Т.4. Листовая штамповка. Под ред. А.Д. Матвеева. - М.: Машиностроение. -1987.-544 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. - Л.: Машиностроение. - 1979, 520 с.
3. Suits C.G. Notes on high-intensity sound waves- General Electric Review, 1936, 39/9., p.430.

4. Покровский Т.К., Станюкович К.П. К вопросу о направленном взрыве. - Известия АН, серия Физика - Т.8, 1944. - С.214-233.
5. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.: Машгиз.-1955.-50 с.
6. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. Под ред. Г.А. Гулого. М.: Машиностроение. -1977.-320 с.
7. Богоявленский К.Н. Гидропластическая обработка металлов/ В.А. Вагин, В.С. Мамутов, Рис В.В. и др., Л.: Машиностроение, София: Техника. - 1988, 256 с.
8. Чачин В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов. Мн.: Наука и техника. -1978.- 184 с.
9. Мамутов В. С., Арсентьева К.С. Электрогидроимпульсная вытяжка в закрытую матрицу с плоским дном при различных параметрах нагружения заготовки. Сб. «Современное машиностроение: наука и образование ММЕСЕ-2018», материалы 7-й Международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018, с. 569-579.
10. Арсентьева К.С., Мамутов В.С. Компьютерное моделирование вытяжки-формовки сферических деталей из особо тонколистовых металлов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 161-172.
11. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.
12. Мамутов В.С. Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки: учеб. пособие / В.С. Мамутов, А.В. Мамутов. - Санкт-Петербург: изд-во Политехн. ун-та, 2006. - 188 с.

I.V. Kalatozishvili, V.S. Mamutov, X.S. Arsentyeva, E.V. Sidorova
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, ivank300@gmail.com

COMPUTER SIMULATION OF PULSE DRAWING-FORMING WITH SUBSEQUENT CALIBRATION

Abstract

In the LS-DYNA finite element complex, a computer model of the sheet blank drawing-forming with subsequent calibration has been developed. This model considers wave processes along the thickness of the workpiece and in the matrix. An example of calculation for corrosion-resistant steel 12Kh18N10T is presented. Parameters were determined that determine the quality of obtaining a particular part.

Keywords: drawing-forming of a sheet blank with subsequent calibration, computer model, finite element complex LS-DYNA, evaluation of process parameters.

С.Н. Лежнев¹, А.Б. Найзабеков¹, Е.А. Панин², А.О. Толкушкин¹, Д.В. Куис³
¹Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан, sergey_legnev@mail.ru
²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан
³Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОЙ СОВМЕЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АРМАТУРНОГО ВИНТОВОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация

В работе рассмотрены результаты моделирования нового совмещенного способа деформирования, включающего радиально-сдвиговую прокатку и последующую операцию выдавливания, позволяющего получать винтовой арматурный профиль из круглой заготовки. В ходе моделирования был проведен анализ параметров напряженно-деформированного состояния в зонах радиально-сдвиговой прокатки и формирования винтового профиля в матрице на поверхности и осевой части заготовки. Установлено, что наибольшие значения эквивалентной деформации достигаются при формировании винтового профиля в матрице, при этом после стадии радиально-сдвиговой прокатки по сечению наблюдается существенное градиентное распределение деформации, которое после деформирования в винтовой матрице становится более равномерным.

Ключевые слова: винтовая арматура, радиально-сдвиговая прокатка, выдавливание, моделирование.

Введение

Получение различных черных и цветных металлов и сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) и нано-кристаллической (НК) структурами и, соответственно, высоким уровнем механических свойств и эксплуатационных характеристик является одной из главных задач обработки металлов давлением уже не одно десятилетие. Одним из основных путей решения данной задачи является применение для обработки металлов давлением различных способов, реализующих в процессе деформирования интенсивную пластическую деформацию (ИПД) [1-3] за счет которой осуществляется равномерная интенсивная проработка литой структуры во всем объеме деформируемой заготовки. Но, к сожалению, использование большинства способов ИПД в реальном производстве металлоизделий затруднительно по ряду причин, в том числе и по причине того, что большинство из данных способов не позволяют обрабатывать длинномерные заготовки.

Альтернативным вариантом решения проблемы использования ИПД при обработке металлов давлением в промышленных условиях является разработка совмещенных способов обработки металлов давлением с реализацией в процессе деформирования ИПД. В настоящее время уже разработано целый ряд совмещенных процессов [4-7], которые позволяют обрабатывать длинномерные заготовки с достаточной степенью проработки литой структуры металла для получения в нем ультрамелкозернистой структуры. При этом многие из данных совмещенных способов деформирования позволяют получать в процессе их реализации не только полуфабрикаты, но и готовые изделия. Одной из последних таких разработок

является процесс, предложенный в работе [8], который совмещает редуционную прокатку стержня круглого или квадратного поперечного сечения в квадратном калибре со скручиванием в формовочной матрице (скручивающем механизме). Данный совмещенный способ позволяет получать упрочненный арматурный профиль с градиентной ультрамелкозернистой структурой [9]. Несмотря на достаточно простую конструкцию и эффективную проработку исходной заготовки (за один цикл деформирования происходит развитие деформации от 0,8 в центральных слоях заготовки до 1,4 в поверхностных слоях), данный способ имеет существенный недостаток, связанный с его технологичностью. При переводе производства на сортament другого размера понадобится не только новая матрица, но и новая пара валков с калибром заданных размеров.

С целью повышения технологичности процесса получения упрочненного арматурного профиля, нами была предложена новая схема его формирования (Рисунок 1), включающая деформирование заготовки круглого поперечного сечения на стане радиально-сдвиговой прокатки (РСП) и последующее скручивание заготовки в формовочной матрице специальной конструкции (аналогичной представленной в работе [8]). В данном случае при переналадке производства на новый типоразмер арматурного профиля понадобится установка лишь новой матрицы нужного диаметра, так как для деформирования заготовки другого диаметра на стане РСП необходимо просто свести или развести валки сводится лишь к изменению величины обжатия. Кроме этого, в данном случае будет идти более интенсивная проработка структуры металла, так как из работ [10-11] известно, что при радиально-сдвиговой прокатке, в очаге деформации реализуется схема напряженного состояния близкая к всестороннему сжатию с большими сдвиговыми деформациями, т.е. оптимальная для формирования УМЗ структуры.

Целью данной работы является компьютерное моделирование предложенного совмещенного способа получения арматурного профиля и всестороннее его изучение.

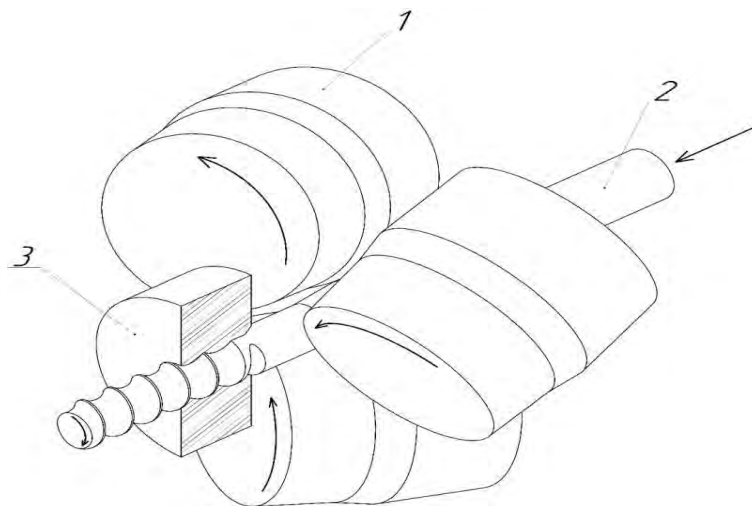


Рисунок 1 – Совмещенный способ получения арматурного профиля: 1 – прокатные валки, 2 – заготовка, 3 – матрица

Материалы и методы

При создании компьютерной модели нового совмещенного процесса, в качестве основного оборудования были использованы параметры стана радиально-сдвиговой прокатки 10-30. В качестве исходной заготовки был взят пруток диаметром

22 мм и длиной 120 мм. Раствор валков был установлен на получение заготовки диаметром 19 мм. В качестве материала заготовки была выбрана сталь AISI 1015, аналог стали 15.

В качестве рабочего инструмента обычно применяют специализированные программные комплексы, работающие на основе метода конечных элементов – Ansys, Deform, SimufactForming, Abaqus и многие другие. У каждого программного продукта имеются как свои достоинства, так и недостатки. Поэтому при выборе инструмента для работы необходимо учитывать такие факторы, как универсальность (возможность моделирования широкого диапазона задач), гибкость (возможность быстрой корректировки модели в случае неверно заданных начальных параметров), производительность (возможность расчета с высокой степенью точности при незначительных временных затратах). При анализе рассмотренных выше продуктов было решено использовать в качестве рабочего инструмента программный комплекс Deform, который полностью соответствует вышеописанным критериям.

При создании модели в программе Deform были приняты следующие допущения:

Материал заготовки является изотропным, в нем отсутствуют начальные деформации, несплошности, включения и т.д.;

Тип заготовки – пластичный, тип инструментов – жесткий;

На заготовку нанесена сетка из 85000 конечных элементов со средней длиной ребра элемента 1,3 мм;

Материал заготовки – сталь AISI 1015, соответствующая стали марки 15;

Начальная температура нагрева заготовки – 1100 °С;

Коэффициент теплопередачи между заготовкой и инструментом был принят равным 5 кВт/(м²·°С), как рекомендуемое значение программой Deform для процессов деформирования. Теплопередача между заготовкой и окружающей средой была активирована;

Скорость вращения валков была принята равной 100 об/мин;

На контакте заготовки и инструмента был установлен тип трения по Зибелю с коэффициентом трения 0,7 на валках и 0,1 в матрице;

Было задано 1000 шагов расчета с временным приростом 0,01 сек/шаг;

После расчета была получена модель совмещенного процесса, в котором заготовка сперва прокатывается на стане радиально-сдвиговой прокатки, при этом на выходе из очага деформации на поверхности заготовки образуется винтовая реборда (рисунок 2, а). При попадании в матрицу заготовка подвергается скручиванию вокруг продольной оси на угол, соответствующий конфигурации винтового канала (рисунок 2, б).

При этом реализуется достаточно полное заполнение винтового канала матрицы, что позволяет получить заданный профиль без возникновения заклинивания заготовки или ее распрессовки на входе в матрицу.

При изучении любого процесса обработки давлением одним из важнейших этапов является исследование напряженно-деформированного состояния. Это дает возможность оценить возникающие значения деформаций и напряжений, выявить места возникновения их критических значений, что, в свою очередь, позволяет проанализировать прочность инструмента, вероятность возникновения дефектов и т.д.

Учитывая тот факт, что разрабатываемый способ деформирования имеет достаточно сложную схему течения металла, которая меняется по мере продвижения

заготовки вдоль продольной оси, наиболее целесообразно рассматривать исследуемые параметры в продольном направлении заготовки в двух вариантах – на поверхности и в центральной части образца. Это позволит не только установить численные значения параметров НДС, но и оценить возникаемое градиентное распределение аккумулируемых факторов (эквивалентная деформация).

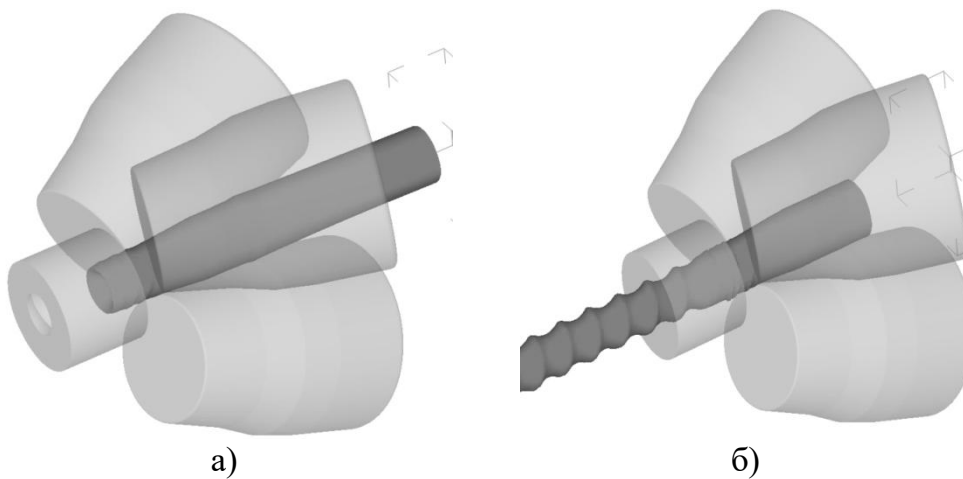


Рисунок 2 – Этапы деформирования

Результаты и обсуждение

Деформированное состояние

Для определения значений деформации необходимо находить значения компонентов соответствующего тензора, которые для трехмерного течения металла очень сложно визуализировать. Поэтому обычно при рассмотрении параметров НДС используют простой показатель интенсивности деформации, или так называемую эквивалентную деформацию, которая включает в себя компоненты деформации в следующем виде:

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации.

При рассмотрении параметра «эквивалентная деформация» было установлено, что на стадии радиально-сдвиговой прокатки накопление данного параметра происходит преимущественно в поверхностных слоях заготовки (рисунок 3). После выхода из валков на поверхности уровень деформации достигает $6,75 \div 8,5$, постепенно снижаясь до 5 в периферийной зоне.

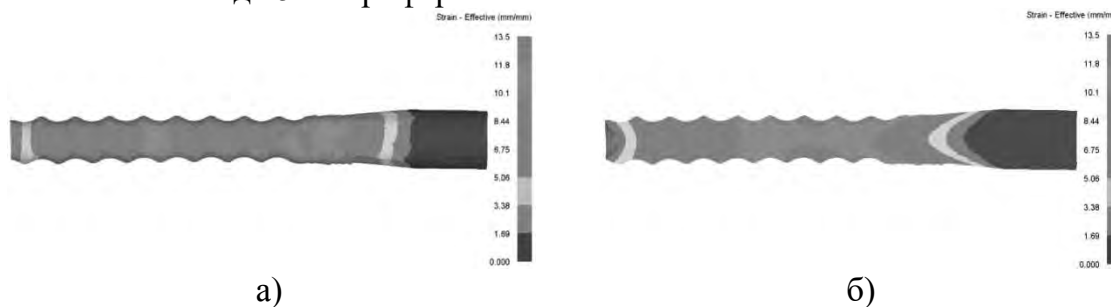


Рисунок 3– Распределение эквивалентной деформации на поверхности (а) и в центре заготовки (б)

При попадании в винтовой канал матрицы заготовка подвергается интенсивной деформации за счет скручивания. В результате происходит значительный прирост деформации по всему сечению заготовки. Так, в поверхностных слоях заготовки, которые приобретают объемную винтовую форму, величина деформации достигает 11,0, плавно снижаясь до 9,0 в периферийной зоне. Центральная зона на данной стадии деформирования прорабатывается максимально интенсивно – здесь величина деформации колеблется в диапазоне 8÷9. Причем, после прохождения винтового канала можно отметить существенное снижение разброса значений деформации.

Напряженное состояние

Для анализа напряженного состояния было рассмотрено среднее гидростатическое давление (рисунок 4).

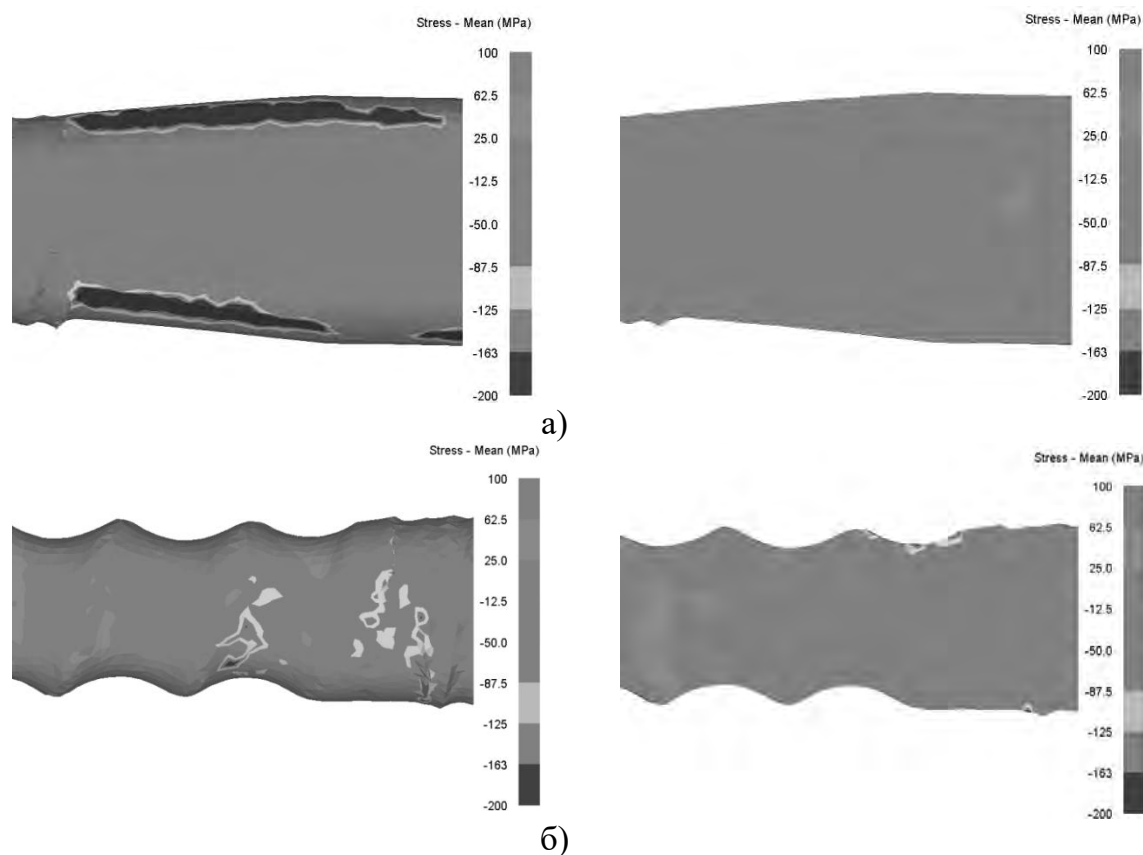


Рисунок 4 – Среднее гидростатическое давление на поверхности и в центре заготовки при радиально-сдвиговой прокатке (а) и формовке в матрице (б)

При радиально-сдвиговой прокатке (рисунок 4а) в зонах контакта металла с валками развиваются преимущественно сжимающие напряжения достигая величины - 200 МПа на поверхности и снижаясь до -12,5 ближе к центральной части заготовки. На свободных от контакта зонах величина данного параметра достигает -50 МПа. При формовке в матрице (Рисунок 4б) в первом витке развиваются сжимающие напряжения около -80 МПа в поверхностных слоях, подвергающихся формовке, и - 60÷-40 МПа в центральной части заготовки.

Выводы

В работе была поставлена задача моделирования совмещенного процесса радиально-сдвиговой прокатки – прессования для получения арматурного профиля из круглой заготовки. По результатам компьютерного моделирования был выполнен анализ параметров напряженно-деформированного состояния в зонах радиально-сдвиговой прокатки и формирования винтового профиля в матрице на поверхности и осевой частях заготовки. Максимальное значение эквивалентной деформации достигается при формировании винтового профиля на заготовке в матрице, что свидетельствует об интенсивной проработке начальной структуры заготовки. Также за счет сжимающих напряжений в матрице снижается неравномерность распределения эквивалентной деформации по диаметру заготовки в сравнении с зоной радиально-сдвиговой прокатки.

Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP14869135).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang, H. Enhanced strength and ductility of nano-grained titanium processed by two-step severe plastic deformation / H. Wang, C. Ban, N. Zhao, Y. Kang, T. Qin, S. Liu, J. Cui. // *Mater. Lett.* - 2020. - V. 266. - №127485.
2. Jiang, S. Mechanisms of nanocrystallization and amorphization of NiTiNb shape memory alloy subjected to severe plastic deformation / S. Jiang, Z. Mao, Y. Zhang, L. Hu. // *Procedia Eng.* - 2017. - V. 207. - P. 1493-1498.
3. Wang, P. New insight for mechanical properties of metals processed by severe plastic deformation / P. Wang, Y. Xiang, X. Wang, Z. Liu, S. Qu, Z. Zhuang. // *Int. J. Plasticity.* - 2019. - V. 123. - P. 22-37.
4. Semenova, I.P. Enhanced fatigue properties of ultrafine-grained ti rods processed by ECAP-Conform / I.P. Semenova, A.V. Polyakov, G.I. Raab, R.Z. Valiev, T.C. Lowe. // *J. Mater. Sci.* - 2012. - V. 47. - № 22. - P. 7777-7781.
5. Naizabekov, A. Effect of combined rolling - ECAP on ultrafine-grained structure and properties in 6063 Al alloy / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina, A. Arbuz, T. Koinov, I. Mazur. // *J. Mater. Eng. Perform.* - 2019. - V. 28. - № 1. - P. 200-210.
6. Naizabekov, A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling-Pressing Process / A. Naizabekov, I. Volokitina, S. Lezhnev, A. Arbuz, E. Panin, A. Volokitin. // *J. Mater. Eng. Perform.* - 2020. - V. 29. - № 1. - P. 315-329.
7. Muszka, K. Influence of strain path changes on microstructure inhomogeneity and mechanical behavior of wire drawing products / K. Muszka, M. Wielgus, J. Majta, K. Doniec, M. Stefanska-Kacziela. // *Mater. Sci. Forum.* - 2010. - V. 654-656. - P. 314-317.
8. Пат. 2640705 (Российская Федерация-Russian Federation) МКИ³В21В 1/16 Способ упрочнения и формирования винтового арматурного стержня / Г.И. Рааб, А.Г. Рааб; Уфимский государственный авиационный технический университет; Заявлено 20.12.2016; Опубл. 11.01.2018, Бюл. №2.
9. Raab, G.I. A new combined method of intensive plastic deformation with the formation of the screw profile of the rod / G.I. Raab, A.G. Raab. // *Machines. Technologies. Materials.* - 2018. - V. 12. - P. 320-322.

10. Валеев, И.Ш. Изменение микротвердости и микроструктуры меди М1 при радиально-сдвиговой прокатке / И.Ш. Валеев, А.Х. Валеева. // Письма о материалах. - 2013. - Т. 3. - № 1. - С. 38-40.

11. Naizabekov, A.B. Theeffectofcrossrollingon the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys / A.B. Naizabekov, S.N. Lezhnev, H. Dyja, T. Bajor, K.Tsay, A. Arbuz, N. Gusseyinov, R. Nemkaeva. // Metalurgija. - 2017. - V. 56. - P. 199-202.

S.N. Lezhnev¹, A.B. Naizabekov¹, E.A. Panin², A.O. Tolkushkin¹, D.V. Kuis³

¹Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, sergey_legnev@mail.ru

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

³Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

DEVELOPMENT AND COMPUTER MODELING OF A NEW COMBINED TECHNOLOGY FOR OBTAINING A REINFORCING SCREW PROFILE

Abstract

The paper considers the results of modeling a new combined deformation method, including radial-shear rolling and subsequent extrusion operation, which allows to obtain a screw reinforcement profile from a round billet. During the simulation, the parameters of the stress-strain state in the zones of radial-shear rolling and the formation of a screw profile in the matrix on the surface and axial part of the workpiece were analyzed. It is established that the highest values of equivalent strain are achieved during the formation of a screw profile in the matrix, while after the stage of radial-shear rolling along the cross section, a significant gradient distribution of strain is observed, which after deformation in the screw material becomes more uniform.

Keywords: screw reinforcement, radial shear rolling, extrusion, modeling.

А.Б. Найзабеков¹, И.Е. Волокитина¹, Е.А. Панин², А.В. Волокитин²

¹Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан, irinka.vav@mail.ru

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Аннотация

В работе проанализировано влияние предварительной термической обработки и радиально-сдвиговой прокатки микроструктуру и свойства меди марки М1. Анализ влияния предварительной термической обработки выполнен на основании результатов конечно-элементного моделирования эволюции структуры медного сплава М1 при радиально-сдвиговой прокатке с различными режимами предварительной термической обработки и натурального эксперимента. Выявлено, что в результате 3 циклов деформирования методом радиально-сдвиговой прокатки в медном прутке произошло измельчение структуры в независимости от вида предварительной термической обработки. Но средний размер зерен после деформирования закаленной структуры более диспергирован.

Ключевые слова: радиально-сдвиговая прокатка, предварительная термическая обработка, моделирование, медь.

Введение

За последние десятилетия в современном материаловедении все чаще используются методы интенсивной пластической деформации, как одни из наиболее эффективных способов измельчения микроструктуры и изменения механических свойств материалов. Одной из разновидностей интенсивной пластической деформации (ИПД) является радиально-сдвиговая прокатка (РСП) [1]. Особенностью процесса является схема напряженно-деформированного состояния, позволяющая формировать мелкозернистую структуру в поверхностном слое деформируемой заготовки. Основной особенностью такой прокатки является немонотонность деформации, а также отличия в пластическом течении и проработке структуры разных зон заготовки вследствие траекторно-скоростных особенностей процесса. В силу этих особенностей течения металла наиболее интенсивные сдвиговые деформации локализуются в зоне пересечения линий скольжения металла – кольцевой зоне поперечного сечения характерной для трехвалковой схемы, что подтверждается моделью. Во внешнем слое каждый малый траекторно-ориентированный элемент подвергается деформации сжатия по радиусу заготовки, деформации сжатия по направлению истечения (вдоль винтовой траектории) и, соответственно, деформации растяжения поперек винтовой траектории. При этом важно, что имеется постоянный градиент скоростей и направлений течения по радиусу, который еще добавляет дополнительные сдвиговые элементы в общую сложную картину напряженно-деформированного состояния. Элементы структурного строения металла, подвергнутые расширяющемуся течению с двухсторонней осадкой (вдоль траектории и вдоль радиуса) приобретают форму изотропных обособленных частиц высокой дисперсности [2].

Также известно, что правильный подбор предварительной термической обработки некоторых черных и цветных металлов и сплавов перед операцией его деформирования зачастую позволяет дополнительно измельчить исходный размер зерна [3,4]. Если говорить о медном сплаве М1, то ранее авторами данной работы уже были проведены исследования влияния процесса радиально-сдвиговой прокатки на эволюцию микроструктуры данного сплава [5]. Но исходные заготовки из медного сплава М1 перед деформированием никакой предварительной термической обработке не подвергались.

Поэтому целью данной работы является исследование влияния предварительной термической обработки на эволюцию микроструктуры медного сплава М1 при деформировании его на стане радиально-сдвиговой прокатки.

Методы

Для достижения поставленной цели было проведено компьютерное моделирование совмещенного режима обработки меди марки М1, включающего в себя предварительную термическую обработку (отжиг, закалка) и последующую радиально-сдвиговую прокатку, что позволит определить влияние данного термомеханического воздействия на эволюцию микроструктуры данного сплава. Для этого были построены 2 модели в программном комплексе Deform. В первой модели заготовка диаметром 38 мм и длиной 80 мм подвергалась нагреву до 700°C при скорости нагрева 80°C/час, затем выдерживалась при заданной температуре 50 минут для равномерного прогрева по сечению, после чего резко охлаждалась со скоростью 500°C/сек до комнатной температуры, т.е. моделировался процесс закалки. Во второй модели режим нагрева и выдержки были аналогичными, скорость охлаждения до комнатной температуры составляла 80°C/час, т.е. моделировался процесс отжига. После чего обе заготовки подвергались трем циклам радиально-сдвиговой прокатки с обжатиями по 3 мм в каждом проходе.

В качестве исходного размера зерна было принято значение в 100 мкм. Поскольку из ряда работ [2,6] известно, что основное измельчение структуры при радиально-сдвиговой прокатке происходит преимущественно в поверхностных слоях заготовки, то для анализа была выбрана зона на глубине 1 мм от поверхности.

При лабораторном эксперименте материалом исследования являлась техническая медь марки М1 (Cu 99,99%) в состоянии поставки. До радиально-сдвиговой прокатки медные прутки диаметром 38 мм подвергали отжигу и закалке при температуре 700°C в течение 50 минут и охлаждению соответственно на воздухе или в воде. Деформацию осуществляли на стане радиально-сдвиговой прокатки «СПВ-08» с исходного диаметра прутка 38 мм до диаметра 29 мм за 3 перехода при комнатной температуре.

Изучение микроструктуры осуществлялось на промышленном оптическом металлографическом микроскопе OLYMPUSBX61. Исследование микроструктуры выполнялось на специально подготовленных микрошлифах. Подготовка микрошлифов осуществлялась по стандартной методике: вырезка темплета с помощью отрезного станка BRILLANT 230; получение плоской поверхности образца; шлифование и полирование с помощью шлифовально-полировальной машины SAPHIR 520 ATM.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты моделирования структуры. После проведения закалки исходное зерно измельчается со 100 мкм в исходном состоянии до 60 мкм. При отжиге размер зерен практически не изменяется и остается на уровне 100 мкм. Реализация интенсивной пластической деформации в виде трех циклов радиально-сдвиговой прокатки приводит к существенному измельчению зерен в обеих моделях. Однако за счет различной предварительной термической обработки конечные размеры зерен отличаются. После закалки и трех циклов РСП средний размер зерен равен 13-15 мкм, тогда как после отжига и трех циклов РСП средний размер зерен равен 20-22 мкм.

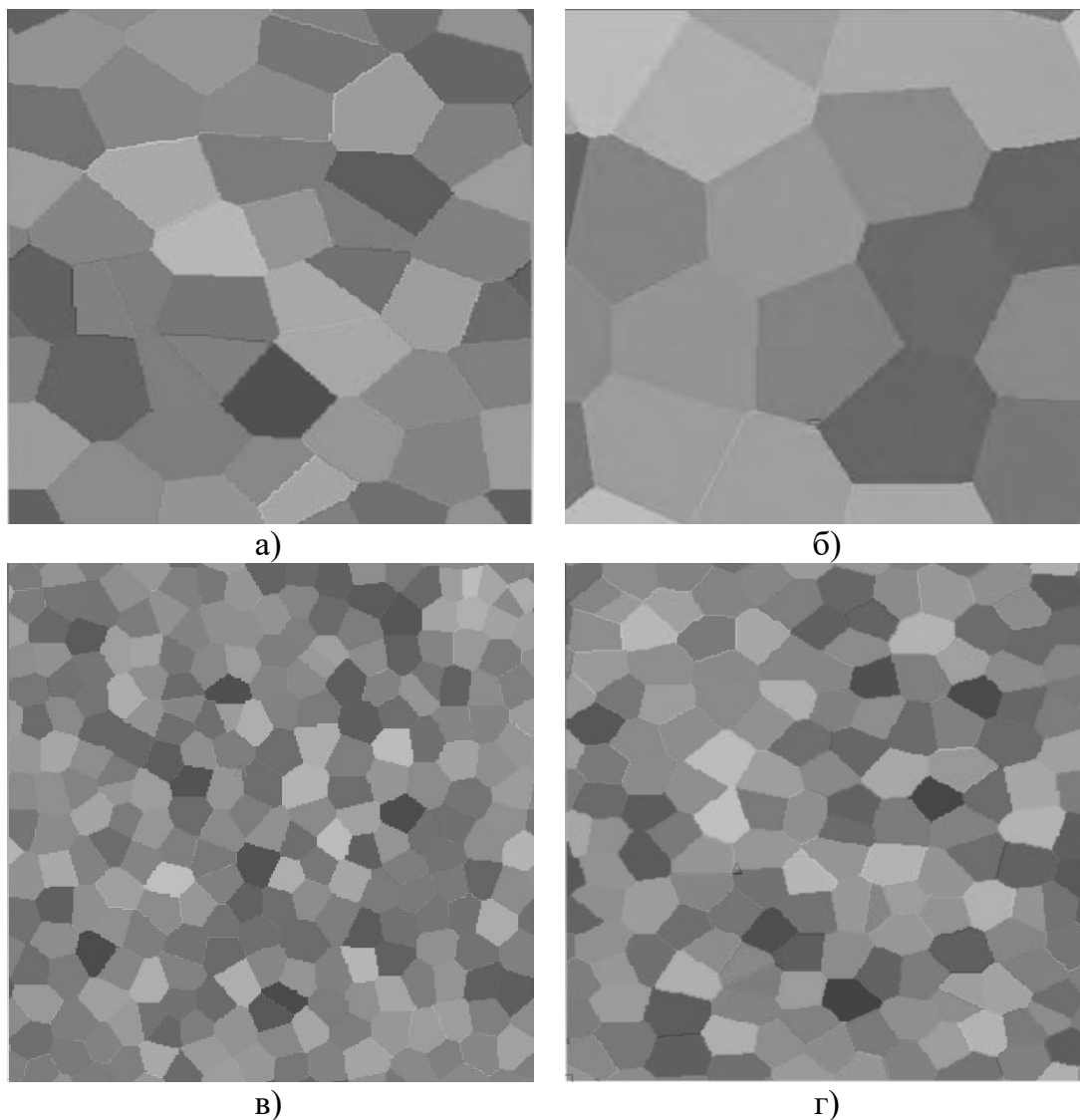


Рисунок 1 – Результаты моделирования микроструктуры: а) после закалки; б) после отжига; в) после закалки+3 цикла РСП; г) после отжига+3 цикла РСП

На рисунке 2 показаны оптические фотографии микроструктуры меди после предварительной термической обработки: отжиг и закалка. Микроструктура отожженной меди имеет равноосные полиэдрические зерна с наличием двойников, средний размер зерен составляет 100мкм (рисунок 2,б). После закалки медь теряет свою полиэдрическую структуру и становится более дисперсной, зерна становятся

более вытянутыми в направлении градиента охлаждения, средний размер зерен 65 мкм (рисунок 2,а).

Для оценки эффективности радиально-сдвиговой прокатки необходимо сравнить микроструктуру медных образцов до и после деформирования. Фотографии микроструктуры, полученные при изучении меди марки М1 после РСП представлены на рисунках 2,в-г.

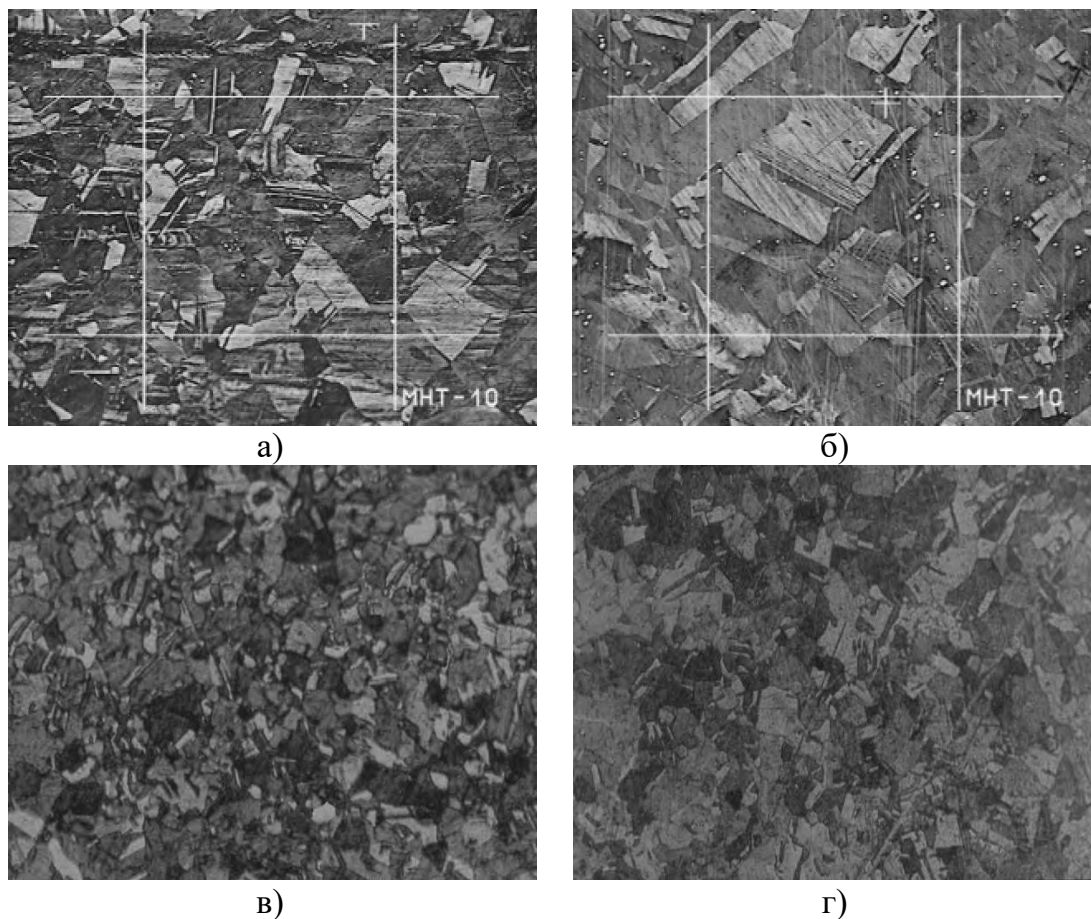


Рисунок 2 – Микроструктура меди марки М1, x100: а) после закалки; б) после отжига; в) после закалки+3 цикла РСП; г) после отжига+3 цикла РСП

В результате 3 циклов деформирования методом радиально-сдвиговой прокатки в медном прутке произошло измельчение структуры в независимости от вида предварительной термической обработки. Но как видно из анализа микроструктуры средний размер зерен после деформирования закаленной структуры более диспергирован. Так с применением предварительной термической обработки закалка микроструктура измельчилась с 65 до 18 мкм за 3 цикла деформирования. А с применением отжига зерно измельчилось со 100 до 25 мкм. Суммарное снижение размера зерна при применении закалки составляет 73%, а при применении отжига – 75%.

Заключение

Применение предварительной термической обработки влияет на конечный размер зерна после деформирования методом радиально-сдвиговой прокатки. А

принимая во внимание, что охлаждение меди в воде позволяет делать этот металл более пластичным, можно судить о снижении усилия в процессе деформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pater, Z. Numerical Analysis of the Skew Rolling Process for Rail Axles / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak // Archives of Metallurgy and Materials. - 2015. - Т.60. - P.415-418.
2. Galkin, S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production // Steel in Translation. - 2014. - №44 (1). - P. 61-64.
3. Богатов, А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. - 164 с.
4. Лопатин, Н.В. Математическое моделирование радиально-сдвиговой прокатки титанового сплава ВТ6 в условиях формирования глобулярной структуры / Н.В. Лопатин, Г.А. Садищев, С.П. Галкин // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2011. No5. С. 44-49.
5. Naizabekov, A. Combined process "helical rolling-pressing" and its effect on the microstructure of ferrous and non-ferrous materials / A. Naizabekov, S. Lezhnev, A. Arbutov, E. Panin // Metallurgical Research and Technology. - 2018. - Vol. 115. № 213.
6. Lopatin, N.V. Mathematical modeling of radial-shear rolling of the VT6 titanium alloy under conditions of formation of a globular structure / N.V. Lopatin, G.A. Salishchev, S.P. Galkin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2011. - Vol. 52. - P. 442-447.

Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP14869128)

A.B. Naizabekov¹, I.E. Volokitina¹, E.A. Panin², A.V. Volokitin²
¹Rudny Industrial Institute, Rudny, Kazakhstan, irinka.vav@mail.ru
²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

STUDIES OF THE EFFECT OF PREHEATING ON THE EVOLUTION OF COPPER MICROSTRUCTURE DURING DEFORMATION

Abstract

The paper analyzes the effect of preheat treatment and radial-sliding rolling on the microstructure and properties of copper grade M1. The analysis of the effect of preheat treatment is based on the results of finite-element modeling of the structure evolution of copper alloy M1 during radial-sliding rolling with different modes of preheat treatment and full-scale experiment. It has been revealed that as a result of 3 cycles of deformation by radial-sliding rolling in copper rod the structure refinement occurred irrespective of the type of preheating treatment. But the average grain size after deformation of the hardened structure is more dispersed.

Keywords: Radial shear rolling, preheat treatment, modeling, copper.

С.В. Пилипенко
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Беларусь

РАСЧЕТ ШИРИНЫ РУЧЬЯ КАЛИБРА СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Аннотация

Целью работы является разработка метода расчета ширины ручья калибра станом ХПТ. Метод должен легко адаптироваться под изменяющиеся условия прокатки и давать верные результаты распределения ширины ручья калибра вдоль конуса деформации при минимальных затратах на экспериментальные прокатки. Предложенный метод основан на использовании известной формулы Е.Е. Осады, позволяющей определить линейное смещение рассматриваемого сечения вдоль конуса деформации за двойной ход клетки. По предложенному алгоритму находится изначальный диаметр каждого контрольного сечения. Применяя коэффициент овализации рассчитывается необходимая величина развалки. Метод испробован при прокатке труб из титановых сплавов.

Ключевые слова: Трубы, холодная прокатка, стан ХПТ, развалка, метод расчета

Введение

Холодной прокаткой труб на станах ХПТ производятся трубы с повышенными требованиями к их качеству [1-2]. В сортаменте выпускаемых таким способом труб присутствуют трубы из титановых, циркониевых сплавов, сложные к обработке трубы из нержавеющей сплавов. Среди требований к качеству следует выделить такие факторы, как точность по толщине стенки, овальности и требования к чистоте поверхностей труб. На обеспечение выполнения этих требований, кроме прочих факторов, значительное влияние оказывает распределение развалки ручья калибра вдоль конуса деформации [3-4, 10]. Исследования, направленные на уточнение метода расчета развалки калибра, на данном этапе являются актуальными.

Цель и задачи исследований

В ходе прокатки труб из титановых и циркониевых сплавов применяется, как безэмульсионная прокатка, так и прокатки на эмульсиях, основанных, например, на синтетических маслах. В любом случае прокатка ведется без подсмазочного слоя, что негативным образом сказывается на условиях трения и на необходимую, достаточную для данных условий деформации величину развалки калибра. Особенные сложности возникают в том случае, когда в одном цеху используется несколько видов смазки для разных видов сортамента. Целью работы является разработка удобного к использованию, легко адаптивного к изменяющимся условиям прокатки, метода расчета величины развалки калибра станом ХПТ.

Анализ исследований

Ширина калибра (рис. 1, B_x) стана ХПТ больше его диаметра ($D_{к.х}$) на $2b_x$ (двойную величину развалки) [6]. Развалка обеспечивает образование выпусков калибра (рис. 1, поз. 2).

Величина развалки (b_x), в каждом контрольном сечении развертки ручья калибра, должна обеспечивать условия поперечного течения металла трубы в данных условиях деформации. Сложность в том, что калибр не должен быть слишком широким. Чрезмерная ширина калибра приводит к уменьшению способностей стана раскатывать разностенность трубы-заготовки, из-за увеличения наведенной станом разностенности [4-6, 9-10]. Кроме этого, в ручье увеличивается необжимаемая в ходе рабочего хода клетки часть металла, которая находится в выпуске ручья (поз. 2, рис. 1). Из-за того, что металл в вершине калибра (поз. 2, рис. 1) получает определенную долю вытяжки, металл выпусков находится в условиях растяжения. При определенных условиях, при прокатке тонкостенных труб, это может даже привести к характерным разрывам стенки трубы.

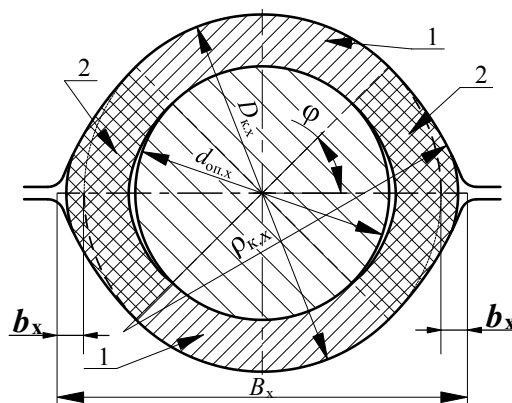


Рисунок 1 – Калибр стана ХПТ [5-6, 8-9]:

1 – металл в вершине калибра;

2 – металл в выпусках калибра;

$d_{оп.х}$ – диаметр оправки; φ – угол выпуска

На протяжении всего времени существования станов ХПТ было разработано значительное количество подходов [5-9 и др.] к этой проблеме. Ширина ручья калибра оказывает влияние, как на качество труб, так и на производительность станов [9-10].

Ю. Ф. Шевакин [6], при многочисленных обмерах, отобранных входе прокатки конусов с заторможенным в них мгновенном очаге деформации (т.е. с заторможенной в конусе деформации клетью) доказал, что именно параметры формоизменения металла в мгновенного очага деформации непосредственно влияют на необходимую для верного ведения процесса (без зажимов и подрезов трубы) величину развалки. Труба впервые сталкивается с боковой поверхностью калибра в точке А (рис. 2) [6]. Здесь происходит первое столкновение трубы с рабочей поверхностью валка, она редуцируется под действием равнодействующей силы.

Для верного ведения процесса ХПТ необходимо, чтоб до момента заполнения металлом трубы всей поверхности вершины калибра (в каждом положении мгновенного очага деформации вдоль конуса), происходила оваллизация сечений только в вертикальном направлении (рис.2, стрелка 2). При прокатке в калибрах с ручьем, выполненным в верном диапазоне значений φ , прямая оваллизация сечений конуса деформации (т.е. в направлении, противоположном стрелке 1, рис. 2) и начнется лишь после заполнения металлом трубы всего ручья, от краев к вершине калибра [6]. В трудах Ю.Ф. Шевакина процесс оваллизации трубы в вертикальном направлении называется «обратной оваллизацией» [6]. Если же угол развалки будет

чрезмерным (например, из-за расшлифовки ширины ручья шлифмашинкой, прямо на стане) труба начнет прямую овализацию (в направлении, противоположном стрелке 1, рис. 2) не заполнив ручей своим металлом вплоть до вершины. Чрезмерно малый угол развалки также приводит к неправильному ведению процесса деформации сечений трубы в мгновенном очаге деформации. По исследованиям Ю.Ф. Шевакина [6], при холодной пильгерной валковой прокатке угол развалки φ должен принимать значение в пределах:

$$f^\circ + \varphi < 45^\circ, \quad (1)$$

где f° – угол трения; φ – угол развалки (оптимальное значение – 25°).

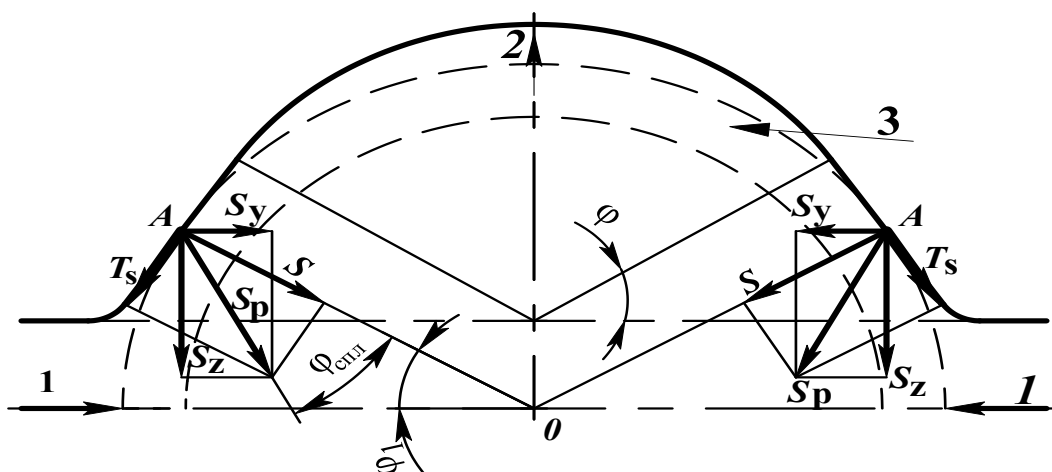


Рисунок 2 – Схема действия сил в начальный момент захвата [6]: S_p , S_z , S_y – составные равнодействующей действия сил в точке первого прикосновения трубы (в точке A); T_s – сила трения; $\varphi_{откл}$ – угол отклонения равнодействующей от нормали; φ_1 – угол расположения точек первого столкновения трубы с боковой поверхностью калибра; S – сила, которая действует по нормали к боковой поверхности ручья; 1 и 2 – направление обратной овализации трубы; 3 – стенка трубы

Для расчетов развалки калибра существует формула, которая учитывает величину овализации трубы, вызванной редуцированием в мгновенном очаге деформации [2, 6]:

$$b_i = k_t \cdot m \cdot \mu_{\Sigma i} \cdot (tg\gamma - tg\alpha) + k_d \cdot m \cdot \mu_{\Sigma i} \cdot tg\alpha, \quad (2)$$

где $k_t = 1,8-1,05$ – коэффициент учета обжатия по толщине стенки; $k_d = 0,3-0,5$ – коэффициент учета редуцирования; $tg\gamma$ и $tg\alpha$ – конусность развертки ручья калибра и конусность оправки; m – максимальная величина подачи

В источнике [11] изложена хорошо зарекомендовавший себя при прокатке труб из нержавеющей сталей, из сплавов титана и циркония метод расчета величины развалки. Согласно этому методу, сперва рассчитывают величину развалки вначале зоны редуцирования:

$$b_p = 0,7(D_p + 1,1m \cdot \mu_p \gamma_i) - D_p, \quad (3)$$

где D_p – диаметр ручья калибра в начале зоны редуцирования; μ_p – вытяжка в зоне редуцирования; γ_i – угол развертки ручья калибра в зоне редуцирования, рад.

Дальше рассчитывают ширину ручья в конце зоны предотделки:

$$b_{пр.} = 0,7(D_T + 1,3m \cdot \mu_{\Sigma} \operatorname{tg} \alpha_i) - D_T, \quad (4)$$

где D_T – диаметр ручья калибра в конце зоны обжатия; μ_{Σ} – вытяжка за двойной ход клетки.

Рассчитывают развалку ручья калибра в других контрольных сечениях:

$$b_x = b_p(b_p - b_{пр.}) \left(\frac{x}{l}\right)^2, \quad (5)$$

где x – текущая координата; l – длина зоны обжатия и зоны предотделки.

Очень хорошие результаты показывает формула расчета ширины калибра, предложенная П.И. Орро и Я.Е. Осадой [9]:

$$B_x = D_{mp} + 2 \frac{\left(\sqrt{S_x^2 + 2 \frac{mS_3(D_3 - S_3)}{D_x - S_x} (\operatorname{tg} \gamma_x - \operatorname{tg} \alpha_x)} - S_x \right) \operatorname{tg} \gamma_x}{\operatorname{tg} \gamma_x - \operatorname{tg} \alpha_x} \quad (6)$$

При расчете калибровок по методу КПО (Калибровка пропорциональных обжатий) [12] для расчета развалки в сечениях конуса деформации предлагается формула:

$$b_x = \frac{(D_3 - D_m - \gamma_{\min} l_{обж}) \left(\frac{x(1 + m\mu_{\Sigma x})}{l_{обж}} \right)^{n+1} + \gamma_{\min} \left(\frac{x}{l_{обж}} \right)}{2}, \quad (7)$$

где γ_{\min} – начальный угол конусности калибра (т.е. перед участком калибровки); n – степень крутизны развертки гребня ручья калибра, используемая в данной калибровке. D_3 – диаметр заготовки; $l_{обж}$ – длина зоны обжатия

Основной материал

При расчете величины развалки тем, или иным методом допускается ряд упрощений. Развалка должна обеспечивать величину редуцирования входящей в мгновенный очаг деформации трубы (D_{x-l_x} рис. 3) в сечении x . Значение диаметра D_{x-l_x} можно рассчитать напрямую, с минимальными упрощениями. Для этого необходимо определить, для каждого контрольного сечения x , величину l_x . Значения l_x с оптимальной точностью определяются по формуле Я. Е. Осады [6, 9, 12-14]:

$$l_x = \frac{\sqrt{S_x + 2(\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \alpha) \frac{mS_3(D_3 - S_3)}{D_x - S_x}} - S_x}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \alpha}, \quad (8)$$

где S_x и D_x – толщина стенки и диаметр трубы в сечении;

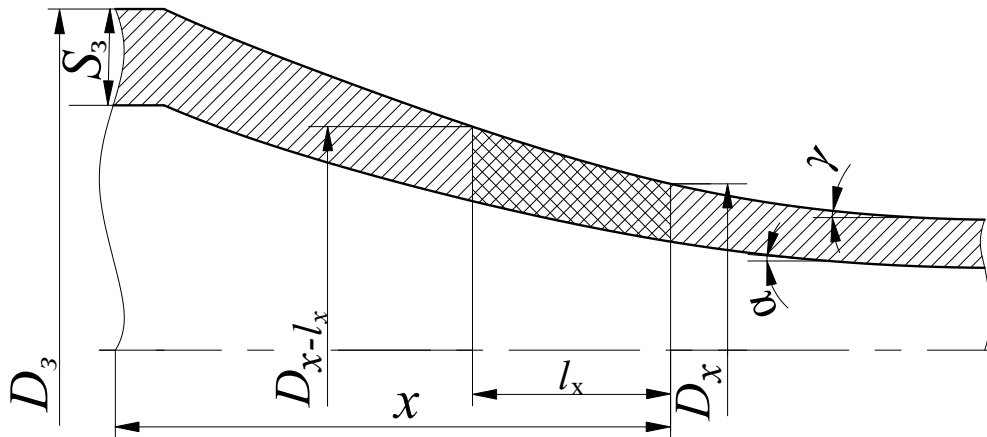


Рисунок 3 – Схема к расчету исходного для сечения x диаметра трубы

Зная координаты развертки калибра с расположением нужного D_{x-lx} , его значение можно рассчитать напрямую, по известным зависимостям (рис. 4 а). Либо интерполяцией данных рассчитанной калибровки (в том, или ином математическом или табличном редакторе, рис. 4 б).

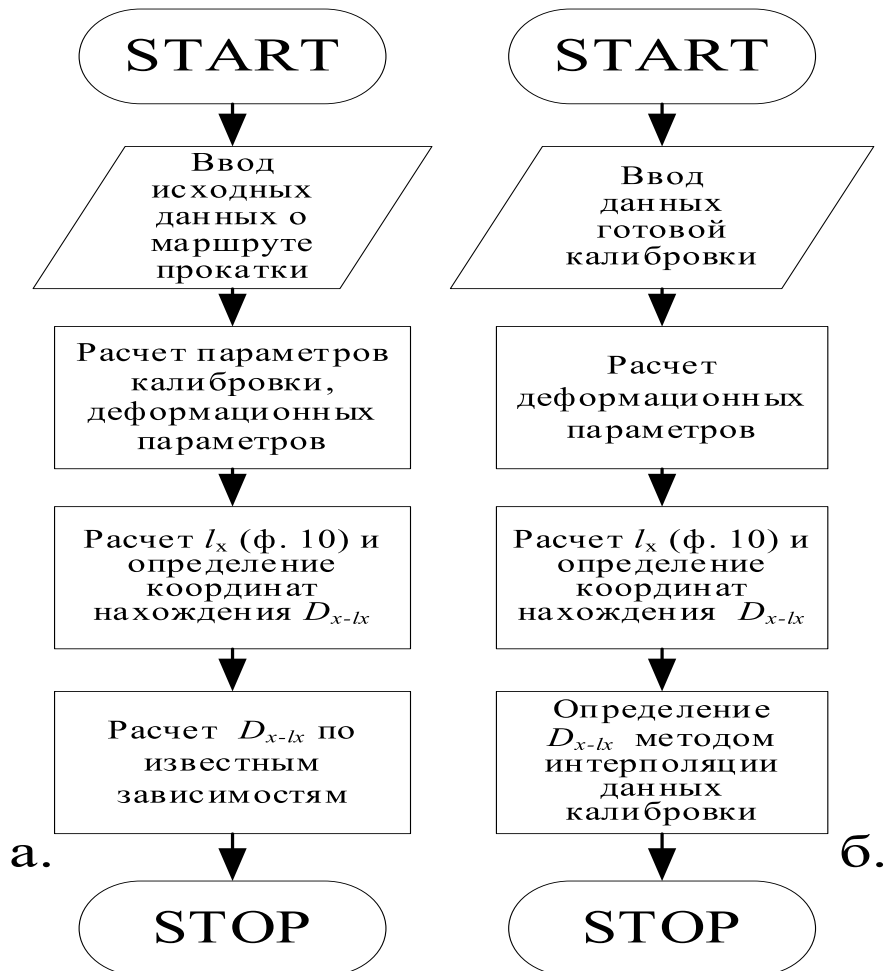


Рисунок 4– Определение D_{x-lx} : а – в ходе расчета калибровки; б – по готовым данным калибровки [12-14]

В случае известного D_{x-lx} (для каждого D_x) развалка рассчитывается по формуле

$$b_x = \frac{D_{x-lx} \cdot K_D - D_x}{2}, \quad (9)$$

где K_D – коэффициент овализации, в основном зависит от условий трения (для начала зоны редуцирования $K_D = 1,019 \dots 1,025$, для начала зоны предотделки $K_D = 1,015 \dots 1,01$)

Для экспериментальной прокатки выбран проблемный маршрут прокатки трубы из титанового сплава Gr-2, 50,8x8,38-27,5x4,1. Обжатие по площади поперечного сечения - 73%. Входе прокатки в калибрах, рассчитанных по стандартной методике наблюдались закусывания трубы в начальных сечениях конуса деформации, на наружной поверхности готовых труб образовывались трещины (не глубокие, удалялись зачисткой). Прокатка проходила на эмульсии на основе минерального масла, без применения подсмазочного слоя.

При моделировании процесса получено новое распределение величины развалки вдоль конуса, которое удовлетворило процесс и даже позволило снизить величину развалки в конце конуса, что благополучно сказалось на выше указанных качественных показателях готовых труб (рис. 5).

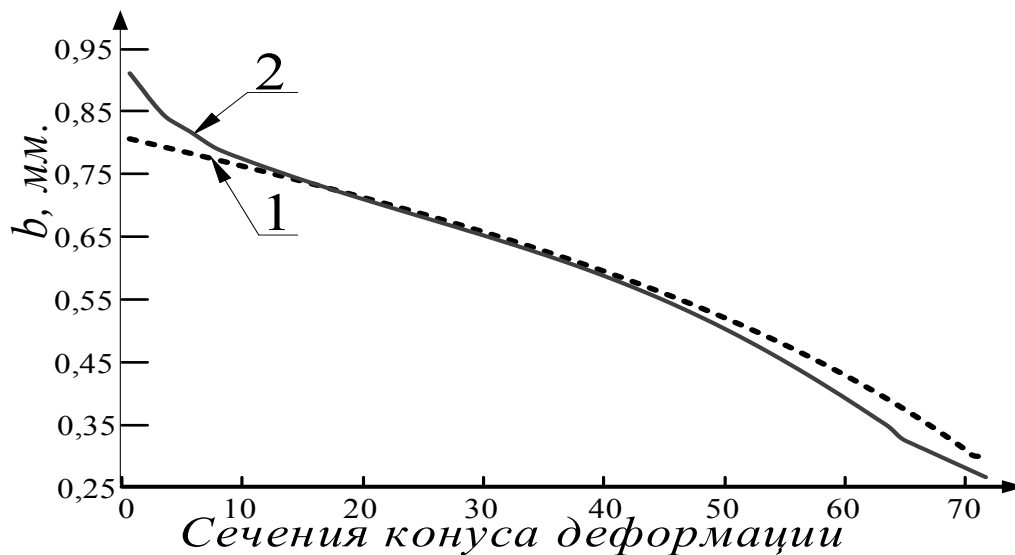


Рисунок 5– Распределение развалки ручья калибра стана ХПТ-55 (маршрут - 50,8x8,38-27,5x4,1, сплав Gr-2, $m=6$ мм, оправка с криволинейной образующей рабочего профиля):
1 – по стандартному методу (применяемая калибровка – КПО);
2 – по предложенному методу (рис. 4, б)

Как видно из рисунка 5, в начале конуса деформации (в зоне редуцирования) наблюдалась недостаточная величина развалки, скорректированная предложенным методом. В конце конуса, напротив, существующий метод завышал значения развалки, что не позволяло получать точные по толщине стенки трубы, благоприятствовало появлению трещин на внешней поверхности труб.

Выводы

Представлений метод позволяет оптимизировать распределение величины

развалки ручья калибров вдоль конуса деформации. Этом позволяется не только получать трубы нужного качества с меньшим расходным коэффициентом, но и позволяет увеличить величину подачи, без угрозы закусывания трубы буртами ручья калибра. Предложенный метод не сложно оптимизировать для конкретных условий прокатки. Метод основан на известной зависимости Я.Е. Осады, используемой для расчета величины обжатия вдоль конуса деформации за двойной ход клетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pilipenko S.V. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S.V. Pilipenko, V.U. Grigorenko, V.A. Kozechko, O.O. Bohdanov / *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. - 2021. - №1. -р. 78-83.
2. Пилипенко С.В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q-фактора вдоль конуса деформации / С.В. Пилипенко // *Известия вузов. Цветная металлургия*. № 3, 2019. – С. 30-35.
3. Кекух, С.Н. Исследование профиля поперечного сечения ручья калибров стана ХПТ / С.Н. Кекух, И.Ю. Коробочкин, И.М. Обух-Швец // *Материалы III всесоюзной научно-практич. конф. "Теоретические проблемы прокатного производства"*. - Днепропетровск: ДМЕТИ. - 1980. - С.248-249.
4. Рогов, М.Б. Новая методика определения величины и характера смещения металла при холодной прокатке труб /М.Б. Рогов // *Производство труб. Сборник статей по теории и практике трубного производства № 5* - М.: «Металлургиздат». 1965 - С. 105-112.
5. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб [Монография] / Ю.Ф.Шевакин. - М: Металлургиздат, 1963. - 269 с.
6. Тетерин, П.К. Теория периодической прокатки [Монография] - М.: Металлургия, 1978. - 256 с.
7. Abe, H. Fabrication Process for Zr-Lined Zircaloy-2 / H Abe, A New // *Tubing, ASTM Spec. Tech. Publ.* - 2000 - 425-459 p.
8. Орро, П.И. Производство стальных тонкостенных труб: [Монография] / П.И. Орро, Я.Е. Осада. - М. Харьков: Металлургиздат, 1951. - 416 с.
9. Столетний, М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. - М: Металлургия, 1975. - 240 с.
10. Кекух, С.Н. Разработка и внедрение рациональных режимов деформации и параметров калибровки для производства труб из нержавеющей сталей и сплавов с улучшенным качеством поверхности на станах холодной прокатки: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. тех. наук: спец. 05.16.05. Машины и процессы обработки давлением / С.Н. Кекух - Днепропетровск, 1996. - 22 с.
11. Фролов, В.Ф. Холодная пыльгерная прокатка труб / В.Ф. Фролов В.Н. Данченко, Я.В. Фролов; - Днепропетровск: Пороги, 2005. - 255 с.
12. Пилипенко, С.В. Метод расчета величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации станов холодной пыльгерной прокатки труб / С.В. Пилипенко // *Журнал инженерных наук*. - 2015. - № 3. - С. В25-В29.
13. Пилипенко, С.В. Исследование влияния параметров процесса ХПТ на распределение обжатия толщины стенки трубы между прямым и обратным ходами клетки / С.В. Пилипенко // *Материалы IV научно-практической конференции «MagnitogorskRollingPractice»*. - Магнитогорск, 2019. - С. 95-97.

CALCULATION OF THE PASS SETTING OF THE CALIBER OF COLD ROLLING PIPE MILLS

Abstract

The aim of the work is to develop a method for calculating of the pass setting of the caliber of the cold rolling pipe mills. The method should be easily adaptable to changing rolling conditions and give correct results for the groove width distribution along the deformation cone with minimal expenditure on experimental rolling. The proposed method is based on the use of the well-known formula of E.E. Siege, which makes it possible to determine the linear displacement of the considered section along the deformation cone for a double pass of the stand. According to the proposed algorithm, the initial diameter of each control section is found. Using the ovalization coefficient, the required amount of flaring is calculated. The method has been tested in the rolling of pipes made of titanium alloys.

Keywords: Pipes, cold rolling, CHPT mill, pass setting, calculation method

Н.М.Потапов¹, С.Н.Кункин², Л.Б.Аксенов²
¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия, nicitanic@yandex.ru
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКЕ

Аннотация

В работе представлены результаты исследования процесса торцевой раскатки деталей из тонкостенных трубных заготовок коническим валком. Особенностью процесса является возможная потеря устойчивости формы заготовки, не позволяющая получать детали требуемой геометрии. На основе данных компьютерного моделирования систематизированы причины потери устойчивости трубных заготовок при раскатке, определены кинематические характеристики машины и геометрические параметры заготовки, влияющие на этот процесс.

Ключевые слова: торцевая раскатка, трубная заготовка, формоизменение, потеря устойчивости, компьютерное моделирование

Введение

Отличительной особенностью операций раскатки является локальный характер приложения деформирующего усилия к торцу обрабатываемой заготовки, что позволяет существенно снизить усилие деформирования. Процессы торцевой раскатки, позволяют формировать наружные, внутренние и торцевые поверхности полых и сплошных металлических заготовок. Низкая стоимость оснастки, незначительное время подготовки производства, использование оборудования относительно небольшой мощности дают возможность применять эти процессы в мелкосерийном производстве.

Цель исследования

На основе компьютерного моделирования процесса торцевой раскатки определить причины и условия возникновения динамической потери устойчивости трубных заготовок в виде волнового изменения поверхности ее деформируемой фланцевой части.

Метод исследования

В схеме торцевой раскатки (рис. 1) конический раскатной валок, с углом наклона α , имеет скорость поступательного движения вдоль оси заготовки V . В зависимости от типа раскатываемого фланца (наружного или внутреннего) для направления течения металла используется смещение вершины конического вала относительно оси вращения трубной заготовки на некоторую величину δ от оси заготовки. Раскатной валок машины может иметь собственный привод (приводной валок) и вращаться вокруг своей оси с угловой скоростью ω_2 , или получать вращательное движение от заготовки, имеющей угловую скорость вращения ω_1 , за счет сил трения на контакте (пассивный валок). Заготовка представляет собой отрезок тонкостенной трубы с размерами: D - внешний диаметр заготовки, S - толщина

стенки, H - высота выставленной части заготовки над торцевой поверхностью матрицы.

Проведенные многочисленные исследования процесса торцевой раскатки и его моделирование показали [1-3], что при этом процессе может происходить шесть возможных видов деформирования трубной заготовки. Три из них можно отнести к устойчивым, монотонно развивающимся процессам. Из этих трех два процесса отбортовки внутрь и наружу (рис. 2 а, б) хорошо прогнозируемы. Третий процесс (рис. 2, в), при котором происходит осадка трубы в зоне деформации, характеризуется течением металла в двух направлениях внутрь и наружу трубной заготовки. Этот процесс устойчивый, монотонный, но трудно предсказать в каком направлении будет происходить наиболее интенсивное течение металла.

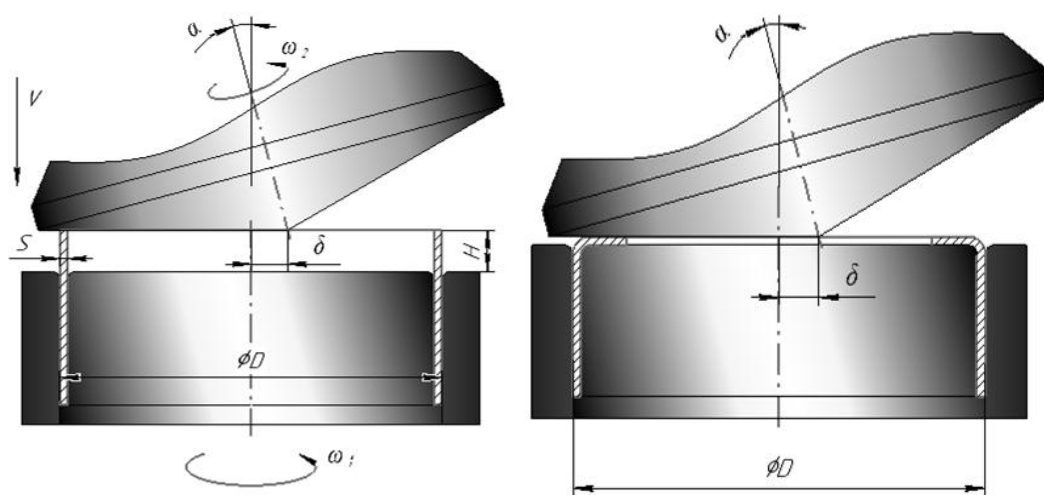


Рисунок 1 – Схема торцевой раскатки трубной заготовки при формировании внутреннего фланца

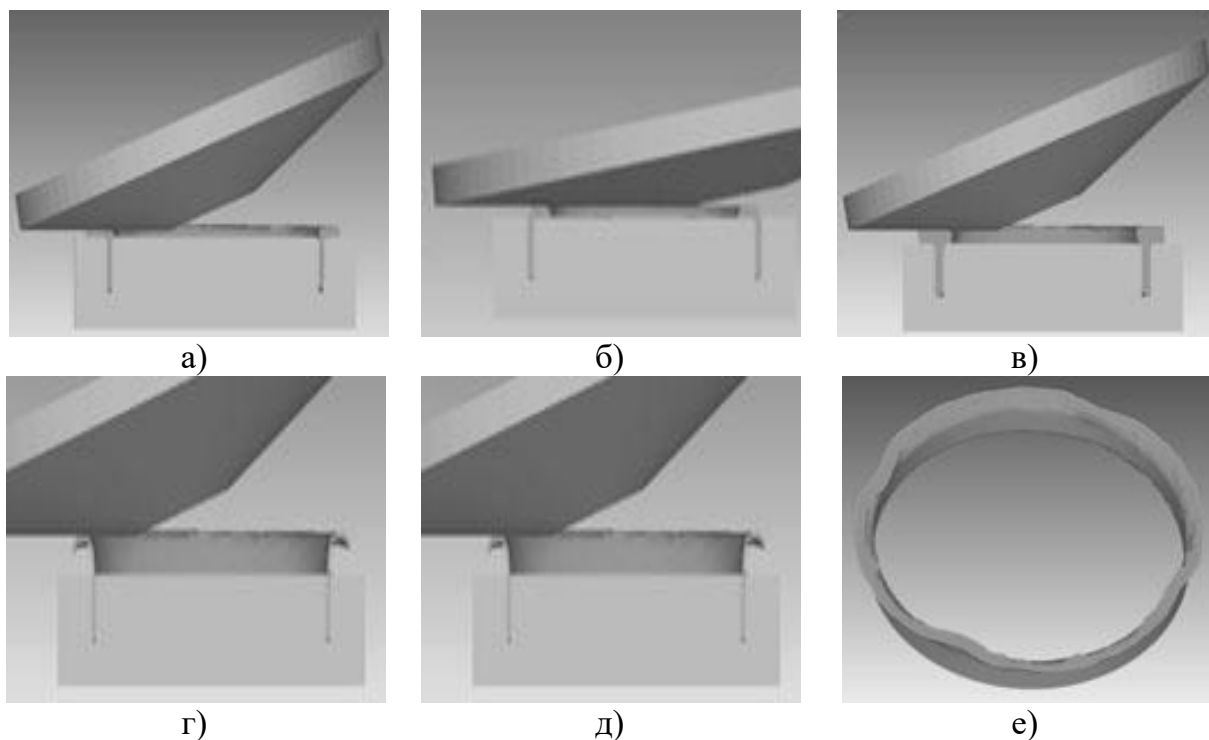


Рисунок 2 – Виды формоизменения трубной заготовки при торцевой раскатке

Еще три вида формоизменения заготовки (рис. 2 *z*, *d*, *e*) характеризуются тем, что место изгиба заготовки локализуется между матрицей и валком, и в зависимости от направления сил трения происходит загиб заготовки вместо отбортовки (рис. 2 *z* и *d*).

Вид формоизменения, представленный на рис. 2, *e*, показывает волновое формоизменение заготовки, как следствие динамической потери устойчивости. Условия возникновения волнового формоизменения трубных заготовок при раскатке требуют специального анализа.

Исходя из результатов исследования процессов торцевой раскатки на основе компьютерного моделирования [4-6], и с учетом кинематических особенностей процесса и локального деформирования заготовки, в работе выбрано моделирование с использованием вычислительного комплекса «Abaqus». Основные параметры процесса, принятые при моделировании процесса, приведены в табл. 1. Инструменты (раскатной валок, матрица и оправка) рассматривались как твердые недеформируемые тела. Материал заготовки (сталь ASI-1045) считался упруго пластическим с нелинейным упрочнением.

Таблица 1 – Параметры моделирования процесса торцевой раскатки

Параметр	Размерность	Значение
Диаметр заготовки D	мм	120
Толщина стенки заготовки S	мм	2
Длина выставленной части заготовки H	мм	20
Скорость поступательного движения вала V	мм/с	1
Смещение ролика δ	мм	30 (0,25D)
Угол наклона раскатного вала α	град	15
Частота вращения заготовки ω_1	рад/с	6,28
Частота вращения раскатного вала ω_2	рад/с	3,8
Коэффициент трения между валком и заготовкой μ	-	0,15
Материал заготовки	сталь	ASI-1045
Сетка конечных элементов	геометрия	Кубическая
Число элементов по толщине стенки заготовки	шт.	3
Общее число элементов	шт.	17 424
Коэффициент Пуассона материала заготовки	-	0,3
Модуль Юнга материала заготовки	ГПа	210
Плотность материала заготовки	кг/м ³	7850
Температура инструмента и заготовки	⁰ С	20

Вид сборки конечно-элементной модели процесса раскатки, состоящий из верхнего вала, заготовки и матрицы, представлен на Рис. 3 а. В результате моделирования была получена картина динамической потери устойчивости заготовки, отражающая волнообразное изменение ее формы (Рис. 3 б).

Потеря устойчивости заготовки в виде волнистости происходит на сжатых и сжато-растянутых участках фланцевой части трубной заготовки.

Формообразование внутреннего фланца происходит при сжатии металла в тангенциальном направлении и растяжении в радиальном. Аналогичное, но не тождественное явление происходит при глубокой вытяжке без прижима фланца [7-8]. Это явление также называют гофрообразованием или выпучиванием, и оно хорошо

изучено в процессах вытяжки, в том числе, применительно к анизотропному металлу [9-11].

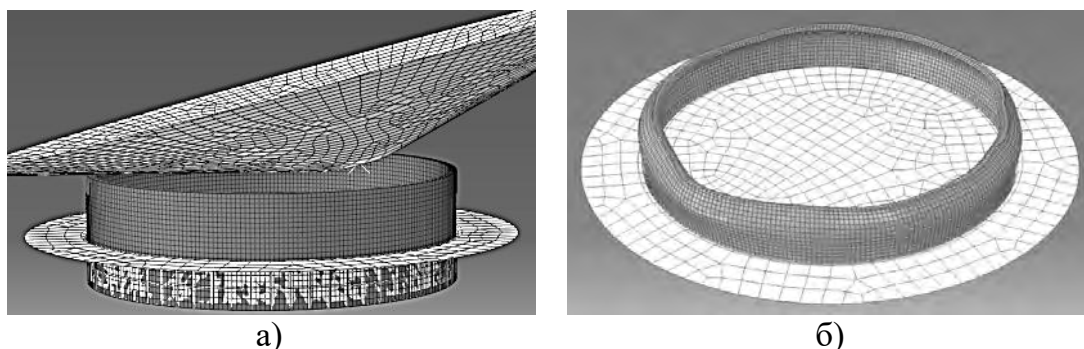


Рисунок 3 – Конечно-элементного моделирование процесса торцевой раскатки в расчетном комплексе «Abaqus»: а) исходная позиция инструмента и заготовки; б) волнообразное изменение формы заготовки

При раскатке на фланцевой части трубной заготовке образуются сжато-растянутые участки, которые располагаются вдоль криволинейных участков рабочего контура матрицы, не соприкасаются с оправкой и только на части поверхности фланца заготовки контактируют с раскатным валком. Из анализа напряженного состояния заготовки следует, что волнистость образуется в первую очередь в тех местах фланца, где действуют максимальные тангенциальные напряжения сжатия.

При раскатке динамика потери устойчивости заготовки связана с взаимодействием раскатного валка и заготовки, которое осуществляется по поверхности их локального контакта. На этой поверхности действуют вертикальные нормальные напряжения и касательные напряжения в тангенциальном направлении, обусловленные трением между раскатным валком и заготовкой. Именно эти напряжения определяют процесс формообразования фланца.

Касательные напряжения возникают из-за трения между валком и заготовкой, и появляются при несовпадении скоростей раскатного валка и заготовки на контактной поверхности. Изменять направление сил трения (касательных напряжений) в радиальном направлении на контактной поверхности можно величиной смещения вершины раскатного валка относительно оси заготовки δ . При этом знак δ будет определять направление течения металла внутрь или наружу заготовки для формирования внутреннего или наружного фланца.

На направление тангенциальной составляющей сил трения на контактной поверхности оказывает влияние направление скорости проскальзывания раскатного валка относительно заготовки.

Величина касательных напряжений пропорциональна величине нормальных напряжений при условии, что они меньше значения постоянной пластичности [12]. Таким образом, увеличение подачи (скорости поступательного движения) раскатного валка увеличивает эти напряжения. Это наиболее заметно в начальный момент раскатки при разгоне пассивного валка, обладающего значительной инерцией или высоким сопротивлением вращению.

Касательные напряжения от трения на контактной поверхности увеличивают тангенциальные напряжения сжатия металла и поэтому способствуют потере устойчивости заготовки. При прочих условиях, не вызывающих потери устойчивости

заготовки, разница тангенциальных скоростей точек на контактной поверхности валка и заготовки более 20% приводит к потере устойчивости заготовки.

Способами предотвращения потери устойчивости трубной заготовки в процессе торцевой раскатки являются снижение вертикального усилия деформирования в начальный момент раскатки путем уменьшения величин подачи раскатного валка, сил трения на контактной поверхности, инерционности пассивного валка, и применение приводного раскатного валка с возможностью изменения скорости его вращения.

Не решенной задачей является пока возможность прогнозирования количества волн по окружности фланца. Количество волн, помимо рассмотренных факторов, зависит от геометрии сечения заготовки. Для заготовок, имеющих большую толщину стенки, количество волн должно быть меньше, а при раскатке толстостенных заготовок волны могут вообще не образовываться.

Выводы

При торцевой раскатке внутренних фланцев из тонкостенных трубных заготовок наблюдается явление потери устойчивости заготовки в виде волнистости, которая происходит под действием сжимающих тангенциальных напряжений фланцевой части трубной заготовки.

Возникновению волновой потери устойчивости трубных заготовок способствуют напряжения, обусловленные трением на поверхности контакта раскатного валка и заготовки.

Способами снижения возможности потери устойчивости трубных заготовок в процессе торцевой раскатки являются уменьшение величины подачи раскатного валка, уменьшение трения на контактной поверхности, инерционности пассивного валка, и применение приводного раскатного валка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов Л.Б., Кункин С.Н., Елкин Н.М. Торцевая раскатка фланцевых деталей трубных соединений. «Металлообработка», научно-производственный журнал, №3 (63), 2011 г., стр. 31-36.

2. Кункин С.Н., Аксёнов Л.Б., Потапов Н.М. Системный анализ процесса холодной торцевой раскатки тонкостенных трубных заготовок. Современное машиностроение. Наука и образование. 2020. - №9, С. 425-439.

3. Семёнова Л.П., Семёнов А.А., Пасько А.Н.. Формообразование наружных утолщений на стенках трубчатых заготовок. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2010, №9. С. 33-37.

4. Krishnamurthy, B., Bylya, O., Muir, L., Conway, A., & Blackwell. On the specifics of modeling of rotary forging processes. *Computer Methods in Materials Science*, (2017). Vol. 17(1), pp.22-29.

5. Xinghui Han, Lin Hua. Investigation on contact parameters in cold rotary forging using a 3D FE method. *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 62, pp.1087-1106.

6. Rashid Asfandiyarov, Georgy I. Raab, Denis Aksenov. Analysis of the Stress-Strained State of Billets Processed by Rotary Forging with Special Shape of the Tool. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 2019, Vol. 31, pp.16-21.

7. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. Москва, Машиностроение, 1964. - 365с.

8. Кухарь В.Д., Яковлев С.С., Ремнев К.С. Влияние технологических параметров на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. Кузнечно-штамповочное производство, 2011, № 11, с. 3-10.

9. Banabic D., Barlat F., Cazacu O., Kuwabara T. Advances in anisotropy and formability // International Journal of Material Forming. 2010. Vol. 3.P.165-189.

10. Яковлев С.С., Калашников А.Е. Устойчивости в виде гофров кольцевой пластины из анизотропного материала // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2007. Вып. 2. С. 138-146.

11. Логинов Ю. Н. Моделирование деформированного состояния круглой пластины при вытяжке / Ю. Н. Логинов, Б. И. Каменецкий, Г. И. Студенок // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 26-28.

12. Леванов А.Н. Методика испытаний на контактное трение в процессах обработки металлов давлением. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2013, № 2. С.43-47.

N.M. Potapov¹, S.N. Kunkin², L.B. Aksenov²

¹АО "НИИЕФА", St. Petersburg, Russia, nicitanic@yandex.ru

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

DYNAMIC LOSS OF STABILITY OF THIN-WALLED TUBE BLANKS AT AXIAL ROTARY FORGING

Abstract

The paper presents the results of a study of the process of axial rotary forging of parts from thin-walled tube blanks with a conical roll. A feature of the process is the possible loss of stability of the shape of the blanks, which does not allow obtaining parts of the required geometry. On the basis of computer simulation data, the causes of the loss of stability of tube blanks during rotary forging were systematized, the kinematic characteristics of the machine and the geometric parameters of the tube blanks affecting this process were determined.

Keywords: rotary forging, tube blank, metal deformation, loss of stability, computer simulation

Е.Н. Сосенушкин¹, В.В. Белокопытов², Е.А. Яновская¹, А.С. Пономарева¹
¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, sen@stankin.ru
²Акционерное общество «Метровагонмаш», Мытищи, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИБКИ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ БАЛОК

Аннотация

В статье рассмотрена одна из краевых задач, возникающих при анализе операции гибки, в качестве метода решения использован подход, где дифференциальные уравнения равновесия решаются совместно с условием пластичности при известных допущениях. Оценено напряженное состояние металла заготовки, определены силовые параметры гибки концевых участков швеллера ограниченной длины.

Ключевые слова: гнутый швеллер, гибка, сила деформирования, изгибающий момент.

Введение

Балки изготавливают из гнутого швеллера [1] с размерами $h \times t \times s$ (h – ширина стенки; t – высота полок; s – толщина полок швеллера) по техническим условиям [2]. Материал балок сталь марки 09Г2Д [3] из группы конструкционных сталей для сварных конструкций, которая обладает повышенной коррозионной стойкостью против атмосферной коррозии. Для стыкования балок концевые участки швеллеров дополнительно обрабатываются с помощью операций гибки и обрезки [4].

Допущения

Для определения технологических параметров проведем теоретический анализ операции гибки концевого участка ограниченной длины балки в виде гнутого швеллера при следующих допущениях [5]:

1. Справедлива гипотеза плоских сечений, по которой устанавливают распределение тангенциальных деформаций по высоте сечения $\varepsilon_{\theta max} = \frac{s}{2R_c}$ (R_c – радиус срединной поверхности);
2. Поворот сечений, перпендикулярных к срединной поверхности, происходит относительно точек, расположенных на нейтральной поверхности напряжений, в конечный момент деформации (пренебрегаем зоной немонотонной деформации);
3. Упрочнение металла в условиях горячей деформации отсутствует.

Постановка и решение краевой задачи

Для оценки напряженного состояния участка заготовки воспользуемся общим подходом совместного решения уравнений равновесия с условием пластичности. Дифференциальные уравнения равновесия в частных производных в полярной системе координат [6]:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0; \quad (2)$$

где σ_ρ – радиальное напряжение; σ_θ – тангенциальное напряжение; σ_s – напряжение текучести; $\tau_{\rho\theta}$ – касательное напряжение.

При изгибе моментом касательные напряжения отсутствуют, а уравнение равновесия получит вид:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0. \quad (3)$$

В этом случае нормальные напряжения являются главными. Энергетическое условие пластичности возьмем в форме постоянства главного касательного напряжения:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = \pm \beta \sigma_s, \quad (4)$$

где знак «плюс» относится к зоне растяжения ($\rho > \rho_H$), а знак «минус» относится к зоне сжатия ($\rho < \rho_H$); β – коэффициент Лоде-Надаи; ρ – текущий радиус гибки; ρ_H – радиус нейтральной поверхности напряжений. При решении задачи воспользуемся граничными условиями для вычисления произвольной постоянной интегрирования: для зоны растяжения при $\rho = R_H$ $\sigma_\rho = 0$, тогда

$$\sigma_\rho = -\beta \sigma_s \ln \frac{R_H}{\rho}, \quad (5)$$

где R_H – наружный радиус гибки. Используя условие пластичности, найдем тангенциальное напряжение σ_θ :

$$\sigma_\theta = \beta \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_H}{\rho} \right). \quad (6)$$

Для зоны сжатия при $\rho = r_B$ $\sigma_\rho = 0$, тогда имеем:

$$\sigma_\rho = -\beta \sigma_s \ln \frac{\rho}{r_B}, \quad (7)$$

где r_B – внутренний радиус гибки.

Используя условие пластичности, найдем тангенциальное напряжение σ_θ :

$$\sigma_\theta = -\beta \sigma_s \left(1 + \ln \frac{\rho}{r_B} \right). \quad (8)$$

Величина внешнего изгибающего момента $M_{\text{н}}$ при пластическом изгибе с радиусом нейтральной поверхности, совпадающим с радиусом срединной поверхности

$$\rho_{\text{н}} = r_{\text{в}} + \frac{s}{2}.$$

$$\begin{aligned} M_{\text{н}} &= \beta \int_{\rho_{\text{н}}}^R \sigma_s \rho d\rho + \beta \int_{r_{\text{в}}}^{\rho_{\text{н}}} (-\sigma_s) \rho d\rho = \beta \sigma_s \frac{R_{\text{н}}^2 - \rho_{\text{н}}^2 - \rho_{\text{н}}^2 + r_{\text{в}}^2}{2} = \\ &= \beta \sigma_s \frac{s}{4} (R_{\text{н}} + \rho_{\text{н}} - \rho_{\text{н}} - r_{\text{в}}) = \beta \sigma_s \frac{s^2}{4}. \end{aligned} \quad (9)$$

Изгибающий момент определен на единицу длины пуансона. При изгибе моментом без упрочнения интегральная сумма по толщине заготовки элементарных сил, вызванных напряжениями σ_{θ} равна нулю ($\int_{r_{\text{в}}}^{R_{\text{н}}} \sigma_{\theta} d\rho = 0$). С учетом действия продольной силы, эта интегральная сумма должна быть равна продольной силе:

$$N = \int_{r_{\text{в}}}^{R_{\text{н}}} \sigma_{\theta} d\rho. \quad (10)$$

Поэтому доля толщины материала, в которой действуют напряжения, вызываемые продольной силой, больше половины толщины заготовки на некоторую величину C :

$$\rho_{\text{н}} = R_{\text{н}} - \frac{s}{2} - C. \quad (11)$$

Без учета влияния среднего главного напряжения можно положить $\beta = 1$. Тогда величина продольной силы выразится уравнением:

$$N = \int_{\rho_{\text{н}}}^{R_{\text{н}}} \sigma_s d\rho + \int_{r_{\text{в}}}^{\rho_{\text{н}}} (-\sigma_s) d\rho = \sigma_s (R_{\text{н}} - 2\rho_{\text{н}} + r_{\text{в}}) = 2\sigma_s C. \quad (12)$$

При осредненном напряжении $\sigma_{\theta} \approx \sigma_{\theta\text{ср}}$:

$$N = \sigma_{\theta\text{ср}} s. \quad (13)$$

А радиус нейтральной поверхности:

$$\rho_{\text{н}} = \frac{R_{\text{н}} + r_{\text{в}}}{2} - \frac{\sigma_{\theta\text{ср}} s}{2\sigma_s} - C. \quad (14)$$

В рассматриваемом сечении балки сумма моментов, действующих на деформируемый участок, должна быть равна 0, тогда имеем равенство:

$$M_{\text{и}} + M_N = M_{\sigma}, \quad (15)$$

где M_N – момент, создаваемый продольной силой N ;
 M_{σ} – момент, вызванный напряжением σ_{θ} .

$$\begin{aligned} M_{\sigma} &= \int_{r_{\text{н}}}^{R_{\text{н}}} \sigma_s \rho d\rho + \int_{r_{\text{н}}}^{\rho_{\text{н}}} (-\sigma_s) \rho d\rho = \frac{\sigma_s}{2} (R_{\text{н}}^2 - 2\rho_{\text{н}}^2 + r_{\text{в}}^2) = \\ &= \frac{\sigma_s}{4} [s^2 + 4C(R_{\text{н}} + r_{\text{в}} - C)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Величина момента M_N относительно центра кривизны срединной поверхности заготовки:

$$M_N = N \frac{R_{\text{н}} + r_{\text{в}}}{2} = \sigma_s C (R_{\text{н}} + r_{\text{в}}). \quad (17)$$

С учетом зависимостей (16) и (17) находим величину внешнего изгибающего момента:

$$M_{\text{и}} = \sigma_s \left(\frac{s^2}{4} - C^2 \right) = \sigma_s \left(\frac{s^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_s^2} \right). \quad (18)$$

Анализ уравнения (18) позволяет установить, что при $N = 0$ оно совпадает с формулой (9), а при $N = \sigma_s s$ внешний изгибающий момент $M_{\text{и}} = 0$, а $C = \frac{s}{2}$, т.е. нейтральная поверхность совпадет с внутренней поверхностью изгибаемого участка балки. При наличии растягивающей продольной силы, действующей на изгибаемую заготовку, для соблюдения условий равновесия необходимо, чтобы на внутренней поверхности заготовки были приложены сжимающие напряжения равные контактному давлению на пуансоне. Условие равновесия при этом [6]:

$$2\sigma_{\theta\text{ср}} s \frac{d\varphi}{2} = \sigma_{\text{н}} r_{\text{в}} d\varphi, \quad (19)$$

где $d\varphi$ – центральный угол между секущими радиусами при выделении в очаге деформации элементарного объема изгибаемой полки балки, по нормали к которым действует растягивающее напряжение $\sigma_{\theta\text{ср}}$, вызванное продольной силой N . Из (19) находим $\sigma_{\text{н}}$:

$$\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\theta\text{ср}} \frac{s}{r_{\text{в}}}. \quad (20)$$

В этом случае для зоны сжатия нужно принять другое граничное условие при $\rho = r_{\text{в}}$ $\sigma_{\rho} = -\sigma_{\text{н}}$ и пересчитать величину радиального напряжения:

$$\sigma_{\rho} = -\beta\sigma_s \ln \frac{\rho}{r_B} - \sigma_{\theta_{\text{ср}}} \frac{s}{r_B}. \quad (21)$$

Приведенные зависимости, полученные авторами [9], справедливы для гибки в условиях горячей деформации при $\frac{r_B}{s} > 1$. Схема гибки концевой участка гнutoго швеллера (рис. 1) аналогична двухугловой гибке П-образных деталей. Зазор между пуансоном и матрицей назначен равным толщине полок швеллера.

В соответствии со схемой перемещения материальных точек при осуществлении операции гибки концевой участка балки (рис. 2) во время движения пуансона вниз на этапе рабочего хода происходит частичное спрямление имеющегося радиуса швеллера, а затем изгиб на другую величину радиуса с уменьшением размера средней полки швеллера, при этом боковые полки, занимая новое вертикальное положение, располагаются в зазоре между пуансоном и матрицей. Точки образующей внутренней поверхности балки переходят на контактную поверхность пуансона по нормальям к его образующей. Точки внешней поверхности балки без изменения толщины полок швеллера занимают новые положения, соответствующие внешнему контуру обрабатываемого концевой элементу. Изменение кривизны полок балки при спрямлении и изгибе на новый радиус требует затратить дополнительную работу на деформирование.

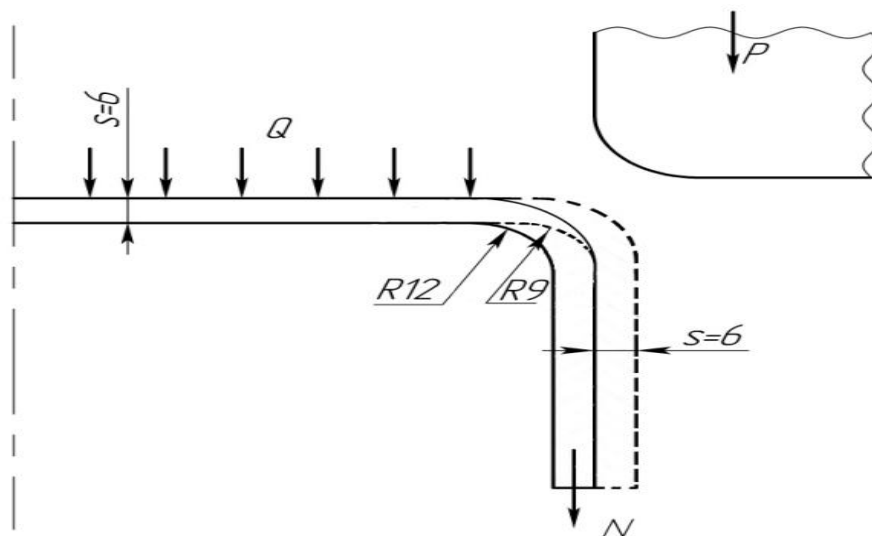


Рисунок 1 – Схема смещения материальных точек образующих балки внешней и внутренней в процессе гибки (исходное положение показано пунктирной линией):
 P – сила гибки; Q – сила прижима; N – продольная сила;
 s – толщина полок балки

Без большой погрешности учтем эту дополнительную работу увеличением продольных напряжений, как это предложено в работе [6], т.е. общее приращение радиального напряжения равно:

$$\Delta\sigma_{\rho} = \frac{s\sigma_s}{2R_{\rho}}. \quad (22)$$

С учетом (22) уравнение (21) можно представить в виде:

$$\sigma_{\rho} = -\beta\sigma_s \ln \frac{\rho}{r_B} - \sigma_{\theta_{cp}} \frac{s}{r_B} - \sigma_s \frac{s}{2R_{\rho}}. \quad (23)$$

Внешний изгибающий момент, определяемый по уравнению (9) выразится:

$$M_{\text{н}} = xR, \quad (24)$$

где x – расстояние между точками касания заготовки с пуансоном и матрицей, т.е. между точками приложения реакций R , выражается через геометрические параметры штампа. Зависимость между силой гибки P и реакциями R [5]:

$$P = \frac{m \left(\cos \frac{\alpha}{2} + \mu \sin \frac{\alpha}{2} \right) \cos \frac{\alpha}{2}}{3(r_m + r_n + 1) \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \right)} bs\sigma_b, \quad (25)$$

где m – относительный изгибающий момент ($m=2,5$ при гибке в условиях горячей деформации); σ_b – предел прочности штампуемого металла μ – коэффициент трения для черных металлов в условиях полугорячей деформации $\mu=0,3 \dots 0,5$.

В конце процесса гибки расстояние между реакциями $x \approx 0$, т.е. наибольшая сила гибки будет определяться пластическим сдвигом [7]:

$$P = 2F\tau \approx F\sigma_b, \quad (26)$$

где F – площадь сечения очага деформации изгибаемого швеллера, ограниченная криволинейным треугольником ABC (см. рис. 1). Проведем расчет технологических параметров гибки концевых участков балки на конкретном примере. Чертеж балки представлен на рис. 2, где левый конец обрабатывается с двух сторон, а правый концевой участок деформируется по схеме односторонней гибки [8]. Технологический процесс реализуется с помощью универсально-переналаживаемого штампа [9].

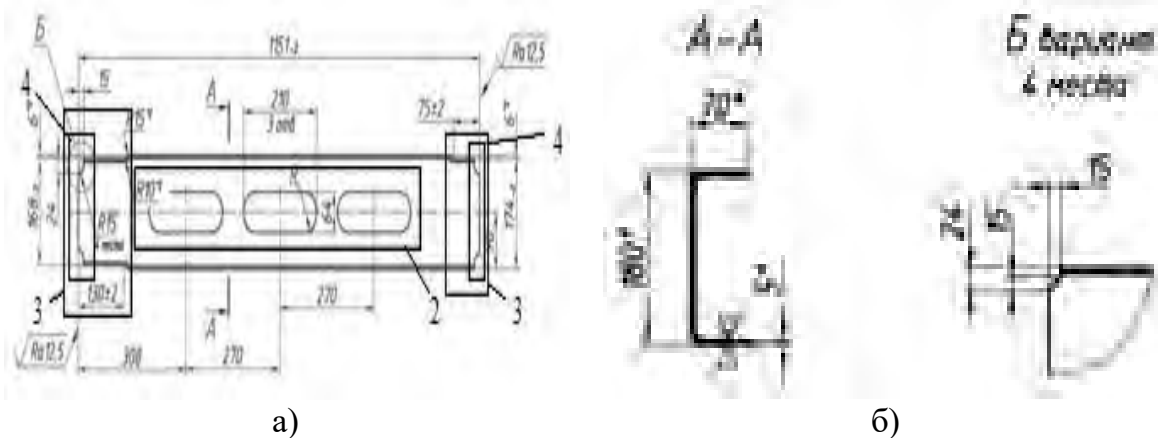


Рисунок 2 – Чертеж балки с последовательностью операций (а); сечения балки (б); 2 – пробивка овальных отверстий; 3 – гибка концевых участков; 4 – обрезка припуска

Обсуждение результатов

Для определения силовых параметров гибки воспользуемся уравнениями (9) и (25). Связь изгибающего момента с сопротивлением деформированию прослеживается на рис. 3. Влияние толщины швеллера на силу деформирования показано на рис. 4 а, характер изменения силы линейный. Сила деформирования возрастает с увеличением толщины полок швеллера, также она зависит от значения радиуса закругления пуансона (рис. 4 б), с увеличением которого сила гибки убывает. Характер изменения нелинейный.

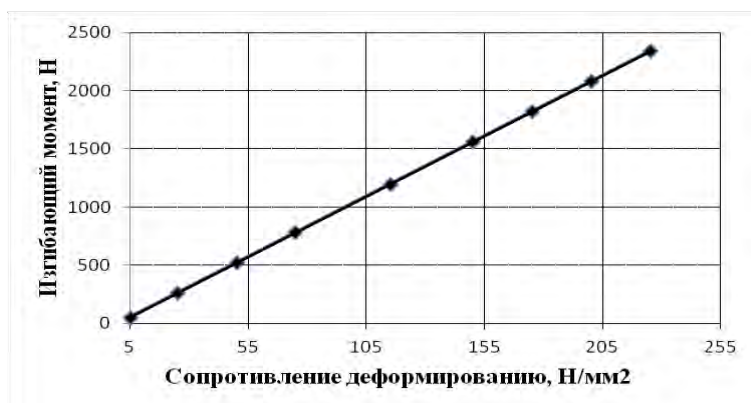
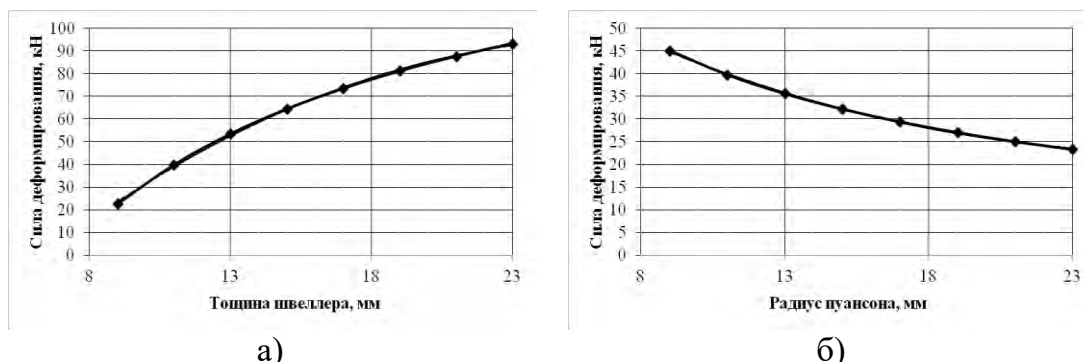


Рисунок 3 – Влияние сопротивления деформированию на изгибающий момент



а)

б)

Рисунок 4 – Зависимость силы деформирования от геометрических параметров: а) от толщины швеллера; б) от радиуса закругления пуансона

Заключение

Проведенный анализ операции гибки концевых участков балки ограниченной длины в условиях горячей деформации позволил оценить напряженное состояние металла заготовки, рассчитать необходимую силу деформирования, зависящую от геометрических параметров заготовки и инструмента, а также определить изгибающий момент.

Отличительной особенностью исследуемой операции гибки является то, что положение полок швеллера не изменяется в процессе гибки и угол 90° между стенкой швеллера и полками остается также неизменным. Уменьшается размер стенки до значения $(h-2s)$, увеличивается радиус между полками и стенкой со значения 9 мм до 12 мм. При этом очаг деформации локализуется вблизи закругленной кромки пуансона, образуя в плане криволинейный треугольник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8278-83 «Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент». - Москва: Изд-во стандартов, 1983. - 16 с.
2. ГОСТ 11474-76 «Профили стальные гнутые. Технические условия». - Москва: Изд-во стандартов, 1978. - 7 с.
3. ГОСТ 19281-2014 «Прокат повышенной прочности. Общие технические условия». - Москва: Стандартинформ, 2015. - 47 с.
4. Ильин, Л.Н. Технология листовой штамповки: учебник для вузов / Л.Н. Ильин, И.Е. Семенов. - М.: Дрофа, 2009. - 475 с.
5. Горбунов, М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. - Москва: Машиностроение, 1981. - 224 с.
6. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. - Москва: Машиностроение, 1977. - 423 с.
7. Мошнин, Е.Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах / Е.Н. Мошнин. - Москва: Машгиз, 1959. - 360 с.
8. Патент (РФ-RU) 2746193 МПК В21К 1/76 (2006/01), В21D 7/022 (2006/01) Штамп для обработки концевых участков балки П-образного сечения / Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московской государственный технологический университет «СТАНКИН» № 2020122178; Заявлено 03.07.2020; Оpubл. 08.04.2021. Бюл. №10.
9. Патент (РФ-RU) 2746190 МПК В21J 13/02 (2006/01), В21D 37/00 (2006/01) Способ обработки концевых участков балки С-образного сечения/ Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московской государственный технологический университет «СТАНКИН» № 2020122169; Заявлено 03.07.2020; Оpubл. 08.04.2021. Бюл. №10.

E.N. Sosenushkin¹, V.V. Belokopytov², E.A. Yanovskaya¹, A.S. Ponomareva¹
¹Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia, sen@stankin.ru
²Joint Stock Company "Metrovagonmash", Mytishchi, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF STRESS STATE AND FORCE PARAMETERS OF BENDING END SECTIONS OF BEAMS

Abstract

The article considers one of the boundary value problems that arise in the analysis of the bending operation, as a solution method, an approach is used where differential equilibrium equations are solved together with the plasticity condition under known assumptions. The stress state of the workpiece metal is estimated, the power parameters of bending the end sections of a channel of limited length are determined.

Keywords: bent channel, bending, deformation force, bending moment.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЮЛЬДЕНА-ПАППУША В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Аннотация

В работе рассмотрено применение метода Гюльдена-Паппуша с элементами графоаналитической аппроксимации для определения размеров и формы заготовки для детали сложной формы с фигурным дном.

Ключевые слова: листовая штамповка, исходная заготовка, технологические расчеты.

Введение

Благодаря технологии листовой штамповки можно изготавливать различные тонкостенные детали. Для типовых деталей, таких как тела вращения, симметричные коробочки, детали с плоским, конусным или сферическим дном и многих других, существуют разнообразные методики технологических расчетов, позволяющие определять формы и размеры исходных заготовок и промежуточных полуфабрикатов с минимизацией количества отходов металла [1]. Однако существует большой класс деталей, для которых нет выведенных методик расчета, а именно – сложные детали, у которых есть только одна ось симметрии или оси симметрии отсутствуют вовсе.

В большинстве случаев для определения размеров исходных заготовок используются автоматизированные программные комплексы, которые позволяют в цифровом виде осуществить развертку детали и подобрать наиболее подходящий раскрой исходного материала. Однако применение подобных компьютерных программ вносит погрешность в технологические расчеты [2]. Наибольшую точность технологических расчетов демонстрирует аналитический метод пооперационных расчетов, описанный в работе [2] и метод Гюльдена-Паппуша, который можно адаптировать не только для тел вращения, но и для деталей другой формы [3].

Цель данной работы – показать применимость метода Гюльдена-Паппуша для определения формы и размеров исходной заготовки для детали сложной формы и рельефным дном.

Методы

Для достижения поставленной цели использовались современные САПР программы и проверенные аналитические методики, используемые в технологических расчетах листовой штамповки: метод Гюльдена-Паппуша, графоаналитический метод, аппроксимация данных.

При применении классического метода Гюльдена-Паппуша [1] расчеты ведутся по срединному сечению образующего профиля тела вращения, которое разбивается на простые прямолинейные и криволинейные участки. Затем определяются центры тяжести полученных участков и их расстояние от оси детали. Затем по равенству произведения длины, образующей на путь ее центра тяжести, находится площадь поверхностей тела вращения и радиус исходной заготовки:

$$r = \sqrt{2\sum l_i c_i} \quad (1)$$

где r – радиус исходной заготовки, мм; l_i – длина образующей (длина прямого участка или дуги окружности на радиусе закругления), мм; c_i – расстояние от оси до центра тяжести отрезка, мм.

В классическом методе, который используется только для тел вращения, необходимо и достаточно проводить расчет по одному сечению.

При применении расширенного метода [3] принцип расчета остается прежним, однако деталь, которая не является телом вращения, разбивается на несколько сечений с определенным шагом, а полученные радиусы r_i позволяют определить координаты точек периметра заготовки некруглой формы.

Результаты и обсуждение

В работе [3] рассматривалось применение метода Гюльдена-Паппуша для коробчатой детали с плоским дном, имеющей две оси симметрии. В данной работе будет рассмотрено применение метода Гюльдена-Паппуша для детали более сложной формы, которая имеет только одну ось симметрии и фигурное дно. На рис. 1 и 2 приведены эскиз детали сложной формы и трехмерная модель детали соответственно.

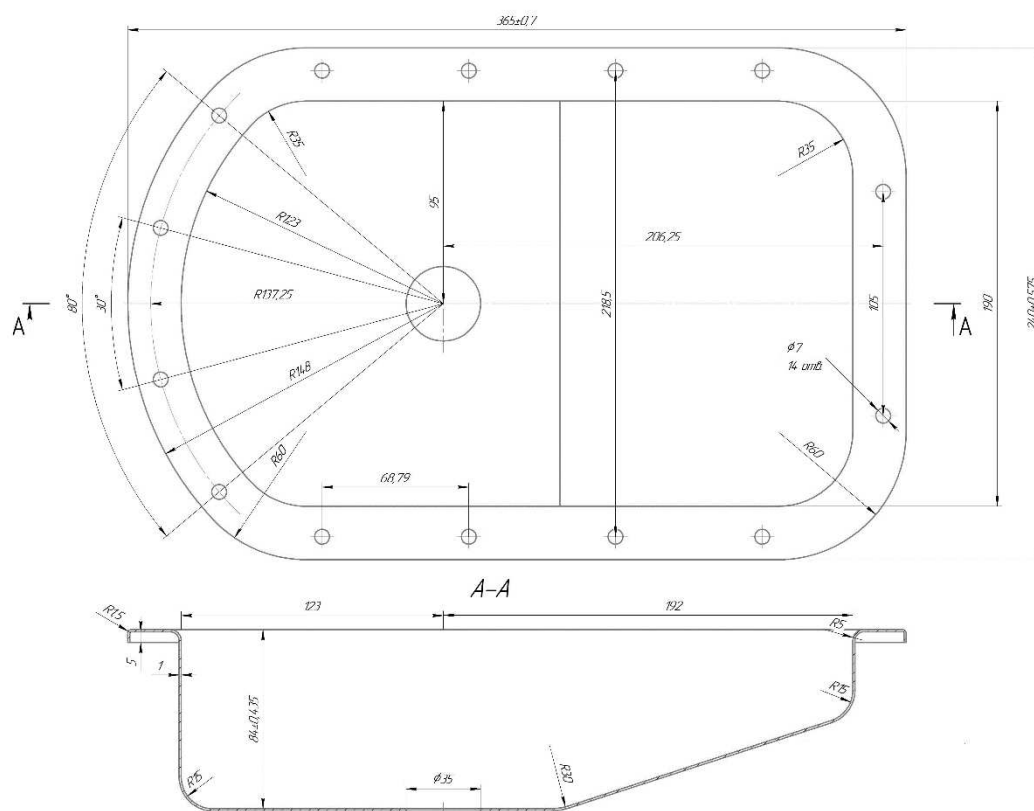


Рисунок 1 – Эскиз детали «Поддон»

Для того, чтобы адаптировать классический и расширенный методы Гюльдена-Паппуша для определения формы и размеров исходной заготовки указанной детали сложной формы, расположим деталь в полярных координатах $(r; \varphi)$ и осуществим разбивку на характерные сечения с шагом в 15 градусов. Рассматриваемая деталь «Поддон» имеет одну ось симметрии, а потому разбивке на сечения подвергается

половина детали (рис. 3). На рис. 4 показан пример разбивки характерного сечения при $\varphi = 15^\circ$



Рисунок 2 – Трехмерная модель детали «Поддон»

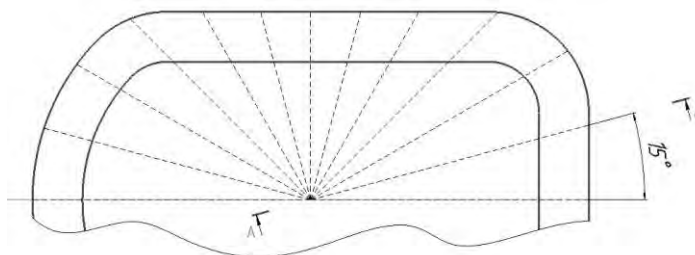


Рисунок 3 – Эскиз детали в полярных координатах (вид сверху)

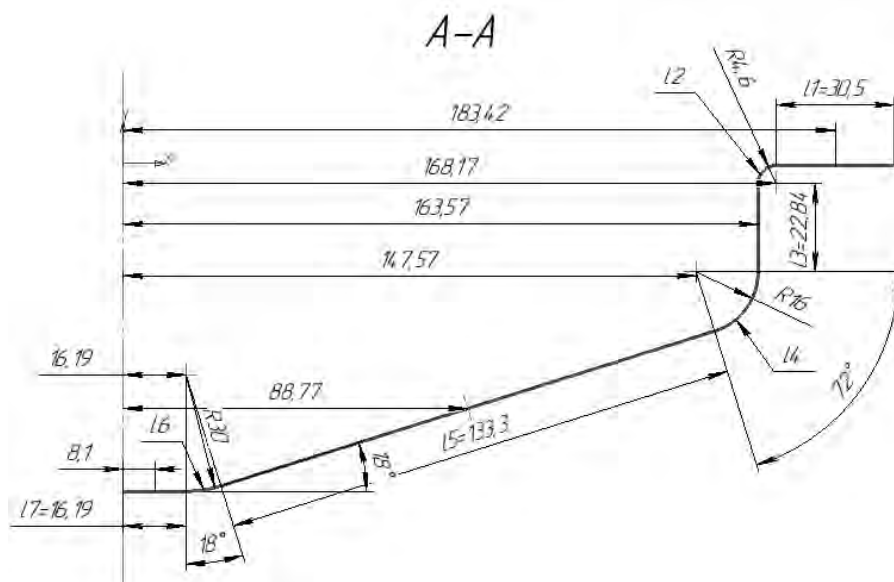


Рисунок 4 – Пример разбивки

Расчеты для определения координаты точки периметра заготовки по методу Гюльдена-Паппуша для сечения под углом $\varphi = 15^\circ$ представлены в таблице 1. Результаты определения координат точек периметра заготовки в соответствии с расположением сечений представлены в таблице 2. По полученным координатам строился контур предполагаемой заготовки (рис. 5).

Чтобы оценить точность полученной заготовки, необходимо получить объем детали «Поддон» с припуском и объем полученной заготовки. Для этих целей была использована программа КОМПАС-3D и встроенная функция расчета МЦХ трехмерных моделей. Проверка показала, что объем детали с припуском составляет $149596,1 \text{ мм}^3$, а объем заготовки – $144594,3 \text{ мм}^3$, т.е. недостаток объема составил 3,3%.

Для того чтобы уменьшить погрешность расчета и упростить форму заготовки, необходимо аппроксимировать контур заготовки, показанный на рис. 5, который состоит из большого количества различных криволинейных участков. Подобная практика распространена во многих графоаналитических методах расчета формы и

размеров исходной заготовки, например, при развертке квадратных и прямоугольных коробочек [1].

Таблица 1 – Расчеты для сечения под углом 15°

№	l_i	R_i	φ_i	Выпуклый/ вогнутый	A_i	B_i	c_i	$l_i c_i$
l_1	30,5	-	Гориз.	-	-	-	183,42	5594,31
l_2	7,23	4,6	90°	Вогнутый	2,93	168,17	165,24	1194,69
l_3	27,84	-	Верт.	-	-	-	163,57	4553,79
l_4	20,27	16	72° от гориз.	Выпуклый	12,11	147,57	159,68	3236,71
l_5	133,3	-	18° от гориз.	-	-	-	88,7	11823,71
l_6	9,12	30	18° от верт.	Выпуклый	6,81	16,19	23	209,76
l_7	16,19	-	Гориз.	-	-	-	8,1	131,14
$r = \sqrt{2\sum l_i c_i} = 231,275$					$\sum l_i c_i = 26744,11$			

Таблица 2– Результаты расчетов

Угол сечения, °	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
r , мм	224,715	231,275	239,385	221,370	195,605	183,135	180,59	183,775	199,63	228,505	243,24	247,83	249,415

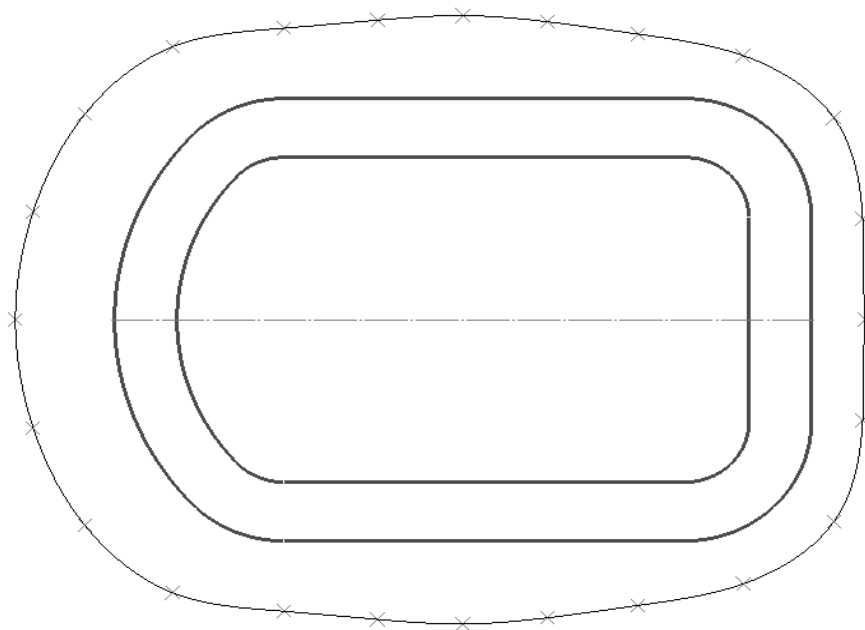


Рисунок 5 – Контур предполагаемой заготовки

Аппроксимированный контур заготовки представляет собой фигуру, близкую к овалу, которую можно очертить с помощью четырех радиусов и одного прямолинейного участка (рис. 6). Форма заготовки таким образом упрощается, а также упрощаются последующие технологические расчеты, например, определение исполнительных размеров рабочих инструментов.

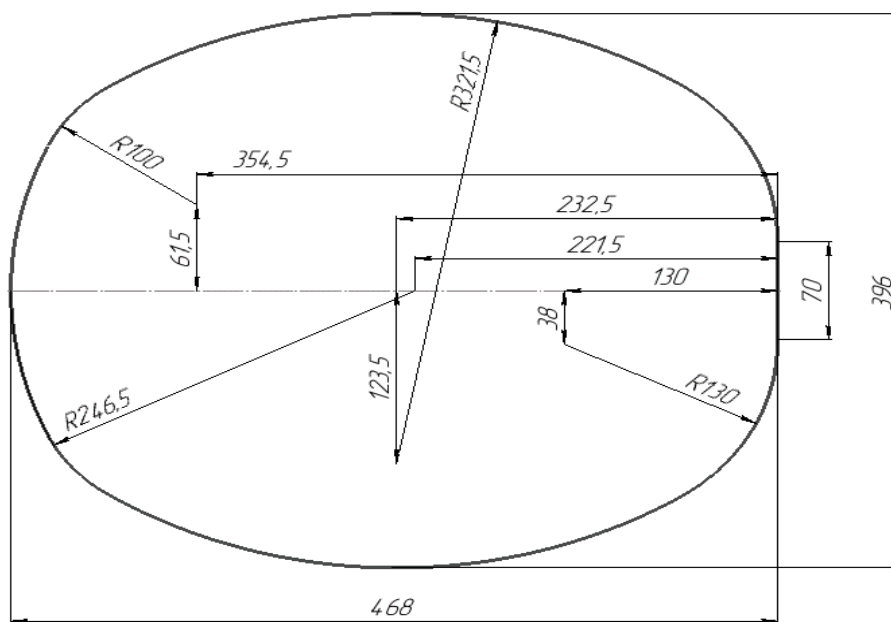


Рисунок 6 – Контур аппроксимированной заготовки

Расчет МЦХ показал, что объем аппроксимированной заготовки составляет 154 083,98 мм³, т.е. избыток объема составляет 0,36%. Таким образом была получена заготовка достаточного объема и относительно простой формы. Для того, чтобы оценить, насколько аппроксимированная форма заготовки подходит для изготовления детали, было осуществлено компьютерное моделирование процесса вытяжки детали «Поддон» из рассчитанной заготовки. Результаты моделирования представлены на рисунке 7.

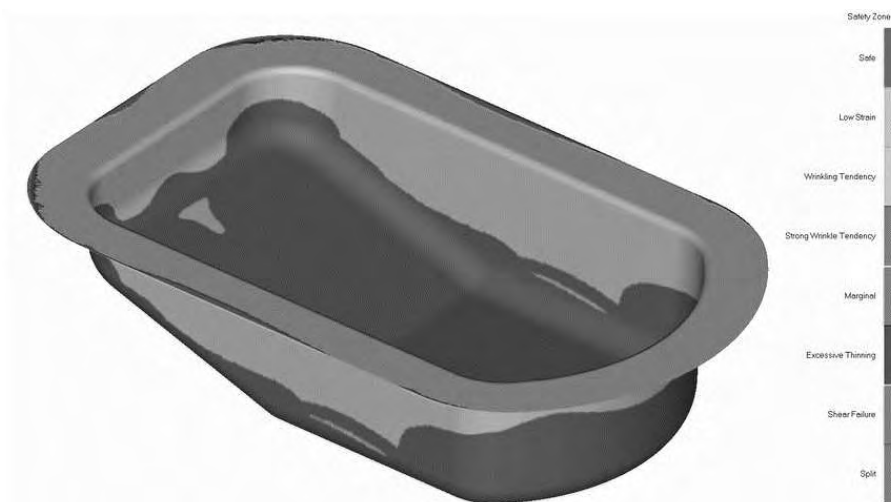


Рисунок 7 – Результаты компьютерного моделирования процесса вытяжки детали «Поддон»

Моделирование показало следующее, что деталь «Поддон» можно получить из рассчитанной заготовки, и при этом не прогнозируются дефекты формы. Оптимальность размеров и формы исходной заготовки можно оценить по форме фланца вытянутой детали, который не имеет излишних выступов или наоборот сужений. Фланец детали имеет неровный край, что связано скорее с самой

технологией изготовления детали [4], и в дальнейшем будет исправляться обрезкой припуска.

Таким образом, применение предлагаемого метода позволило получить заготовку достаточного объема и оптимальной формы, для последующего изготовления детали «Поддон».

Заключение

В данной работе приведена методика, которая позволяет определять форму и размеры исходной заготовки для деталей сложной формы. Методика отличается относительной простотой, не требует применения специальных программ и позволяет получать результаты с достаточной для инженерных расчетов точностью. Результаты работы могут применяться как в образовательной деятельности, так и на промышленных предприятиях, специализирующихся на производстве сложных по форме деталей методом листовой штамповки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. - 520 с.
2. Арсентьева К.С. Точность способов определения размеров заготовки для листовых деталей типа тел вращения / К.С. Арсентьева, Б.Г. Носков, С.А. Нодзель, А.Е. Сидоров, М.А. Савельев, Е.С. Ефимов // Модели и методы развития технологий машиностроений в условиях цифровизации экономики России: сборник научных трудов / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.А. Поповича. - СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. - С. 170-174.
3. Арсентьева К.С. Применение метода Гюльдена-Паппуша для определения заготовок для деталей коробчатой формы / К.С. Арсентьева, А.Е. Сидоров, Е.В. Сидорова // Инновационные идеи в машиностроении : сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, 24-26 мая 2022 г. / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Поповича, д-ра техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. - СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.- С. 415-418.
4. Арсентьева К.С. Складкообразование при импульсной и квазистатической вытяжке-формовке тонколистовых деталей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. - №1. - с.190-199.

A.A. Stepanov, X.S. Arsenyeva
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, stndr.ltd@gmail.com

APPLICATION OF GULDEN-PAPPUSH METHOD IN TECHNOLOGICAL CALCULATIONS FOR COMPLEX-SHAPED PARTS

Abstract

The paper considers the applying of the Gulden-Pappusch method for determining the dimensions and shape of a workpiece for a complex-shaped part with a figured bottom.

Keywords: sheet metal forming, initial blank, technological calculations.

П.А. Кузнецов, К.В. Лепетан, Д.Р. Кравцов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, pa-kuznetsov@ya.ru,
lepetan_k@mail.ru, kravtsov.dr@gmail.com

АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ПОРОШКОВ

Аннотация

В работе представлен анализ формоизменения эластичных матриц при эластостатическом прессовании (ЭСП) изделий конической формы из порошковых материалов. Рассмотрены основные схемы ЭСП – квазиизостатическое, радиально-осевое и радиальное прессование. Сделана экспериментальная оценка искажения исходной конической формы эластичной матрицы при прессовании. Компьютерное моделирование процесса в программе DEFORM показало возможности учета формоизменения эластичных матриц при проектировании пресс-форм для ЭСП изделий сложной формы, а, следовательно, повышение точности прессуемых изделий.

Ключевые слова: полиуретан, порошок, пресс-формы, моделирование.

Введение

Применение подвижных сред в качестве деформирующих существенно расширяет технологические возможности процессов прессования порошковых материалов. Основное преимущество жидкостей и газов — возможность создания в формообразующей среде равномерного давления, воздействующего на весь объем прессуемого порошка. Однако, специализированное оборудование – гидро- и газостаты – сложно в изготовлении и эксплуатации, дорогостоящее, а, следовательно, его использование должно быть экономически обосновано. [1, 2]. Применение в качестве подвижной среды полиуретанов и резин снижает затраты на производство изделий из порошков, и они могут быть использованы на универсальном оборудовании – гидравлических прессах [3, 4, 5].

На рисунке 1 показаны основные принципиальные схемы эластостатического прессования (ЭСП) – квазиизостатическое, радиально–осевое и радиальное.

Методы

Результаты измерения искажения формы полиуретановой матрицы можно получить путем измерения размеров спрессованного образца, который в свою очередь получают прессованием медного порошка ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) в опытной оснастке, схема которой представлена на рисунке 2, а.

В жесткий контейнер 1 с опорой 2 помещается эластичная матрица 4 с предварительно взвешенным порошком 5. В контейнер 1 на матрицу 4 устанавливается пуансон 3, затем вся конструкция помещается в рабочую зону гидравлического пресса с номинальным усилием 1,25 МН. Полученная прессовка представлена на рисунке 2, б.

Измерение профиля поверхности полученной прессовки проводится следующим образом: образец 1 зажимается во вращающихся центрах 5,

установленных в переднюю 6 и заднюю бабку 7 токарного станка (рис. 3). На суппорте 4 при помощи стойки 3 закрепляется стрелочный индикатор 2. За точку отсчета принимается малый диаметр конуса, наконечник индикатора 2 устанавливается в точку отсчета, и на индикаторе 2 выставляется ноль. Путем перемещения суппорта 4 вдоль оси образца 1 (с шагом 0,5 мм) замеряется отклонение точек на его поверхности.

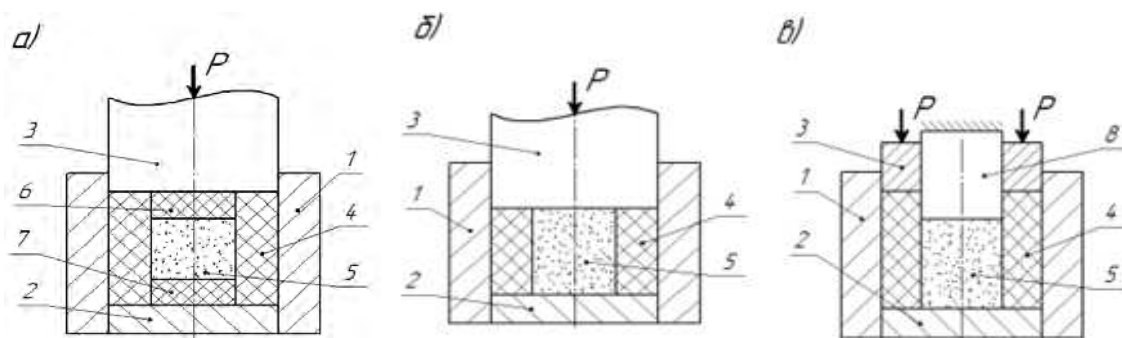


Рисунок 1 – Принципиальные схемы ЭСП: а – квазиизостатическое; б – радиально–осевое ЭСП; в – радиальное ЭСП; 1 – жесткий контейнер, 2 – опора, 3 – пуансон, 4 – эластичная матрица, 5 – порошок, 6 – верхняя эластичная пробка, 7 – нижняя эластичная пробка, 8 – упор

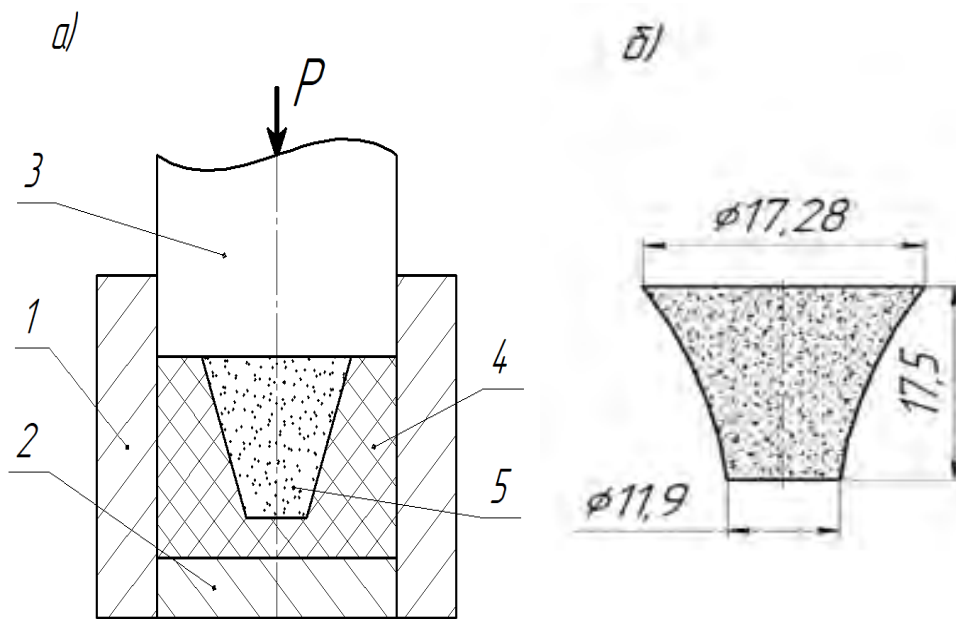


Рисунок 2 – Принципиальная схема опытной оснастки для ЭСП конусных образцов (а): 1 – жесткий контейнер, 2 – опора, 3 – пуансон, 4 – эластичная матрица, 5 – порошок; эскиз полученного конусного образца (б)

Результаты

Результаты измерения диаметральных размеров конусного образца по высоте представлены на рисунке 4.

На графике сплошной толстой прямой линией показана образующая внутренней конусной полости ненагруженной эластичной матрицы. Четыре другие

линии отражают результаты измерений профиля боковой поверхности спрессованного конусного образца.

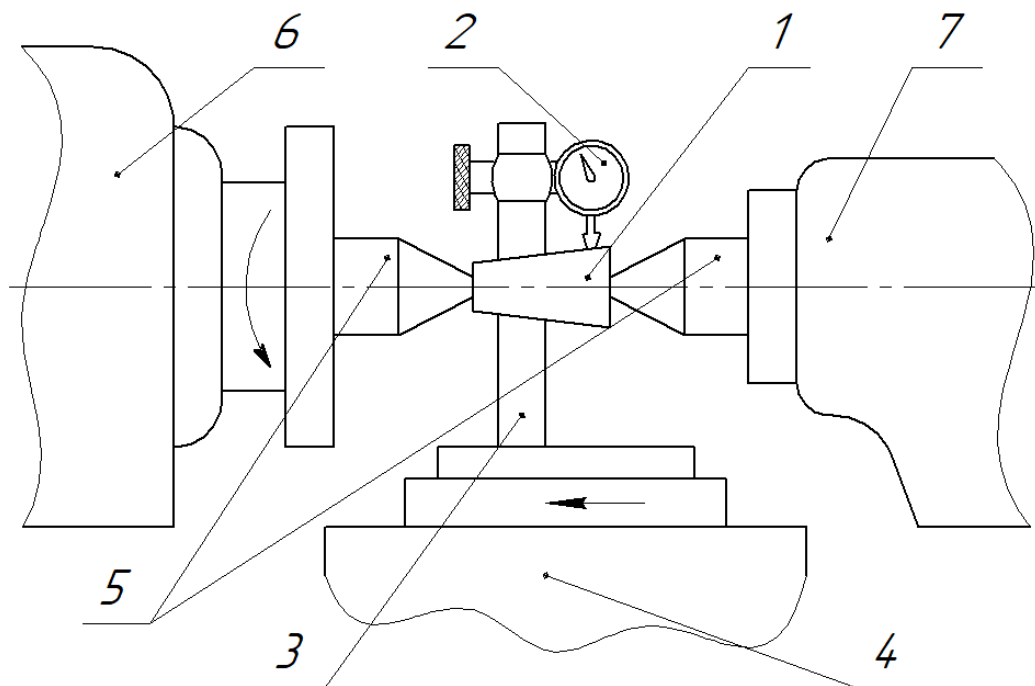


Рисунок 3 – Принципиальная схема измерения погрешности формы конусных образцов полученных ЭСП: 1 – образец, 2 – индикатор, 3 – стойка, 4 – суппорт, 5 – вращающиеся центры, 6 – передняя бабка, 7 – задняя бабка

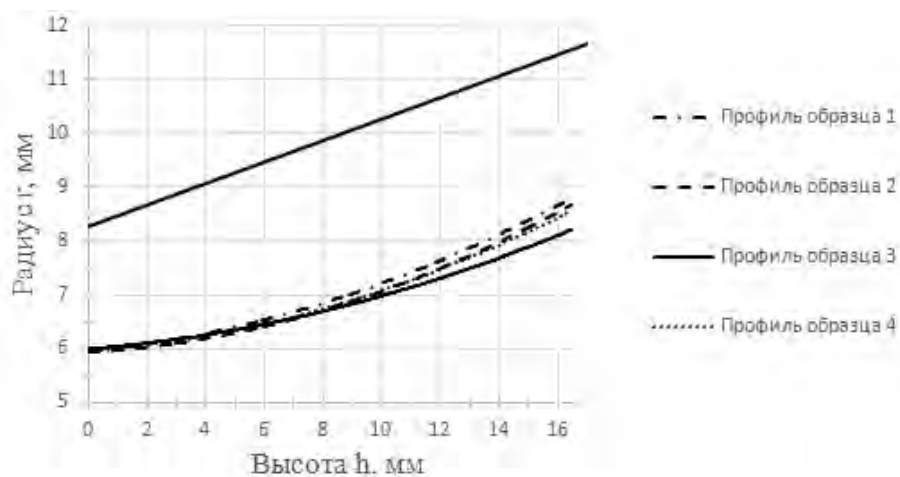


Рисунок 4 – Результаты измерения профиля конусного образца, полученного радиально-осевым прессованием (давление прессования 350 МПа).

Используя результаты измерений, можно рассчитать относительную плотность полученной прессовки. Для этого в САПР строится 3D-модель прессовки и определяется ее объем V_{II} . Зная объем, занимаемый порошком в матрице V_3 и относительную насыпную плотность θ_3 , можно получить относительную плотность прессовки θ_{II} :

$$\theta_{\text{п}} = \frac{\theta_3 \cdot V_3}{V_{\text{п}}} = \frac{0,21 \cdot 10,6}{2,49} \approx 0,85. \quad (1)$$

Прогнозирование формоизменения контура внутренней полости эластичной матрицы возможно путем компьютерного моделирования процесса [6, 7].

Для моделирования формоизменения эластичной матрицы был использован комплекс DEFORM. Граничные условия процесса таковы: заготовка – пористый материал, технически чистая медь с относительной плотностью 0.244 (насыпная плотность порошка) и соответствующими механическими свойствами (задана кривая уплотнения порошка); матрица – эластичный материал, свойства которого заданы вручную (задана кривая зависимости относительного удлинения материала от давления [8], предел прочности при растяжении 30МПа и относительное удлинение при разрыве 300% [9]); жесткая обойма – твердый материал; пуансон – твердый материал, движение цилиндра гидравлического пресса со скоростью 5 мм/с.

Результаты моделирования и опыта схожи в достаточной степени, чтобы сказать, что компьютерное моделирование процесса позволяет дать качественную оценку формоизменения матрицы (рис.5).

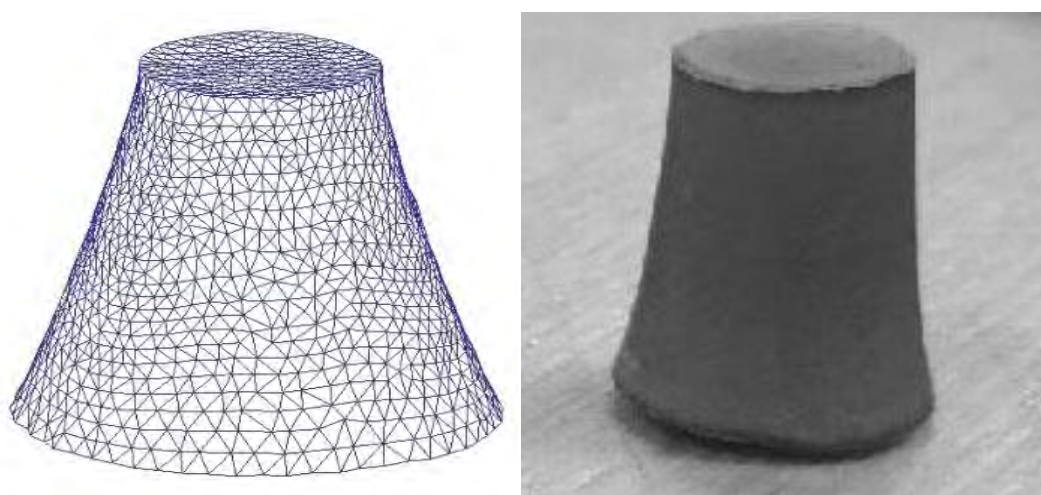


Рисунок 5 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента.

Результаты и обсуждение

Эластостатическое прессование изделий из порошков простой формы (шары, втулки, диски) не вызывают существенных трудностей при его реализации. При прессовании изделий сложной формы следует учитывать существенное формоизменение эластичной матрицы. Сложный характер деформации вызван, во-первых, различным сопротивлением деформации разнотолщинных участков эластичного материала, и во-вторых, различным сопротивлением порошкового материала на различных участках камеры засыпки. Указанные особенности процесса ЭСП могут привести к разноплотности по объему изделия. На основании полученных графиков можно корректировать профиль эластичной матрицы, придавая ей форму, обратную параболическому искривлению заготовки, чтобы скомпенсировать данное отклонение и получать изделия необходимой прямой конусной формы.

Для получения более качественных прессовок можно рекомендовать следующие схемы прессования [10, 11]:

Проектирование геометрии пресс-форм и эластичных матриц, например, наклон внутренней поверхности в контейнере пресс-формы, что приводит к более мягкой схеме разгрузки эластичной матрицы (рис. 6, а).

Выбор рациональной схемы нагружений, например, вместо радиально-осевого прессования использовать чисто радиальное уплотнение (рис. 6, б).

На рисунке 6, а представлена схема радиально осевого ЭСП в контейнере с конической внутренней полостью. Благодаря уклону под некоторым углом α полиуретановая матрица 3 более интенсивно перемещается в радиальном направлении и уплотняет порошок 6, по сравнению с вариантом уплотнения в цилиндрической матрице. При разгрузке полиуретан возвращается в исходное положение, но особенно важно, увеличивает свои наружные размеры в радиальном направлении, снижая давление на поверхность прессовки. Последнее уменьшает вероятность возникновения трещин.

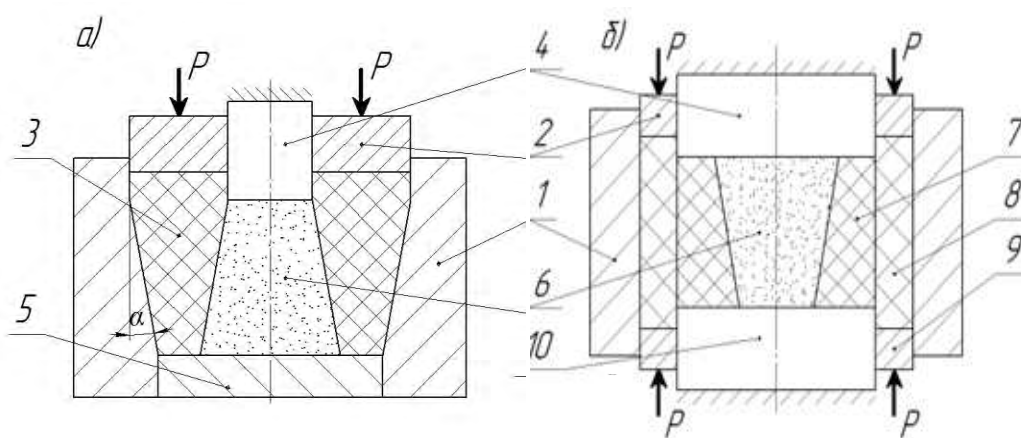


Рисунок 6 – Принципиальные схемы ЭСП: а) в коническом контейнере;

б) в составной коаксиальной эластичной матрице;

1 – жесткий контейнер, 2 – верхний пуансон, 3 – эластичная матрица,

4 – верхний упор, 5 – опора, 6 – порошок, 7 – внутренняя сменная

эластичная матрица, 8 – эластичный контейнер, 9 – нижний пуансон, 10 –
нижний упор.

На рисунке 6, б показана принципиальная схема радиального ЭСП в составной коаксиальной эластичной матрице. Порошок 6 засыпают в эластичную матрицу 7. При осевом сжатии пуансонами 4 и 9 наружного коаксиально расположенного эластичного контейнера 8 давление передается на матрицу 7 и, соответственно, на порошок 6 только в радиальном направлении. Высота прессовки, зафиксированной упорами 4 и 10, при этом не меняется.

Заключение

Сегодня повышение качества машиностроительных изделий является наиболее важной задачей любого предприятия [12 - 19]. Эластостатическое прессование порошков является экономичным методом квазиизостатического прессования, реализуемым на универсальных гидравлических прессах и позволяющим получить точные заготовки.

Наиболее эффективной схемой изостатического прессования является радиальное прессование, при котором изостатическое нагружение обеспечивает получение равномерного распределения плотности по объему изделия.

Дальнейшим совершенствованием метода и расширением номенклатуры получаемых изделий является проектирование и использование составных прессформ, в которых можно получать прессовки сложной формы. Повышение точности изделий, получаемых методом ЭСП, можно обеспечить путем моделирования предварительной формы эластичной матрицы, учитывающей ее деформацию при нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысльский И.Д. и др.; Отв. ред. Федорченко И.М., Киев: Наук. Думка. 1985. 624 с.

2. Машиностроение. Энциклопедия. Том III-2. Технологии заготовительных производств. Под ред. В.Ф. Мануйлова, Москва, «Машиностроение», 1995.

3. Кузнецов, П.А. Прессование изделий из порошков подвижными средами / П.А.Кузнецов, К.К.Мертенс// «Металлообработка», научно-производственный журнал, №3(63). - 2011. - С.25 - 30.

4. M.I. Timokhova, "Industrial technology for the automated production of grinding balls by quasi-isostatic pressing", *Refractories and Industrial Ceramics*, 52, No.6,389-392 (2011).

5. M.I. Timokhova, Advantages of Quasi- Isostatic Pressing for Powder Materials, *Refractories and Industrial Ceramics*, 53, No 3. September, 147-150 (2012).

6. Rudskoy A. I., Tsemenko V. N., Ganin S.V. A Study of Compaction and Deformation of a Powder Composite Material of the 'Aluminum–Rare Earth Elements' System. *Metal Science and Heat*.

7. Jonsen, P., Haggblad, H.T., Gustafsson, G. Modelling the non-linear elastic behavior and fracture of metal powder compacts. *Powder Technology* 284, p. 496-503. 2015.

8. Кислицын (Vasily D. Kislitsyn) В. Д.; Шадрин (Vladimir V. Shadrin) В. В.; Осоргина (Irina V. Osorgina) И. В.; Свистков, А. Л. Анализ механических свойств полиуретановых материалов, изготовленных по растворной и литьевой технологиям. *Вест. ПГУ Физика* 2020.

9. Яковлев, Станислав Николаевич. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке [Электронный ресурс] = Calculation of polyurethane details which are working on shrinkage under static load / С.Н. Яковлев. - (Машиностроение). - Электрон. текстовые дан. (1 файл: 192 Кб) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - Санкт-Петербург. - 2014

10. П.А.Кузнецов, А.О.Просторова Изостатическое прессование коаксиально-цилиндрических сорбционных элементов для криогенно-вакуумных насосов // *Холодильная техника*. - №5 - 2018. -

11. Эластостатическое прессование профилированных заготовок и изделий из порошковых материалов. Кузнецов П.А., Гоциридзе А.В., Кузнецов Р.В., Карачевцев И.Д. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2020. № 9. С. 40-48.

12. Любомудров С.А., Колодяжный Д.Ю., Орлов С.Г. Технологическое обеспечение качества машиностроительного производства. СПб: СПбПУ. 2020. 191 с.

13. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.

14. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

15. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.

16. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

17. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

18. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно-артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды III Межвузовской научно-практической конференции. 2018. С. 268-272.

19. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

P.A. Kuznetsov, K.V. Lepetan, D.R. Kravtsov,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia,
pa-kuznetsov@ya.ru, lepetan_k@mail.ru, kravtsov.dr@gmail.com

ANALYSIS OF ELASTIC DIES SHAPE CHANGING DURING POWDERS PRESSING

Abstract

The article is devoted to an analysis of elastic dies shape changing during elastostatic pressing (ESP) of conical shaped parts made of powder materials. The main schemes of ESP are considered: quasi-isostatic, radial-axial and radial pressing. Experimental measurement of a curvature of initial conical shape of the elastic die during pressing was made. Pressing process computer modeling in DEFORM showed that it is possible to consider the elastic dies shape changing during designing molds for ESP of parts with a complicated shape and as a result, to rise a presser parts accuracy.

Keywords: polyurethane, powder, molds, modeling.

Y.V. Auchynnikau¹, N.M. Chekan², I.P. Akula², E.I. Eisimont¹, A.Y. Auchynnikau¹
¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus
²Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus

NANOPHASE VACUUM COATINGS

Abstract

It is shown that a finely dispersed structure is formed in CrCN compounds, a large number of inclusions of different lateral size is observed in the CrC coating, and globular compounds with a maximum size in the region of $2 \times 2 \mu\text{m}$ are formed in the chromium coating. Calculation of specific surface energy values from which it was shown that chromium coatings have the lowest specific surface energy, and chromium carbonitride is the largest. The most optimal coefficient of friction is the chromium coating in the investigated range of loads. The CrN coating in the load region up to 10 N has the lowest coefficient of friction from all the types of coatings studied.

Keywords: vacuum coatings, structure, adhesion, transport, friction

One of the promising directions for creating protective layers for various functional purposes is the use of multicomponent vacuum coatings. The basis for the use of these compounds was research in the field of studying the properties of metastable phases discovered in the first half of the last century [1–2]. The existence of these compounds has determined their widespread use in various industries, because these nonequilibrium systems, which have a fairly long time interval of existence, have been established for many multicomponent alloys and coatings. It should be noted that diffusionless transformation in metals and alloys leads to the formation of a metastable phase, martensite. Studies related to the study of the structure and properties of this structure of a microneedle type marked the beginning of work related to the study of such a phenomenon as a “nanostate” [3–5]. The introduction of the term “nanostate” makes it possible to emphasize the features of the structure and low-dimensional objects obtained by dispersing semi-finished products, condensation of components in various aggregate states, mechanochemical alloying, and other technologies [6]. Proceeding from the above-mentioned phenomenon of “nanostoyanie”, such concepts as nanostructure, nanomaterials, nanotechnologies, etc., logically follow. Nanomaterials - engineering materials of a new generation include composites based on polymeric and oligomeric matrices containing functional components with a particle size not exceeding 100 nm. According to the modern classification, such composites are classified as nanocomposite materials. Ceramic, polymeric nanocomposites are among the most effectively developing classes of engineering materials, the volume of production of which is increasing every year, replacing traditional types of structural materials and their compositions. At the same time, despite the pronounced effectiveness of the use of coatings and materials from composite materials on a metal, ceramic and polymer matrix, there are currently no well-established prerequisites for the formation of a scientifically based theory of nanomaterials science and technology for their production and processing into products for various functional purposes [1–7].

In the context of the development of modern market relations, the use of new technologies and materials created using knowledge from the field of "nanostate" should

ensure a steady decline in prices for energy resources, materials, labor resources, which will have a great impact on the formation of the cost of manufactured goods and products. The development of modern mechanical engineering should be based on the creation of domestic resource-saving technologies, the creation of materials and coatings with improved performance characteristics based on the development of nanotechnologies, nanomaterials, and surface engineering.

In this regard, great interest is shown to coatings obtained using plasma-chemical methods based on vacuum technologies.

It is known that coatings based on refractory metals have high wear-resistant characteristics, corrosion resistance, heat resistance, have a low level of mechanical stress and are characterized by a low density of macrodefects, which leads to high adhesion characteristics.

Thus, the study of the structure and properties of heat-resistant vacuum coatings containing nanoparticles and nanophases in their structure is an urgent task for modern mechanical engineering, the agro-industrial complex, and the chemical industry.

The purpose of the work is to study the influence of the structure, chemical composition of coatings, as well as the energy state of the substrate on the physical and mechanical characteristics of the formed vacuum coatings based on chromium.

Composite coatings based on nitrides and chromium carbides were deposited by the method of reactive electric arc evaporation using a URMZ 279.048 unit. 40X steel was used as the substrate. The surface of the 40X steel substrates was subjected to a purity of at least class 10. Before deposition, the sample surface was cleaned and heated with chromium ions in the following modes.

The study of the structure and physico-mechanical characteristics of vacuum coatings and substrates modified by low-temperature treatment was carried out by the methods of X-ray diffraction analysis, optical microscopy, scanning electron microscopy, and atomic force microscopy. The surface roughness of vacuum coatings and metal substrates was evaluated on a SurfTest SJ-210 profilograph. To determine the energy parameters of the modified surfaces, we used the method of direct shadow determination of the contact angle of wetting. Liquids differing in polarity were used to study wetting and calculate adhesion forces, polar and dispersion components of surface energy

Common coatings based on Cr are CrC, CrCN. CrC coatings are characterized by high hardness (~35 GPa), which ensures high tribotechnical characteristics. This class of coatings has a high diffusion resistance, as well as resistance to oxidative processes, which makes it possible to expand the scope of application compared to TiC coatings.

CrCN coatings are used as a highly hard, anti-friction coating on tools, and as a friction-reducing coating in heavily loaded friction units of automotive and automotive equipment. The coating often has a multilayer structure with a gradual increase in the proportion of carbon towards the surface. To increase wear resistance, technological operations are carried out to replace nitrogen atoms with carbon in the chromium crystal lattice, which makes the coating more brittle, but leads to an increase in hardness. To increase the viscosity, various methods are used, including the creation of a multilayer structure so that internal stresses are created between them.

A number of manufacturers use multilayer composite coatings based on CrN to increase the service life of a machining tool. A typical system is a Cr layer providing good adhesion to the steel substrate. Then CrN layers are formed, alternating with CrN layers. This "sandwich" structure is completed by the CrNO layer. Typically, such composite coatings are used for tools (drills, taps, etc.) intended for processing steel products. Another

direction of application of this class of coatings is the modification of tools (in particular, end mills) intended for processing non-ferrous metals, as well as injection molds. This amorphous coating has low crystal chemical compatibility with Al alloys, which reduces the likelihood of work hardening and scuffing during machining. The hardness of the CrN coating is higher than that of ordinary CrN, and the coating thickness does not exceed 1 μm . To reduce the surface roughness, the coating is subjected to a special treatment ($R_z=1 \mu\text{m}$), after which it acquires an iridescent color [7-8].

Let us consider tribotechnical characteristics of pairs "diamond indenter-Cr coating", "diamond indenter-CrC coating", "diamond indenter-CrN coating". Figure 1-3 shows the dependence of the coefficient of friction on pressure.

Usually, the influence of the normal load on the coefficient of friction manifests itself depending on the type of interaction between the friction body and the counterbody. Dependence $f(N)$ is a nonmonotonic function with an extremum point, which determines the transition from elastic to plastic contact.

According to classical concepts [8-11], the position of the minimum depends on the ratio of the molecular and mechanical components. The minimum values for Cr coatings are in the region of 7H, CrN-9-10H, CrC-5-6H. It can be assumed that the transition from one type of contact to another is the beginning of the destruction of the coating on the substrate. However, studies have shown that in most cases this ratio f_{up}/f_{layer} characterizes the process of indentation of the coating into the base of the substrate. The study of the morphology of the scratch itself by optical microscopy shows that the destruction of the coating occurs much later than the transition from molecular to plastic form of contact. The most optimal coefficient of friction has a chromium coating in the studied range of loads. The CrN coating in the area of loads up to 10 N has the lowest friction coefficient of all the studied types of coatings. An increase in load leads to a sharp increase in the values of the friction coefficient for the "diamond indenter-CrN coating" pair. The CrC coating has a higher coefficient of friction compared to other types of coatings under study. This may be due to the developed morphology of the CrC coating.

The adhesive characteristics of vacuum coatings were evaluated by scratch analysis. For research, standard equipment used for testing was used, which includes a module for measuring scratching, wear studies and profilometry. The feedback system is used to control the applied load, the force acting on the sample, independent of the surface topography. The prescan procedure makes it possible to measure the actual penetration depth in a scratch test to characterize elastic recovery using a postscan procedure [7]. Scratch testers are equipped with an easy-to-use software package that allows the user to perform a scratch test in a wide variety of test modes, including simple scratch, advanced scratch test (with pre-scan and post-scan), simple scratch mapping, scratch mapping with various modes, defined by the user.

During scratch testing of coatings, the combination of a load normally applied to the indenter and its tangential displacement leads to the appearance of complex stress and strain fields in the scratch area [8-10]. The normal load causes compression of the material under the indenter and bending along the perimeter of the contact area between the indenter and the sample. In this case, the flexural deformation of the coating contributes to the simultaneous development of both tensile and compressive stresses in different areas. The lateral movement of the indenter causes a friction force between the indenter and the coating, which causes compressive stresses in front of the indenter and tensile stresses behind it.

Depending on the experimental conditions (applied load, indenter geometry, speed of its movement) and the characteristics of the “coating-substrate” system (coating thickness and hardness, substrate hardness, etc.), any of these stresses can lead to coating failure. In addition, the strength of the “coating-substrate” interface has a special effect on the nature of the destruction of coatings during scratching. Adhesive and cohesive destruction of coatings are competing mechanisms and can develop both in parallel and sequentially. All this determines the variety of types of coating failure during scratch testing.

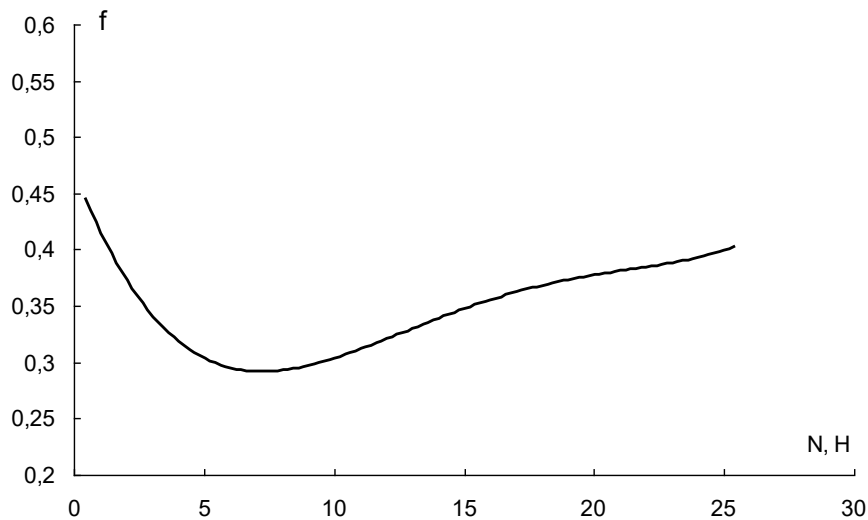


Figure 1 – Dependence of the coefficient of friction of the pair "diamond indenter-coating Cr" on the normal load.

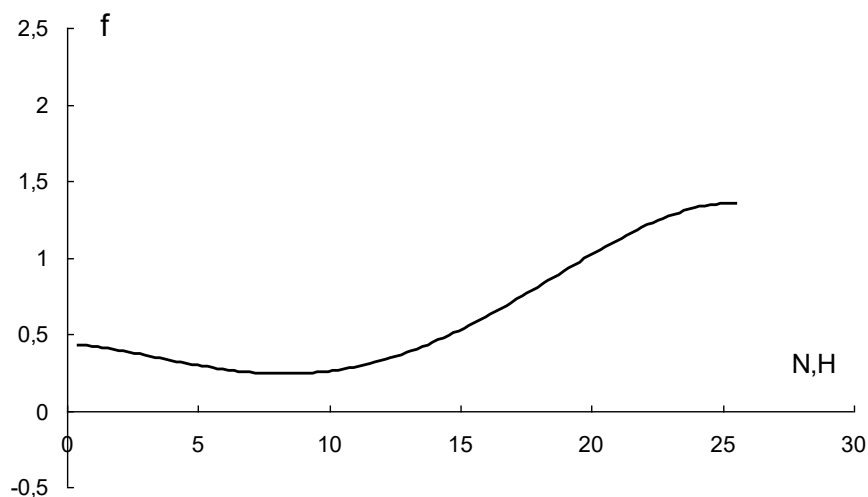


Figure 2 – Dependence of the coefficient of friction of the "diamond indenter-CrN coating" pair on the normal load

Commercial scratch testers have a force sensor and an active load feedback system. The design of the measuring head includes sensors for force and penetration depth (vertical stroke of the indenter). These features provide fast response times, high accuracy, and great flexibility for all types of measurement scratching. The vertical force applied to the scratching indenter is controlled during the entire measurement [7]. Panorama mode is the most important part of the scratch tester. After the scratch test, the researcher usually

records a full panorama. After recording the scratch panorama, you can re-analyze the results of the research.

Studies of the adhesion characteristics of vacuum Cr coatings were carried out (Fig. 4).

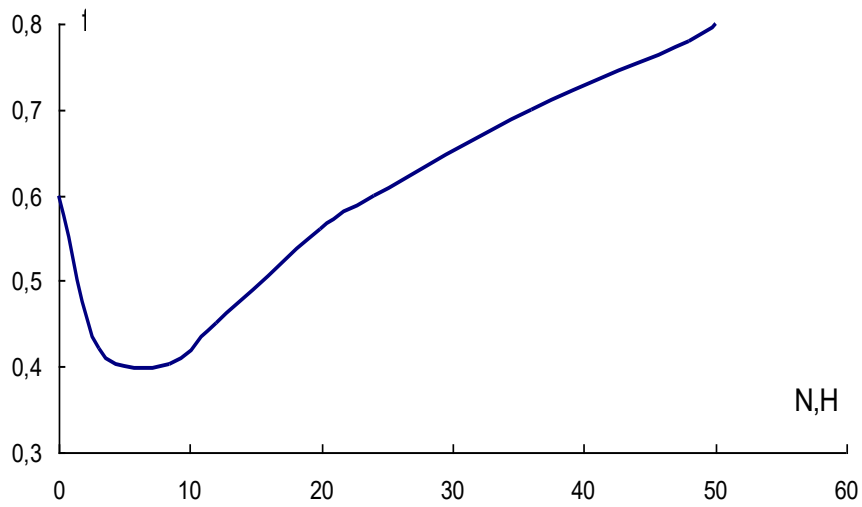


Figure 3 – Dependence of the coefficient of friction of the pair "diamond indenter-coating CrC" on the normal load.

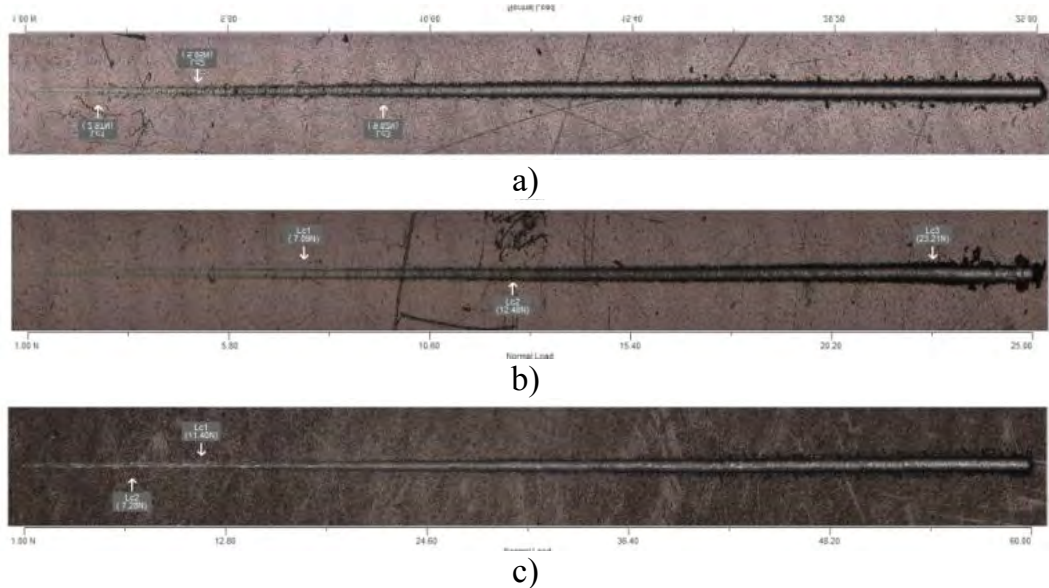


Figure 4 –View of a scratch on coatings based on chromium obtained by scratch analysis. a)Cr, b)CrCN, c)CrC

Based on the data obtained, it can be assumed that under a varying normal load acting on the indenter in the range from 1 to 25 N, for chromium coatings obtained by PVD, complete delamination of chromium coatings from the substrate is observed in the range from 9 to 11 N.

Unlike coatings of chromium formed on the surface of a steel sample, CrCN coatings begin to flake off at values in the region of 12-13H. Complete delamination of the coating from the substrate is observed at ~23H. The treatment of coatings made of chromium, chromium carbonitride in solutions of fluorine-containing compounds of grade F1 and the formation of a chemisorbed layer of the type of salts of higher acids (COO)₂Me does not

lead to a significant change in the adhesive characteristics of the coatings under consideration [11].

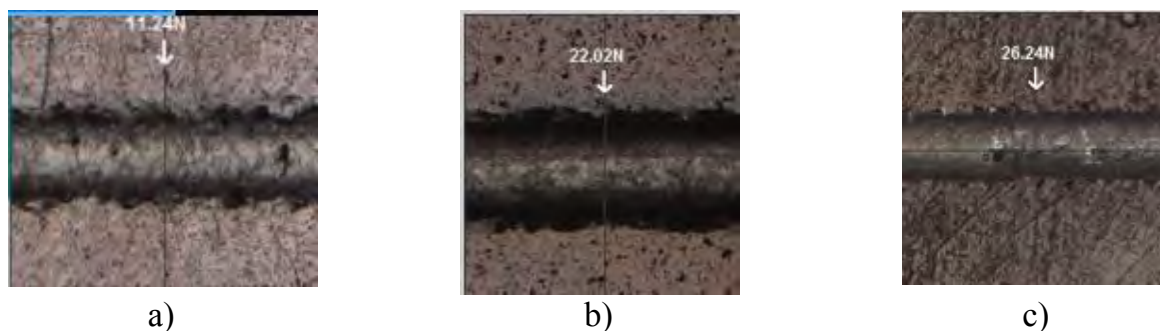


Figure 5 – A fragment of a scratch on chromium-based coatings, where the coating is completely peeled off from the substrate: a) Cr, b) CrCN, c) CrC

It is shown that a finely dispersed structure is formed in CrCN compounds, a large number of inclusions of various lateral sizes are observed in the CrC coating, and globular compounds with a maximum size in the region of $2 \times 2 \mu\text{m}$ are formed in the chromium coating. The calculation of the values of specific surface energy was carried out on the basis of which it was shown that chromium coatings have the lowest specific surface energy, and chromium carbonitride has the highest. Thus, the specific surface energy significantly depends on the structure and chemical composition of the coatings. Differences in the values of specific surface energy formed on steels with different values of carbon and other alloying elements are not significant. The most optimal coefficient of friction has a chromium coating in the studied range of loads. The CrN coating in the area of loads up to 10 N has the lowest friction coefficient of all the studied types of coatings. An increase in load leads to a sharp increase in the values of the friction coefficient for the “diamond indenter-CrN coating” pair. The CrC coating has a higher coefficient of friction compared to other types of coatings under study. This may be due to the developed morphology of the CrC coating.

REFERENCES

1. Titanium nickelide alloys with shape memory. Part I. Under. ed. V.G. Pushina / Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 439 p.
2. Filonov, M.R. Theoretical foundations for the production of amorphous and nanocrystalline alloys by the method of superfast hardening / M.R. Filonov, Yu.A. Anikin, Yu.B. Levin. - M.: Publishing House of MISiS, 2006. - 328 p.
3. Gusev A.I. Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. - M.: Fizmatlit, 2007. - 416 p. – 2012. 360 p.
5. Metal-polymer nanocomposites: structural features, technology, application / A.A. Ryskulov, S.V. Avdeychik, M.V. Ishchenko, E.V. Ovchinnikov. Under the scientific ed. V.A. Struk, V.A. Liopo. - Grodno: GSAU, 2010. - 335 p.
6. Mechanochemical aspects of the technology of formation and application of fluoroplastic composites / V.A. Struk, A.K. Tsvetnikov, A.S. Antonov, S.V. Avdeychik, E.V. Ovchinnikov, G.N. Gorbatsевич, V.Ya. Shcherba // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical and technical sciences. – 2009. No. 3. S. 28–35.
7. CSM INSTRUMENTS. Technical description. Micro Scratch Tester (MST 2) [Electronic resource] / Nienschanz-Scientific LLC. – Access mode: <http://lab-nnz.ru/wp->

content/uploads/02-MST2_Technical-Features_2011-RUS.pdf. – Date of access: 29.11.2016.

8. A.R. Shugurov, A.A. Akulinkin, A.V. Panin, V.P. Sergeev, M.P. Kalashnikov, A.V. Voronov, C.-H. Cheng Investigation of crack resistance of TiAlN coatings by scratch testing // Fiz. mesomeh. - 2015. - T. 18. - No. 6. - S. 66-74.

9. Holmberg K., Laukkanen A., Ronkainen H., Wallin K., Varjus S., Koskinen J. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface. Part I: Modeling stresses and strains // Surf. Coat. Technol. - 2006. - V. 200. - P. 3793-3809.

10. A. I. Dmitriev, V. P. Kuznetsov, A. Yu. Nikonov, I. Yu. Simulation of the process of nanostructuring burnishing at different scale levels // Fiz. meso-mech. - 2014. - T. 17. - No. 3. - S. 6-13.

11. Ovchinnikov, E. V. Thin films of fluorine-containing oligomers: basics of synthesis, properties and applications [Text] / E. V. Ovchinnikov, V. A. Struk, V. A. Gubanov. - Grodno: GSAU, 2007. - 326 p.

Е.В. Овчинников¹, Н.М. Чекан², И.П. Акула², Е.И. Эйсымонт¹, А.Е. Овчинников¹
¹Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь
²Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

НАНОФАЗНЫЕ ВАКУУМНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Аннотация

В статье показано, что в соединениях CrCN формируется мелкодисперсная структура, в покрытии CrC наблюдается большое количество включений различного размера, а в покрытии хрома образуются глобулярные соединения с максимальным размером в районе 2x2 мкм. Расчет значений удельной поверхностной энергии показал, что хромовые покрытия имеют наименьшую удельную поверхностную энергию, а карбонитрид хрома – наибольшую. В исследованном диапазоне нагрузок оптимальным коэффициентом трения обладает хромовое покрытие. Покрытие CrN в области нагрузок до 10 Н имеет самый низкий коэффициент трения из всех исследованных типов покрытий.

Ключевые слова: вакуумные покрытия, структура, адгезия, перенос, трение.

Е.В. Овчинников¹, А.П. Возняковский², А.А. Возняковский³, Е.И. Эйсымонт¹
¹Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь
²Научно-исследовательский институт синтетического каучука,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ РЕАКТОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ

Аннотация

Целью работы являлось изучение влияния процессов, происходящих при различных видах механоактивации твердых веществ на структуру, физико-механические характеристики получаемых дисперсных частиц модификаторов, определение их модифицирующей активности, а также влияние на структуру и свойства реактопластичных полимеров и их смесей при модифицировании механоактивированными частицами, обеспечивающими синергический эффект повышения физико-механических характеристик. Для определения зарядовой активности применяли метод термостимулированной деполяризации, позволяющий количественно оценивать величину заряда термопластичных матриц, модифицированных частицами различной дисперсности и природы происхождения.

Ключевые слова: углерод, наночастица, структура, свойства, реактопласт.

Введение

Согласно литературных данных [1]-[2], формирование нанодисперсных частиц методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволяет получить низкоразмерные частицы со свойствами, отличными от свойств объемных углеродных материалов. Получаемые наноразмерные частицы обладают высокой адсорбционной активностью, большими значениями удельной поверхности. Проведенные исследования показали, что в зависимости от технологии формирования данных частиц в реакторе возможно регулирование морфологии и латеральных размеров частиц, что в дальнейшем позволит целенаправленно изменять активность данных частиц.

Активность наноразмерных частиц, получаемых самораспространяющимся высокотемпературным синтезом, обусловлена дефектностью формируемых нанокристаллов.

Так, например, если рассмотреть нульмерный, точечный дефект, расположенный в кристалле на расстоянии не более 5 – 7 атомных слоев, то на поверхности возникает участок с механическими напряжениями вследствие нарушений атомных взаимоконфигураций. В связи с этим на поверхности кристалла возникает область с измененным потенциалом. Появление данных поверхностных дефектов приводит к возникновению поверхностных активных центров (ПАЦ). Взаимодействие ПАЦ с молекулами примыкающего к ним вещества носит электромагнитный характер. Наличие электрического заряда не является обязательным условием для появления поверхностных активных центров.

В настоящее время одним из перспективных классов модификаторов для полимерных материалов являются углеродные наноматериалы (УНМ). Данная классификация включает следующие вещества: детонационный наноалмаз, графен, оксид графена, графеновые нанопластины, углеродные одностенные нанотрубки, многостенные углеродные нанотрубки, фуллерены [1] – [2] уникальных свойств. В частности, детонационные наноалмазы обладают теплопроводностью и твердостью, близкими к монокристаллическому алмазу. Высокими физико-механическими характеристиками обладают углеродные одностенные нанотрубки и многостенные углеродные нанотрубки. Значения модуля упругости для данных веществ может достигать 1,7 – 3,8 ТПа в зависимости от вида материала, а значения теплопроводности вдоль оси трубки оценивается ~ 3000 Вт/м К. Аналогично близкими физико-механическими характеристиками обладает графен: теплопроводность – 5000 Вт/м К, модуль Юнга – 1 ТПа, значения удельной поверхности – 2630 м²/г.

Методы

Для проведения испытаний были изготовлены металлические пластины (толщиной 1,2 мм из стали 3), на которых формировали покрытия следующего состава: ЭПК 502 (эпоксидно-полиэфирный порошковый материал), ЭПК 502 + 0,5% графеноподобных структур (ГПС ТУ 23.9914.130-006-16720618-2018), ЭПК 502 + 1% ГПС, ЭПК 502 + 3% (ГПС). Окрасивание исследуемых образцов осуществлялось с помощью установки для нанесения покрытий электростатическим способом ТЕМПО РПЭ-11. Методами ИК-спектроскопии, физико-механического анализа проведены исследования структуры и эксплуатационных характеристик разработанных покрытий.

Результаты и обсуждение

Составляющими эпоксидно-полиэфирной краски ЭПК 502 являются эпоксидные и полиэфирные смолы, полосы поглощения в которых находятся в следующих областях ИК-спектра: полиэфирная отвержденная смола - 708 см⁻¹, 748 см⁻¹, 903 см⁻¹, 1053 см⁻¹, 1070 см⁻¹, 1127 см⁻¹, 1159 см⁻¹, 1244 см⁻¹, 1283 см⁻¹, 1370 см⁻¹, 1445 см⁻¹, 1580 см⁻¹, 1650 см⁻¹, 1744 см⁻¹, 2118 см⁻¹, 2942 см⁻¹, 298 см⁻¹; эпоксидная отвержденная смола - 787 см⁻¹, 829 см⁻¹, 912 см⁻¹, 1037 см⁻¹, 1106 см⁻¹, 1183 см⁻¹, 1245 см⁻¹, 1295 см⁻¹, 1361 см⁻¹, 1383 см⁻¹, 1413 см⁻¹, 1457 см⁻¹, 1509 см⁻¹, 1582 см⁻¹, 1606 см⁻¹, 2870 см⁻¹, 2928 см⁻¹, 2963 см⁻¹, 3036 см⁻¹. Согласно полученного ИК-спектра ЭПК 502, установлено наличие достаточно большого комплекса полос поглощения, лежащих при следующих волновых частотах: 728 см⁻¹, 837 см⁻¹, 870 см⁻¹, 980 см⁻¹, 1012 см⁻¹, 1040 см⁻¹, 1100 см⁻¹, 1182 см⁻¹, 1242 см⁻¹, 1379 см⁻¹, 1406 см⁻¹, 1505 см⁻¹, 1576 см⁻¹, 1612 см⁻¹, 1713 см⁻¹, 2877 см⁻¹, 2933 см⁻¹, 2971 см⁻¹, 3048 см⁻¹.

Положение данных полос поглощения в ИК-спектре композиционного порошкового материала в большинстве случаев совпадает с полосами поглощения базовых материалов. Однако имеются полосы поглощения, которые не идентифицированы для исходных материалов, что позволяет предположить об образовании нового химического соединения в результате совмещения базовых смол, в процессе получения эпоксидно-полиэфирного порошкового материала. Введение в композиционный материал нанодисперсного ГПС не приводит к изменению положения полос поглощения в исследуемых образцах. Происходит изменение отношения оптических плотностей полос поглощения D_{1244}/D_{1265} при изменении

концентрации модификатора в объеме полимер-олигомерной матрицы покрытия, что может свидетельствовать об образовании сетки лабильных физических связей в системе «нанофазный модификатор-молекулы эпоксидно-полиэфирной композиции». В результате данного взаимодействия происходит изменение физико-механических характеристик сформированного покрытия (рис.2).

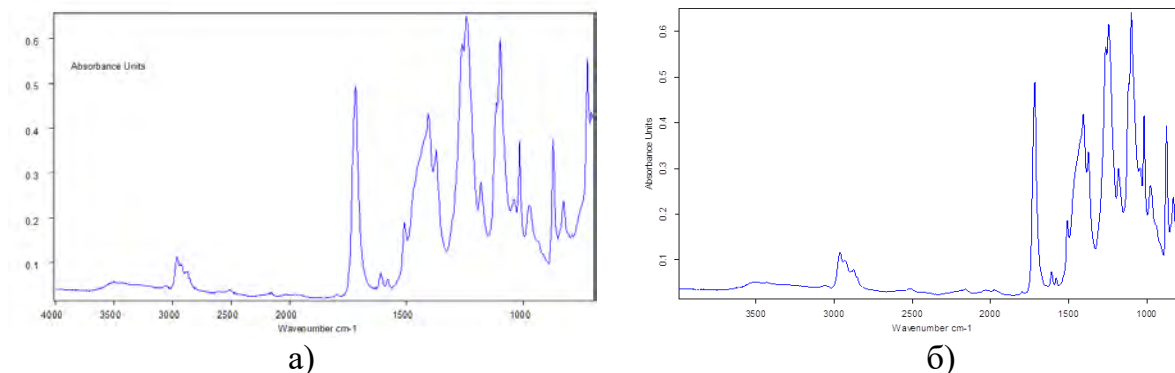


Рисунок 1 – ИК-спектр нанокомпозиционных покрытий на основе реактопластичных матриц: а) исходное покрытие ЭПК 052, б) покрытие ЭПК 052, содержащее 3 мас.% частиц ГПС

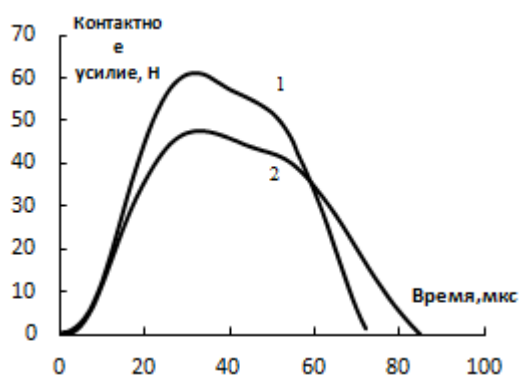


Рисунок 2 – График зависимости контактного усилия от времени для нанокомпозиционных покрытий на основе реактопластичных матриц:
 1) покрытие ЭПК 052, модифицированное 3% ГПС,
 2) исходное покрытие ЭПК 052

Методом локального динамического индентирования изучены напряженно-деформированные состояния покрытий, полученных на базе эпоксидно-полиэфирных композиций.

Установлено, что введение нанофазного модификатора увеличивает твердость покрытий, при этом сохраняет высокие значения адгезии эпоксидно-полиэфирных соединений к металлической поверхности.

Заключение

Таким образом, проведен комплексный анализ структурных и физико-механических параметров системы «нанокомпозиционное покрытие – металл». Установлен эффект образования в структуре нанофазного эпоксидно-полиэфирного покрытия, сетки лабильных физических связей, приводящих к увеличению физико-механических и коррозионных характеристик. Разработанный состав

композиционного нанофазного покрытия на базе смесевых матриц и оптимизированное содержание нанофазного углеродного модификатора в объеме полимер-олигомерной матрице, находящейся в области 3 мас. %, обеспечивает повышенную адгезионную прочность и твердость нанесенного покрытия. Разработаны и оптимизированы составы и технология формирования нанокomпозиционных покрытий на основе реактивных полимер-олигомерных смесевых матриц, при их формировании методом электростатического осаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников Е.В. Нанокomпозиционные аддитивы для модифицирования полимерных матриц / А.П. Возняковский, А.А. Возняковский, Е.И. Эйсымонт // Естественные и математические науки в современном мире.- 2016 .- № 8.- С.69-75.

2. Овчинников, Е.В. Нанодисперсные углеродные частицы для модифицирования полимерных матриц / Е.В. Овчинников, А.П. Возняковский, А.А. Возняковский, Т.И. Пинчук, Е.И. Эйсымонт // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2016», 21-25 ноября 2016 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2016, часть 2. - С. 66-68.

3. Износостойкость композиционных покрытий на основе эпоксифенольных олигомеров, модифицированных термопластами / В.Я. Прушак, В.В. Дмитроченко, Е.В. Овчинников, Г.А. Костюкович // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. // Международный сборник научных трудов / ДонНТУ. - Донецк, 2007. - Выпуск 33. - С.216 - 220.

4. Онисько, А.Р. Технологические аспекты формирования композиционных материалов и покрытий на основе сшивающихся олигомеров / А.Р. Онисько, Е.В. Овчинников // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы Седьмой ежегодной международной Промышленной конференции, п. Славское, Карпаты, 12-16 февраля 2007г. / УИЦ «Наука. Техника. Технология»; под ред. З.Ю. Главацкой. - Киев, 2007. - С.449 - 452.

Ye.V.Ovchinnikov¹, A.P. Wozniakovsky², A.A. Wozniakovsky³, E.I.Eisymont¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

²S.V. Lebedev Institute of synthetic rubber, Saint Petersburg, Russian Federation

³Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russian Federation

NANOCOMPOSITE COATINGS BASED ON REACTOPLASTIC MATRIXES

Abstract

The aim of the presented work is to study the influence of various types of mechanical activation of solids on the structure, physical and mechanical properties of the resulting dispersed modifiers particles, to determine their modifying activity and to assess the influence of mechanically activated particles providing a synergistic effect of increasing physical and mechanical characteristics on the structure and properties of thermoplastic polymers and their mixtures. The charge activity was determined by means of thermally stimulated depolarization which allows quantifying the magnitude of the charge of thermoplastic matrices modified with particles of various dispersity and origin.

Keywords: carbon, nanoparticle, structure, properties, thermoset.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ОСНОВАНИЕ»

Аннотация

В работе рассмотрены технологические режимы осадки заготовки из материала FeNi48. Характерными проблемами для таких процессов являются негативное влияние трения и произвольное коробление заготовки. Результаты численного моделирования определяют, в частности, требования к КШО и приводам подвижных деталей штампа.

Ключевые слова: осадка, железо-никелевые сплавы, метод конечных элементов.

Введение

Геометрические элементы детали (рис. 1) могут быть получены, в частности, операцией осадки. При этом возможна заметная деформация опорных поверхностей, если выпучиванию материала либо ничего не препятствует, либо привод прижима имеет недостаточное усилие.

Материал FeNi48 относится к группе железо-никелевых сплавов, механические характеристики которых иллюстрирует рисунок 2 [1]. Из рисунка видно, что исследуемый сплав не является наиболее прочным в группе. Кроме того, обработка такого материала осложнена ввиду его высокого коэффициента трения по стальному инструменту [2-4]. Тем не менее, данный сплав обладает важным свойством – низким коэффициентом термического расширения, что определяет области его применения.

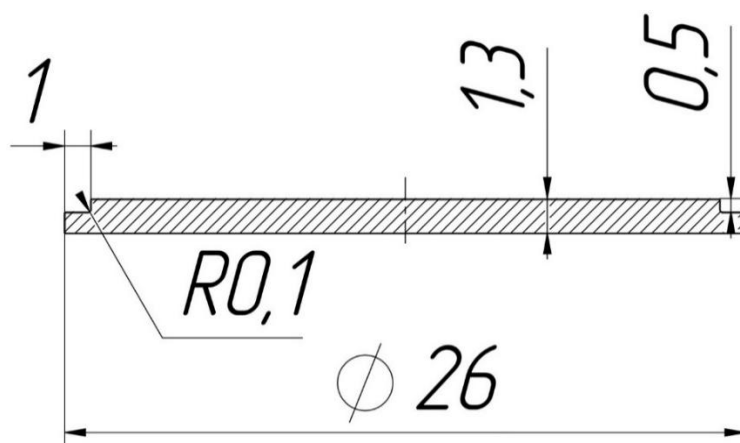


Рисунок 1 – условная деталь «Основание»

Цель работы

Сравнить способы нагружения заготовки с учетом свойств материала для определения предпочтительного режима обработки.

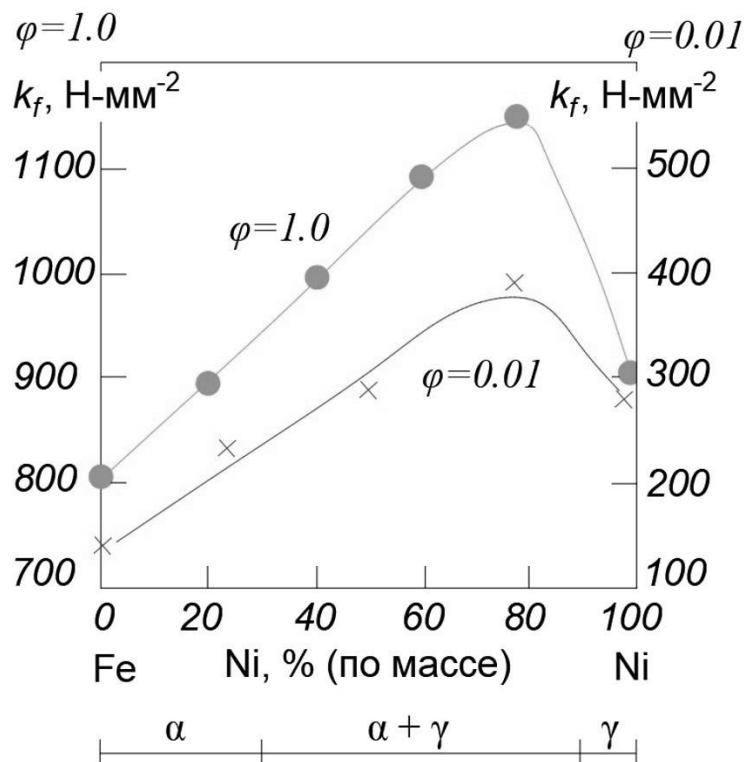


Рисунок 2 – Механические характеристики железо-никелевых сплавов, где k_f – давление пластического течения, ϕ – степень деформации.

Методы

Поставленная цель выполняется с использованием численного моделирования в программном пакете *simufact.forming*. Принципиальная схема инструмента для осадки приведена на рисунке 3. В зависимости движений рабочих деталей могут быть получены энергосиловые параметры для следующих случаев: а) без прижима (прижим 4 свободно опускается под воздействием заготовки); б) наибольшего усилия прижима (прижим 4 – неподвижный, матрица 1 – подвижная); в) подпружиненного прижима (матрица 1 – неподвижная, прижим 4 – подпружинен).

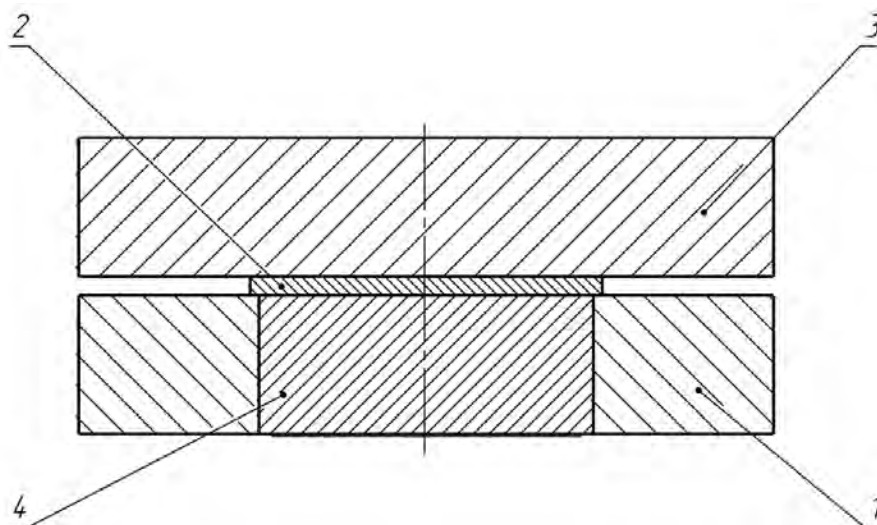


Рисунок 3 – Принципиальная инструмента для осадки:
1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – пуансон; 4 – прижим.

В качестве модели материала использованы данные, приведенные в таблицах 1,2. Аппроксимация кривой деформационного упрочнения – уравнение (1), взята из справочника [1] и достоверна для степеней деформации $\varphi = [0; 1,4]$.

$$\sigma_F = 300 + 658,4 \cdot \varphi^{0,495} \quad (1)$$

Таблица 1 – Механические свойства сплава FeNi48

Модуль Юнга (Young's modulus)	1,5e+11	Па
Коэффициент Пуассона (Poisson ratio)	0,32	
Плотность (Density)	8200	кг/м ³
Коэффициент термического расширения (thermal expansion coefficient)	8,2e-6	1/К

Таблица 2 – Термические характеристики сплава FeNi48

Теплопроводность (Thermal conductivity)	12,7	Вт/(м · К)
Специальная теплоемкость (Specific heat capacity)	0,5	Дж / (кг · К)

Варьируемым параметром является коэффициент трения, который для данной группы материалов может достигать 0,4.

Задачи решались как в осесимметричной постановке, так и в объемной.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования процесса осадки по 2-ум схемам – с прижимом и без представлены в виде графика (рис. 4).

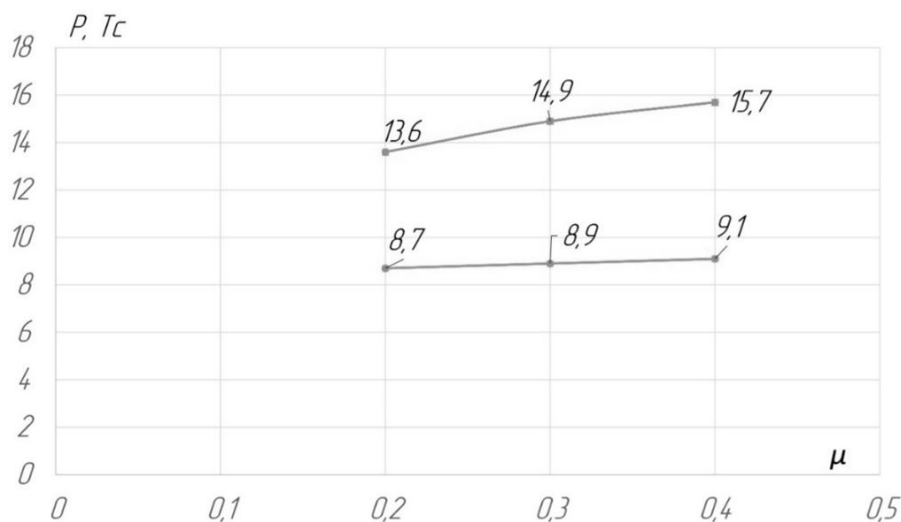


Рисунок 4 – Результаты численного моделирования: зависимость усилия штамповки от схемы нагружения и условий трения

Из графика видно, что коэффициент трения незначительно влияет на усилие штамповки.

Наибольшее усилие прижима находится в диапазоне 4,6÷5,1 Тс. Такое усилие может быть обеспечено, как внутренним ползуном прессы двойного действия, так и

подушкой/буферным устройством для прессы простого действия. В последнем случае, конструкция будет работать надежнее с меньшим усилием прижима.

К результатам моделирования так же относится распределение температур в очаге деформации: более 200 °С, что следует учитывать при выборе смазки и высоких темпах штамповки.

Заключение

В результате сравнения технологий было определено, что без прижима деталь испытывает значительное коробление. Компенсировать коробление может прижим с усилием до 5,1 Тс, что составляет до 30% технологического усилия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением/ Хензель А., Шпиттель Т.; пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1982. - 360с.
2. Поляков Ю.Л. Листовая штамповка легированных сплавов. - М.: Машиностроение, 1980. - 96с.
3. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. Подготовительные работы. - М.: Машиностроение, 1970. - 320с.
4. Seminatin S.L. ASM Handbook. Vol. 14 A. Metalworking: BulkForming/ S.L. Seminatin, S.R. Lampman, B.R. Sanders, G.J. Anton-Ohio: ASM International, 2005. - 888p.

S.R. Schneider, N.V. Sokolov

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, Sscheider03@mail.ru

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF COLD FORMING PROCESSES FOR MANUFACTURING «BASE» TYPE PARTS

Abstract

In this paper some technological modes for upsetting of FeNi48 workpiece are considered. Common problems for such processes are negative influence of friction and unplanned deformation of workpiece. The results of numerical simulation determine the demands for presses and drives of the moving die parts.

Keywords: Upsetting, Fe-Ni alloys, Finite Element Method.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 658.5

К.С. Гречина^{1,2}, Д.В. Ляховенко²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, grechina_ks@npo-poisk.ru

²АО «НПО «Поиск», г. Мурино, Россия

ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРЕССОВОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВРЕМЯЗАДАЮЩЕГО КОЛЬЦА

Аннотация

В работе рассмотрены основные условия обеспечения качества при проектировании и изготовлении прессовой оснастки времязадающего кольца для изделий военной техники, а также факторы, влияющие на качество прессовой оснастки. В результате проведенной работы был разработан комплект конструкторской документации на прессовую оснастку для времязадающего кольца, изготовлены экспериментальные образцы оснастки, проведена апробация предложенных технических решений в реальных условиях ее дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: предохранительно-исполнительный механизм, технологический процесс, взрывчатое вещество, прессовая оснастка, времязадающее кольцо.

Введение

Необходимость в разработке прессовой оснастки для прессования спецсостава вызвана недостаточной информацией о времени горения новых партий спецсостава.

Сам же процесс прессования спецсостава является особо опасным, что вызвано чувствительностью спецсостава к статическому электричеству, удару и т.д.

С учетом вышесказанного, в ходе проектирования и изготовления прессовой оснастки для прессования дугового канала и порохового столбика времязадающего кольца предохранительно-исполнительного механизма возникает ряд вопросов по обеспечению:

- 1) качества прессовой оснастки;
- 2) безопасности при эксплуатации прессовой оснастки.

Методы

При изучение данной темы были использованы: научная и нормативная литература на тему прессования спецсостава, проектирование и разработка прессовой оснастки для дуговых каналов и пороховых столбиков, а также опыт, полученный АО «НПО «Поиск» при их многолетней работе с взрывательными устройствами разных типов.

Результаты и обсуждения

К основным условиям для обеспечения качества прессовой оснастки для прессования спецсоставов во времязадающее кольцо относятся:

1. Проектируемые сборки для прессовки должны точно соответствовать порядку запрессовки элементов дугового канала, указанному в чертеже. [1]

На рисунке 1 изображена 3D модель прессовой оснастки для прессования пиротехнического столбика и дугового канала.

2. В связи с повышенной эксплуатацией прессовой оснастки необходимо, чтобы все металлические детали прессовой оснастки были калеными (допускается для этапа экспериментальной отработки прессовой оснастки термообработку не осуществлять).

3. Сборка должна обеспечивать надежную фиксацию в ней кольца.

4. Конструкция корпуса прессовой оснастки должна обеспечивать отсутствие отрыва состава при снятии корпуса.

5. Сборка должна обеспечивать размер столбика в пределах допуска, так как большая часть составов после прессования растут, рабочая часть корпуса, где непосредственно формируется наружный диаметр столбика, задается по минимальному размеру.

6. Класс чистоты рабочих поверхностей сборки, непосредственно соприкасающихся с составом, должен быть не менее 10.

7. Прессовая оснастка должна легко разбираться и не вызывать сколов готового столбика при этом.

В связи с этим, необходимо рассмотреть и факторы, влияющие на качество прессовой оснастки как при ее проектировании, так и при изготовлении:

1. Грамотно разработанные конструкторская и технологическая документация (особенно проблематичным вопросом является расчет рабочих частей пуансона, корпуса, основания и штифта);

2. Правильный выбор оборудования, инструмента и оснастки для ее изготовления;

3. Выбор сырья, материалов для изготовления деталей данной оснастки;

4. Качество труда исполнителей;

5. Настройка оборудования;

6. Соблюдение методики испытаний на время горения, для определения годности в том числе и оснастки.

Особенности процесса прессования, оказывающие существенное влияние на состав и содержание требований к технологической оснастке в ходе её разработки, вызваны рядом факторов:

1) форма и размер кристаллов взрывчатого вещества неоднородна;

2) условия хранения и прессования взрывчатого вещества;

3) высокая стоимость и сложность прессового оборудования и оснастки;

4) взрывопожароопасность процесса. [2]

Прессование состава во времязадающее кольцо осуществляется в два этапа:

1. Прессование столбика.

2. Прессование дугового канала.

Технологическая оснастка для прессования столбика во времязадающее кольцо состоит из: основания со штифтами, корпуса, пуансона.

Технологическая оснастка для прессования дугового канала состоит из: основания со штифтами, вкладыша, корпуса, пуансона, гайки.

При разработке каждой из перечисленных деталей (кроме вкладыша и гайки) необходимо соблюсти определенную методику.

Основание для первого и второго этапа прессования одно. В основание впрессовываются штифты. Диаметр отверстия основания равен внешнему диаметру кольца, но с допуском не $h12$, а $H14$ для обеспечения гарантированного зазора. Глубина отверстия зависит от высоты той части кольца, которую необходимо закрепить в основании, а с учетом того, что кольцо должно выступать из основания приблизительно на $0,1 \div 0,2$ мм для избегания подсыпки, которая возможна, если корпус не будет лежать на кольце.

Так как в основание впрессовываются два штифта необходимо предусмотреть для них сквозные отверстия. А также толщину стенки всего основания предпочтительно проектировать 5-7 мм, все остальные размеры являются конструктивными. На рисунке 1 представлена 3D модель основания.

Каждый из штифтов имеют свою роль при прессовании и при этом они обязательно должны быть впрессованы в основание до упора. Первый штифт необходим при прессовании столбика и поэтому делается прямым, а второй штифт необходим при прессовании дугового канала и поскольку в месте его установки нам необходимо, чтобы при прессовании формировалось углубление, наконечник штифта имеет конусообразную форму. На рисунке 2 представлена 3D модель основания со штифтами.

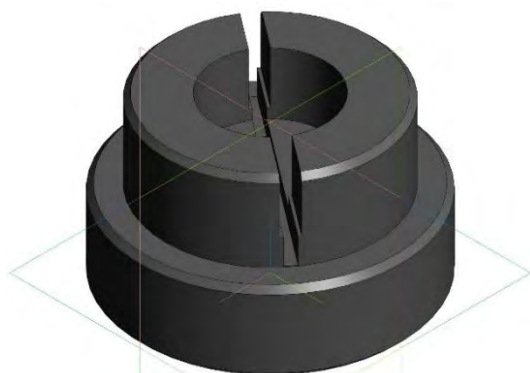


Рисунок 1 – 3D модель основания для прессования состава во времязадающее кольцо ПИМа

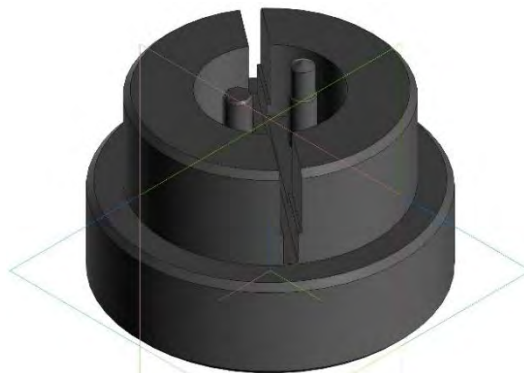


Рисунок 2 – 3D модель основания со штифтами для прессования состава во времязадающее кольцо ПИМа

Корпуса прессовой оснастки для прессования столбика или для прессования дугового канала служат для засыпки состава и для направления пуансона. Отверстие в корпусе для прессования задается примерно на 0,1 мм меньше номинального отверстия во времязадающем кольце, чтобы избежать зарубания пуансоном стенок отверстия. Предпочтительно на наружном диаметре сделать рифления для удобства при снятии корпуса с основания. Корпус прессовой оснастки для прессования столбика отличается от второго тем что, в момент прессования столбика необходимо обеспечить непопадание состава в сам дуговой канал, для этого в корпусе у основного рабочего отверстия делается выступ по форме дугового канала. Очень важно правильно подобрать угол скоса для выступа, чтобы избежать отрыва состава при

снятии корпуса. На рисунке 3 представлена 3D модель корпуса для прессования столбика.

На рисунке 4 представлена 3D модель корпуса для прессования дугового канала.

Для обеспечения неподвижности корпуса относительно основания в два соосных отверстия во времязадающем кольце впрессовываются штифты, а для обеспечения лучшей посадки корпуса на основание необходимо напрессовать кольцо. Таким образом, облегчается изготовление самого корпуса. На рисунке 5 представлена 3D модель корпуса для прессования столбика в сборе с кольцом и двумя штифтами. На рисунке 6 представлена 3D модель корпуса для прессования дугового канала в сборе с кольцом и двумя штифтами.

Пуансон служит для прессования состава в отверстие кольца, поэтому рабочая поверхность пуансона должна быть полирована. К пуансону для прессования столбика есть главное требование: рабочий диаметр пуансона равен диаметру отверстия на корпусе. На рисунке 7 представлена 3D модель пуансона.

Пуансон для прессования состава в дуговой канал времязадающего кольца, должен повторять профиль дугового канала. На рисунке 8 представлена 3D модель пуансона.

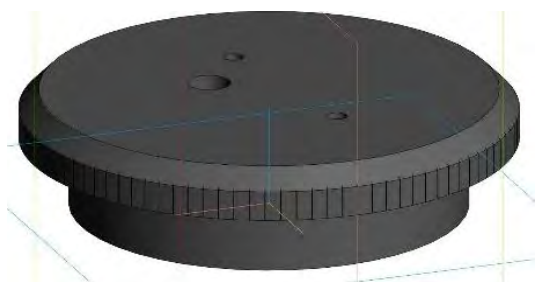


Рисунок 3 – 3D модель корпуса прессовой оснастки для прессования столбика во времязадающее кольцо ПИМа.

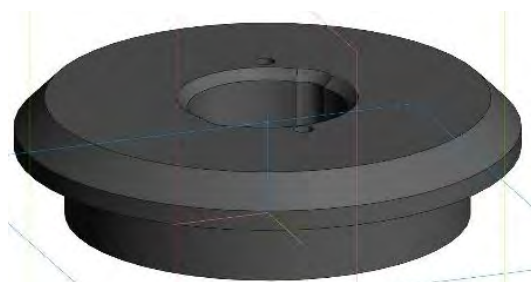


Рисунок 4 – 3D модель корпуса прессовой оснастки для прессования дугового канала времязадающего кольца ПИМа

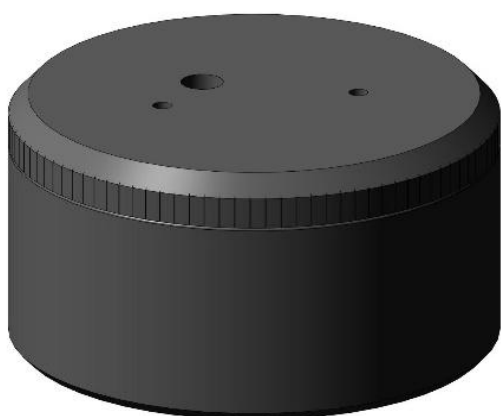


Рисунок 5 – 3D модель корпуса прессовой оснастки для прессования столбика во времязадающее кольцо ПИМа в сборе с двумя штифтами и кольцом

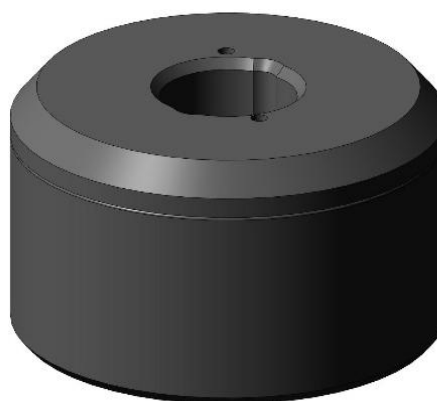


Рисунок 6 – 3D модель корпуса прессовой оснастки для прессования дугового канала времязадающего кольца ПИМа в сборе с двумя штифтами и кольцом



Рисунок 7 – 3D модель пуансона прессовой оснастки для прессования столбика во времязадающее кольцо ПИМа



Рисунок 8 – 3D модель пуансона прессовой оснастки для прессования дугового канала времязадающего кольца ПИМа

Заключение

Проведенный анализ основных условий обеспечения качества при проектировании и изготовлении прессовой оснастки для времязадающего кольца, позволил разработать, изготовить и испытать прессовую оснастку с учётом условий, влияющих на качество как самой оснастки, так и на сам процесс прессования дугового канала и пиротехнического столбика времязадающего кольца в соответствии с конструкторской документацией и техническими условиями, что обеспечит качество изготовления всего изделия в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк, Д. П. Особенности процесса прессования, оказывающие существенное влияние на состав и содержание требований к технологической оснастке для прессования спецсостава в дуговой канал кольца взрывателя / Д. П. Гасюк, К. С. Гречина // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 450-454.

2. «Руководство по проектированию сборок для запрессовки дуговых каналов», АО «НПО «Поиск», 1970 г.

K.S. Grechina^{1,2}, D.V. Lyakhovenko²

¹Peter the Great ST. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia, grechina_ks@npo-poisk.ru

²JSC «NPO «Poisk», Murino, Russia

BASIC CONDITIONS FOR QUALITY ASSURANCE IN THE DESIGN AND MANUFACTURE OF PRESS TOOLING FOR THE TIMING RING

Abstract

The paper examines the basic conditions for quality assurance in the design and manufacture of press tooling of timing rings for military equipment, as well as the factors affecting the quality of press tooling. This work resulted into a set of design documentation for press tooling of the timing ring, creation of the experimental samples, and the proposed technical solutions were tested in the conditions of its further operation.

Keywords: safety and actuating mechanism, technological process, explosive substance, press tooling, the timing ring.

Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия, snv.ktn@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДАТЧИКОВ ИНСТРУМЕНТАМИ «ШЕСТЬ СИГМ»

Аннотация

В работе приведены результаты совершенствования процесса «Сборочное производство датчиков» путем применения статистических методов менеджмента качества, в т.ч. «DMAIC» системы «Шесть сигм». Проведен анализ коренной причины некомплектных заказов. Разработан стандарт организации «Порядок приема и размещения заказов в производство» и методика «Идентификация и порядок решения выявленных проблем». Внедрение результатов работы позволило достичь снижения некомплектных заказов, процесс стабилизировался по сети поставок и производству, стал в устойчивом состоянии с уровнем влияния в пределах 10%, уменьшились потери и переделки брака, снизилось число рекламаций.

Ключевые слова: процесс сборочного производства, система «Шесть сигм», стандарт организации, методика, совершенствование, внедрение.

Введение

Ключевой проблемой развития отечественного машиностроения на современном этапе является проблема достижения мирового уровня качества, надежности и безопасности изделий [1]. Конкуренция товаров и услуг как внутри страны, так и на мировом рынке заставила многих российских производителей обратиться к статистическим методам управления и контролю качества выпускаемой продукции, давно получившим признание во всех промышленно развитых странах. Статистические методы признаются важным условием рентабельного управления производством и эффективным средством повышения качества продукции [2].

Освоению данных методов посвящена настоящая научно-исследовательская работа (НИР) кафедры технологии автоматизированного машиностроения (ТАМ) ЮУрГУ на ЗАО ПГ «Метран».

Благодаря проведенной НИР на предприятии происходит активное внедрение системы «Шесть сигм», которая включает в себя все наиболее известные статистические методы, а благодаря методу «DMAIC», который является инструментом вышеназванной системы, процесс их применения становится более осмысленным, структурированным и последовательным. Это приводит к сокращению затрат, а, следовательно, к увеличению прибыли и повышению конкурентоспособности продукции за счет сокращения количества дефектной.

Проведенный анализ на собраниях групп из представителей персонала разных отделов завода выделил проблемы предприятия и был составлен рейтинг основных проблем со значениями от 1 до 5. Наиболее часто повторяющиеся и наиболее значимыми были определены проблемы с рейтингом 5, а именно, – организация рабочего процесса на сборочном производстве. Было определено, что проблемы с

рейтингом 5 приводят к потере рабочего времени (измеряемого в человеко-часах и рублях) и снижению комфортности работы.

Исходя из вышеизложенного, для решения наиболее существенной проблемы, связанной с потерей времени и денежных средств, а также лояльности потребителей, определены цель и задачи настоящего исследования.

Цель настоящего исследования – совершенствование процесса системы менеджмента качества «Сборочное производство датчиков» путем применения инструментов концепции «Шесть сигм» на ЗАО «ПГ «Метран».

Для достижения поставленной цели был определен ряд задач:

- 1) анализ состояния и диагностика проблем предприятия;
- 2) сравнение отечественных и передовых зарубежных технологий и решений;
- 3) совершенствование процесса «Сборочное производство датчиков»;
- 4) разработка стандарта организации и методики по совершенствованию процесса;
- 5) освоение результатов НИР.

Методы

Проведенный анализ и диагностика проблем завода позволила определить наиболее существенную на текущий момент проблему – управление процессом сборочного производства предприятия.

Были рассмотрены передовые отечественные и зарубежные методы и технологии для решения поставленных задач, рассмотрены их достоинства и недостатки. Для решения выделенной проблемы предприятия выбрана концепция «Шесть сигм», которая, по мнению группы, являлась наиболее подходящей к условиям ЗАО «ПГ «Метран» и позволяющей усовершенствовать процесс предприятия.

«Шесть сигм» – это концепция совершенствования бизнеса, которая стремится найти и исключить причины ошибок или дефектов в бизнес-процессах путем сосредоточения на тех выходных параметрах, какие оказываются критически важными для потребителя [3]. Для производства бездефектной продукции необходимо, чтобы процесс был спроектирован таким образом, чтобы приемлемыми оказались характеристики, отклоняющиеся от среднего значительно на большее число раз, нежели значения стандартных отклонений ($\pm 3\sigma$) [4].

В рамках концепции «Шесть сигм» цикл «Шухарта-Деминга», известный как PDCA (Планируй, делай, проверяй, внедряй), трансформировался в цикл МАІС: Measure (Измеряй); Analyze (Анализируй); Improve (Улучшай); Control (Управляй), дополнился стадией Define (Определяй) и реализуется как «DMAIC» [5-6].

В инструментарий «Шесть сигм» входит множество статистических методов: контрольные карты, контрольные листки, диаграммы Исикавы, диаграммы Парето, карты процесса, графики Ганта, гистограммы и многие другие. Для каждого этапа метода «DMAIC» системы «Шесть сигм» характерно использование определенных статистических методов [7-8].

Результаты и обсуждение

Для достижения цели настоящей НИР, соответственно, при сокращении отклонений в ходе производственного процесса, в плановом порядке проводилось осуществление последовательных шагов DMAIC.

На первый этап Define стояла задача четкого определения проблемы. Инструментами этапа «Определение» служили собеседование группы сотрудников и

«мозговой штурм». На заводе при данной НИР применялись два способа проведения «мозгового штурма»: неструктурированный, когда идет свободное обсуждение для генерации идей в больших группах; и структурированный, когда в маленьких, целенаправленных группах идет контролируемая генерация идей. Были определены основные параметры проекта совершенствования, к которым относятся описание проблемы, главных целей и задач проекта, финансовой оценки результатов, сроков этапов, состава участников команды и т.п.

Продукция, прошедшая полный цикл сборки, отправляется на склад готовой продукции (СГП) и там укомплектовывается в соответствии с заказом потребителя. Было установлено наличие некомплектных заказов, невозможность отгрузки заказчику, что увеличивают запасы склада, простои значительно отражаются на бюджете предприятия и оказывают отрицательное влияние на лояльность заказчиков.

Была определена команда проекта, включающая в себя директора производства, начальника департамента планирования, начальника отделения поставок, зам. директора сети поставок, начальника отдела закупа, начальника отдела запуска, управляющего по запасам, менеджера и руководителя группы «Статистика и торговое соответствие» (СиТС), управляющего проекта «Leanoffice», зам. главного инженера, главного инженера и генерального директора.

Было дано четкое обоснование проблемы – некомплектный заказ – это заказ, в котором находящаяся на складе готовой продукции (СГП) часть продукции не может быть отгружена заказчику, в связи с отсутствием других частей продукции в этом заказе. Начальной границей рассматриваемой проблемы является сам прием заказа, а конечной – переход заказа из некомплектного в комплектный.

Определен фактический показатель – средний уровень некомплектных заказов, увеличившийся на 61% за последние полгода. Сумма некомплектных заказов снижает показатель оборачиваемости и увеличивает запасы склада готовой продукции.

Цель осуществления данного этапа – иметь запасы некомплектных заказов на конец периода не более одного дня.

На втором этапе Measure осуществлялась количественная оценка и понимание текущего процесса, а именно: осуществлялся сбор информации, характеризующей природу и масштаб проблемы; проводились специальные измерения тех параметров процесса, по которым такие данные отсутствовали. Текущий процесс был описан алгоритмом, паспортом процесса, визуализирован IDEF-моделями «как есть». Были наглядно представлены данные в виде гистограмм, диаграмм Парето, определены существующие оценочные показатели действующего процесса и их критерии.

Был определен процесс «Как он есть», учтены факторы, на него влияющие. На рисунках 1, 2 и 3 даны примеры методов визуализации процесса.

Анализ диаграмм Исикавы выявил основные влияющие на проблему блоки: центр поддержки заказчиков (ЦПЗ), сеть поставок, само производство. По результатам анализа причинно-следственных диаграмм классифицируются факторы влияния на некомплектные заказы и определяются зоны ответственности.

Была произведена классификация причин по местам возникновения.

1. Центр поддержки заказчиков: приход закупа раньше утвержденной даты; задержка поступления закупа; изготовление раньше плановой даты по просьбе центра поддержки заказчика (ЦПЗ); согласование на частичную отгрузку; товар в пути, изделия на доработке в производстве; заказаны не соответствующие параметры.

2. Производство: выравнивание производства по пропускной мощности производства; выход годных с первого раза датчиков температуры и давления всего

процесса (FPY – FirstPassYield); брак в производстве, в том числе по intercompany; ошибка отдела запуска; технологические ошибки в заказе; не подтверждение приходов СГП день в день.

3. Сеть поставок: недопоставка комплектующих; недопоставка готовой продукции; поставка бракованных комплектующих; разные плановые сроки выхода заказа.

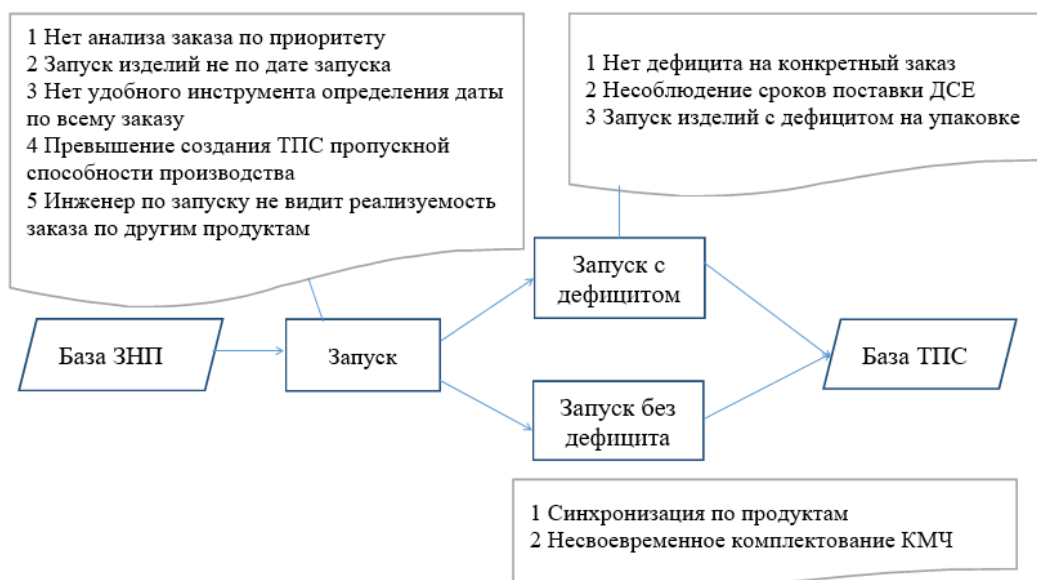


Рисунок 1 – Диаграмма последовательности процесса «Сборочное производство датчиков» (операция «Запуск»)



Рисунок 2 – Граф связей процесса «Сборочное производство датчиков» (операция «Сборка, упаковка, отгрузка на СГП», центральный склад готовых деталей (ЦСГД))

Составлена диаграмма влияние на некомплектные заказы количества причин из блоков «ЦПЗ», «Производство» и «Сеть Поставок» в зависимости от периода.



Рисунок 3– Диаграмма Исикавы «Некомплектные заказы на СГП»

Разработанные оценочные показатели рассматриваемого процесса представлены тремя группами показателей: системными, индивидуальными и комплексными.

1. В системных показателях процесса основным является «Уровень обслуживания клиентов по запрошенной дате» (PDSL – Promisedateservicelevel). Данный показатель позволяет определить процент соблюдения запрошенных покупателями сроков и объемов поставки полностью укомплектованной продукции.

2. Следующий системный показатель процесса «Сборочное производство датчиков» – это «Выход годных с первого раза датчиков температуры и давления всего процесса» (FPY – Firstpassyield). FPY определяется по формуле (1):

$$FPY = FPY_f \times K_m \times 100\%, \quad (1)$$

где K_m – коэффициент влияния, определяемый путем деления общего количества изделий, прошедших мониторинг на количество изделий конкретных моделей, прошедших мониторинг; FPY_f – выход годных с первого раза на финальной сборке (за период), определяется по формуле (2):

$$FPY_f = FPY_1 \times FPY_2 \times \dots \times FPY_i, \quad (2)$$

где FPY_i – выход годных с первого раза на каждой операции в процессе (за период), определяется по формуле (3):

$$FPY_i = \frac{N_g}{N_{i0}}, \quad (3)$$

где N_g – количество годных изделий, вышедших с первого раза на данной операции в контролируемый период; N_{i_o} – общее количество изделий, попавших на данную операцию в контролируемый период.

При этом суммируются все изделия разных моделей, вышедшие с одной операции, помноженные на коэффициенты влияния, учитывающих долю каждого вида моделей в общем количестве контролируемых изделий.

3. Системный показатель Outofboxquality (OBQ) – это «Количество несоответствий, выявленных на финальной сборке и отнесенных к единице продукции выпущенной за отчетный период». Единицей измерения показателя служит параметр «Количество отказов на миллион» (PPM – Penalizationpermillion). Показатель рассчитывается по формуле (4):

$$OBQ_p = \frac{N_n \times 1000\ 000}{N_o}, \quad (4)$$

где N_n – количество выявленных несоответствий в контролируемый период; N_o – количество продукции, выпущенной в контролируемый период.

Суммируются все несоответствия, выявленные на каждой единице продукции.

4. Системный показатель – затраты на брак. Они определяются, исходя из отчетов по затратам на качество, которые составляются ежемесячно.

В дополнение к существующим контролируемым параметрам рассматриваемого процесса для применения разработаны следующие системные показатели: 1- количество возвратов и рекламаций на продукцию процесса/количество проданной продукции (раз в месяц, %); 2 -эффективность оборудования; 3- стабильность процесса.

Нормативное значение для первого показателя не должно превышать 5%. Для второго показателя это значение не должно быть меньше 0,75. Стабильность процесса характеризуется невыходом измеренных значений за пределы контрольных границ и означает, что процесс «налажен».

Эффективность оборудования (E_o) предлагается рассчитывать по формуле (5):

$$E_o = K_v \times K_p \times K_g, \quad (5)$$

где K_p – текущий выпуск/запланированный выпуск; K_v – коэффициент загрузки оборудования по времени; K_g – коэффициент выхода годных датчиков.

Показатель стабильности процесса показывает величину, которая характеризует свойство технологического процесса обеспечивать изготовление продукции в течение определенного времени в соответствии с требованиями нормативно-технической документацией. Для расчета показателя стабильности процесса используются статистические методы.

Статистическое регулирование технологических процессов производилось по количественному признаку. Стабильность процесса оценивалась на основе выборок (25-50) с использованием контрольных карт Шухарта.

На третьем этапе Analyse была осмыслена вся информация и до конца исследованы причинно-следственные связи, вызывающие дефекты, задержки процесса, выявлялись основные причины проблем в обеспечении качества, после чего правильность выбора этих причин проверялась при помощи специальных инструментов анализа данных, а именно использовались эксперименты и метод «проб и ошибок». Таким образом, в ходе анализа отчетов по подразделениям за 1 квартал 2022 года, было посчитано процентное соотношение причин, влияющих на проблему некомплектных заказов на СГП. Уровень влияния показан на рисунке 4.

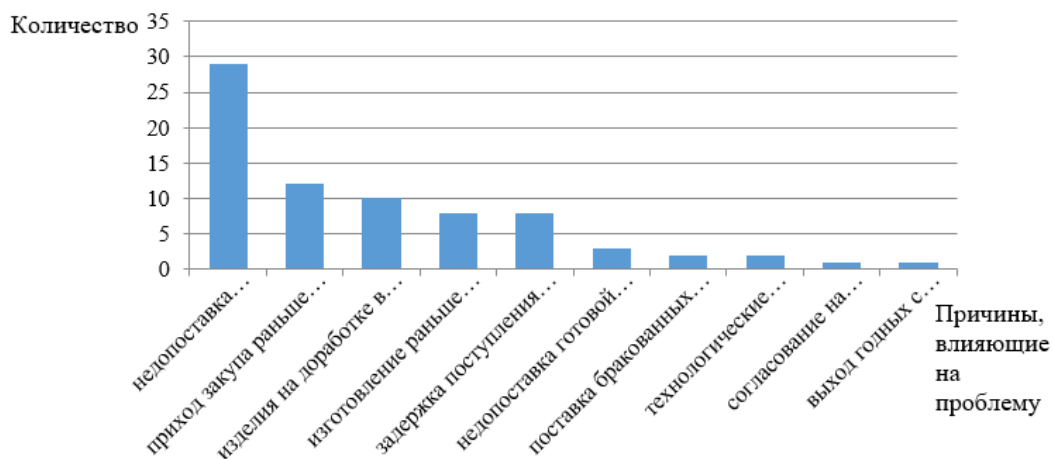


Рисунок 4 – Диаграмма Парето «Влияние первопричин на выбранную проблему»

Анализ показал, что наиболее сильное влияние на появление некомплектных заказов оказывает недопоставка комплектующих, а причинами являются:

- поставка бракованных комплектующих, которые не прошли приемочный контроль и не были допущены в производство;
- несоответствие реальных сроков закупа продукции с плановыми;
- халатность поставщиков, не поставляющих продукцию в срок.

Разработанные причинно-следственные диаграммы по факторам: приход закупа раньше утвержденной даты, задержка поступления закупа и изготовление раньше плановой даты по просьбе ЦПЗ, согласование на частичную отгрузку позволили углубиться в суть проблем. Выделены наиболее значимые причины: недостаточные мощности поставщика; отсутствие комплектующих у поставщика; досрочная поставка продукции по запросу; отсутствие оплаты; пропуск прихода продукции; сдача комплектного заказа частично.

На четвертом этапе Improve проводился «мозговой штурм», определялась возможность решений, которые позволят уменьшить, либо совсем устранить причину появления проблемы, был осуществлен выбор лучших решений; проведена оценка рисков и стоимости улучшений. Была проведена локальная контролируемая пробная проверка решений для определения их эффективности. Команда пришла к простым и наиболее оптимальным в каждой ситуации решениям, примеры даны в таблицах 1, 2.

На пятом этапе Control был разработан план коррекции измененного процесса, задокументированы изменения и список контролируемых параметров. Выбраны способы измерения-контроля, чтобы либо минимизировать проблему, либо сразу ее устранять, а именно: система «РокеУоке» и «Контрольные карты»; разработаны и обновлены процедуры, установлено измерение процесса для мониторинга; определены и назначены ответственные за каждый участок процесса; проведено обучение персонала работе в усовершенствованном процессе.

В результате завершения настоящей НИР и внедрения улучшений за короткий период произошло снижение некомплектных заказов на СГП. Процесс стабилизировался. По сети поставок и производству процесс стал в устойчивом состоянии с уровнем влияния в пределах 10%. По ЦПЗ стали наблюдаться колебания меньшего размаха, но необходимы дополнительные мероприятия. Была дана рекомендация – продолжить НИР по процессам ЦПЗ до стабильного уровня.

Таблица 1 – Мероприятия по решению проблем по блоку «Производство»

Фактор влияния	Причина	Улучшение	Ответственный
Заказ сдан на СГП некомплектно	Запуск заказа с дефицитом ДСЕ	Изменение процедуры запуска с целью исключения запуска заказов с дефицитом	Начальник отдела запуска
		Устранение дефицита	Зам. директора сети поставок

Таблица 2 – Мероприятия по решению проблем по блоку «ЦПЗ»

Фактор влияния	Причина	Улучшение	Ответственный
Продукция по комплектному заказу сдана частично; продукция сдана поздно на СГП. Пропущен приход, ошибочная частичная поставка комплектного заказа; Ускоряли комплексный заказ, пришел только закуп или продукция собственного производства	Персонал не обучен процессам управления заказами	Обучение КА работе с ускоряемыми заказами, изменению и согласованию новых дат после получения Спецификации от отдела закупа продукции	Управляющий проектом "Lean office" Менеджер группы СИТС
		Разъяснение правил по частичной и комплектной отгрузке ускоряемых заказов	Руководитель группы СИТС
Не поступила оплата, заказчик передумал грузить частично	Не управляемое событие	-	-
Товары в пути учитываются в некомплектных заказах	Некорректное отнесение товаров, находящихся в пути и на доработке в некомплектные	Исключить товары в пути из некомплектных	Менеджеры
		Принять решение, к какой категории относить товары, находящиеся на доработке в производстве	Лидер проекта
Дополнительные мероприятия по блоку «ЦПЗ»			
Отсутствие комплектующих на заводе изготовителе	Не работает процедура замедления заказа	Повторно разъяснить КА процедуру замедления заказов	Менеджер группы СИТС
Изделия на доработке в производстве	Отсутствие информации о приходе заказов на доработку	Информацию по прибытию заказов выкладывать на сетевом ресурсе	Начальник отдела закупа

Команда проекта «Шесть сигм» передала улучшенный процесс его владельцу таким образом, чтобы исключить возвращение процесса в прежнее состояние, а именно: определены ответственные за сбор и анализ информации (с определением показателей) для отслеживания хода процесса после проведения улучшений и за систему раннего оповещения при повторном проявлении проблемы; определен план реагирования (для ситуации, которая вышла из-под контроля). Задokumentированы требования за персоналом заводской лаборатории по проведению постоянных измерений и сравнения «до и после», а также по ведению статистического контроля.

Разработана методика для применения к процессу «Сборочное производство датчиков «Идентификация и порядок решения выявленных проблем». Методика устанавливает последовательность действий и решений, необходимых для эффективного и результативного разрешения выявленных проблем, связанных с процессом «Сборочное производство датчиков», а также определяет основные положения по применению статистических методов в данном процессе. Методика базируется на методе DMAIC.

Для распределения обязанностей при осуществлении процесса разработана матрица ответственности.

Разработан стандарт организации «Порядок приема и размещения заказов в производство», устанавливающий порядок получения, обработки и выдачи в сборочное производство заказов на изготовление продукции.

В стандарте организации и методике представлены блок-схема, алгоритм процесса и матрица распределения ответственности. Стандарт организации и методика апробированы и внедрены на предприятии.

Заключение

В результате выполненной НИР достигнута цель – совершенствование процесса системы менеджмента качества «Сборочное производство датчиков» путем использования инструментов концепции «Шесть сигм» на ЗАО «ПГ «Метран».

Для достижения поставленной цели были решены поставленные задачи. Проведен анализ состояния дел на предприятии, изучена диагностика проблем завода. Из рассмотренных и проанализированных наиболее известных и применяемых в настоящее время систем совершенствования, выбрана наиболее подходящая для предприятия концепция «Шесть сигм».

Осуществлено совершенствование процесса «Сборочное производство датчиков». Составлен паспорт процесса, диаграммы последовательности, причинно-следственные диаграммы, дополнены существующие оценочные показатели процесса вновь разработанными и их аналитическими моделями расчета, установлены количественные критерии разработанных показателей, что позволило заметно упростить реализацию и понимание усовершенствованного процесса «Сборочное производство датчиков». Используя метод DMAIC поэтапно проведен анализ коренной причины некомплектных заказов на складе готовой продукции. Рекомендованы улучшающие мероприятия по блокам, влияющим на проблему.

Разработан стандарт организации «Порядок приема и размещения заказов в производство». Разработана методика «Идентификация и порядок решения выявленных проблем», устанавливающая последовательность действий и решений, необходимых для эффективного и результативного разрешения разного рода проблем, связанных с процессом сборочного производства датчиков, а также

определяющая основные положения по применению статистических методов в данном процессе.

Результаты проведенной НИР позволили достичь уменьшения потерь из-за сорванных графиков поставок комплектной продукции на 3%; уменьшения потерь из-за дефектов закупаемых материалов на 2%; предотвращение денежных выплат по рекламациям и штрафам на 1%; уменьшение переделки брака на 1%; уменьшение числа рекламаций на 2%.

Результаты НИР на ЗАО «ПГ «Метран» имеют практическую ценность, апробированы и внедрены на предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pande, P. Holpp, L. What is Six Sigma? - New York, NY.- McGraw-Hill, 2002.- 146 p.
2. Каптерев, А.И. Концепция управления эффективностью бизнеса 6 σ и ее применение в России/ А. И. Каптерев. - М.: [б. и.], [б. г.]. - 5 с.
3. Жулинский, С.Ф. Статистические методы в современном менеджменте качества - М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2001. - 208 с.
4. Hoskins, J., Stuart, B., Taylor, J. Statistical Process Control.-Motorola, 2001.-31 p.
5. Вэйдер, М. Инструменты бережливого производства: мини-руководство по внедрению методик бережливого производства / Майкл Вэйдер; пер. с англ. - М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. - 125 с.
6. Куприянова, Т.М. Как «выращивается» бережливое производство / Т.М. Куприянова, В.Е. Растимешин // Методы менеджмента качества. - 2007. - №8. - С. 8-12.
7. Вумек Джеймс П., Джонс Дэниел, Т. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / пер. с англ. - 2-е изд. - М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. - 473 с.
8. Коробов, А.И. Анализ отказов электронной аппаратуры // Методы менеджмента качества. - 2005. - № 6 (12). - С. 36-38.

N.V. Syreishchikiva, V.I. Guzeev
South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia, snv.ktn@mail.ru

PERFECTION OF ASSEMBLY MANUFACTURE OF GAUGES TOOLS «SIX σ »

Abstract

In work results of perfection of process «Assembly manufacture of gauges» by application of statistical methods of a quality management and method DMAIC of system Six σ are resulted. The analysis of the radical reason of incomplete orders in finished goods warehouse is carried out. The organisation standard «the Order of reception and placing of orders in manufacture» both a technique «Identification and an order of the decision of the revealed problems» is developed. Introduction of results of work has allowed to reach decrease in incomplete orders, process was stabilised on a network of deliveries and manufacture, became in a steady condition with level of influence within 10 %, losses and marriage alterations have decreased, the number of claims has decreased.

Keywords: process of assembly manufacture, system Six σ , the organisation standard, a technique, perfection, introduction.

Д.П. Гасюк, А.Н. Усанова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА СОТРУДНИКА ОТК В УСЛОВИЯХ МЕЖОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Аннотация

В работе рассмотрены порядок проведения аттестации рабочего места сотрудника отдела технического контроля (ОТК), принципы, участники аттестации и критерии оценивания. В условиях масштабирования производства возникает потребность в улучшении качества производимой продукции, для чего требуется организация дополнительной точки межоперационного контроля. В результате проведенного анализа условий и факторов проведения технического контроля качества продукции разработана таблица с критериями оценки рабочего места сотрудника ОТК, которая позволит объективно провести проверку готовности к работе.

Ключевые слова: рабочее место, аттестация, аудит, сотрудник ОТК.

Введение

В настоящее время существенная доля предприятий машиностроительной отрасли имеет значительный опыт деятельности на российском рынке и сформированную систему межоперационного контроля изделий. Однако, характерной чертой современного этапа развития отечественного машиностроения является тот факт, что наблюдается довольно большое количество молодых производств, которым менее десяти лет. Такие предприятия ещё не успели внедрить накопившийся опыт организации системы межоперационного контроля, но проявляют стремление к улучшению качества производимой продукции.

В настоящее время технический контроль рассматривается как равноправный и неотъемлемый элемент системы управления качеством продукции на предприятии, и поэтому основной задачей технического контроля является предупреждение выпуска дефектной продукции посредством получения информации о ходе (состоянии) соответствующего технологического процесса или его результатах для последующей выработки решений об управляющих воздействиях [1].

При организации новой контрольной точки на предприятии следует проводить аттестацию рабочего места специалиста отдела технического контроля (ОТК). Система аттестации – это совокупность участников системы, принципов, условий, требований и правил, установленных для функционирования системы и проведения аттестации. Аттестация рабочего места сотрудника ОТК содержит мероприятия по аттестации персонала, утверждения типа и поверки средств измерения, первичной и периодической аттестации испытательного и контрольного оборудования, аттестация методик измерений и испытаний и проверке готовности рабочего места к осуществлению контрольных операций. Эксперт системы аттестации – физическое лицо, привлекаемое к проведению проверок соответствия. В данном случае им будет являться обученный и аттестованный старший мастер ОТК.

Принципы системы аттестации рабочего места: единство и достаточность требований, условий и правил проведения аттестации контрольной точки; независимость эксперта от заявителей аттестации; компетентность, объективность и беспристрастность проводящего аттестацию; обоснованность результатов аттестации и ответственность за их достоверность.

Состав участников системы аттестации рабочего места сотрудника ОТК: участниками системы аттестации являются аттестационный пункт, мастер и сотрудник ОТК.

Методы

Для достижения поставленной задачи аттестации рабочего места специалиста (контрольной точки) ОТК применяют отработанные принципы Аудитирования. Аудитирование является средством оценки результативности системы менеджмента качества (СМК) с целью выявить риски и установить, выполняются ли требования [2-5]. Для того, чтобы определить эффективность проведения аудита, необходимо собрать материальные и нематериальные свидетельства. По результатам аудита, при выявлении несоответствий, составляются корректирующие и предупреждающие действия в виде плана мероприятий, выполнение которых приводит к улучшению системы в будущем.

В качестве аудитора выступает обученный и аттестованный старший мастер ОТК. Аттестация рабочего места специалиста ОТК проводится по методике аттестации, содержащей последовательность процедуры аттестации и критерии оценки готовности контрольной точки.

На рабочем месте должна присутствовать разметка рабочих зон, не должно быть личных вещей, проведена сортировка инструмента для удобства и быстроты использования. Кроме того, обеспечиваются в полном объеме мероприятия безопасности труда и охраны производственной среды.

Первым этапом аттестации является подтверждение компетентности сотрудника ОТК и оценка его специальной экипировки (сотрудник должен быть в специализированной одежде, предусмотренной на предприятии), иметь при себе средства индивидуальной защиты (перчатки, очки).

Вторым этапом является оценка наличия и состояние испытательного и контрольного оборудования. Необходимо убедиться в исправной работе данного оборудования и наличии протоколов периодической аттестации. Оценить обеспечение точности измерений и допустимой погрешности измерений технических характеристик объекта контроля согласно техническим условиям и условиям контракта.

На третьем этапе проверке подлежат все средства контроля, такие как микрометры, нутромеры, штангенциркули, линейки, индикаторы часового типа. Средства измерений должны соответствовать заданным нормированным метрологическим характеристикам. Также все шаблоны, калибры шлицевые и резьбовые, калибры-пробки, калибры-скобы, калибры-кольца должны быть откалиброваны.

Для проведения внутренней аудиторской проверки была разработана таблица для удобства аттестации рабочего места с критериями аттестации (Таблица 1 – Критерии аттестации рабочего места сотрудника ОТК).

Под определением «инструменты (или оборудование) прошли проверку на соответствие точности результатов измерений» подразумевается сверка показаний

средства контроля с паспортными данными или со значениями, зафиксированными в ТУ, контрактах или соответствующих ГОСТ.

Таблица 1 – Критерии аттестации рабочего места сотрудника ОТК

Критерии аттестации	Оценка («+» - выполняется, «-» - не выполняется)
Присутствует разметка рабочих зон (Стеллажи, контрольные столы обозначены желтым контуром; красная зона – зона входа продукции на контроль; зеленая зона – зона выхода продукции).	+
На рабочем месте нет личных вещей, проведена сортировка инструмента.	+
Отсутствуют скользкие и грязные места на полу, тумбах и стеллажах от СОЖ и масла.	+
Сотрудник ОТК обеспечен СИЗ и находится в рабочей одежде на рабочем месте.	+
Контрольное оборудование находится в рабочем состоянии, подтверждена точность и погрешность оборудования.	+
Измерительные инструменты прошли проверку на соответствие точности результатов измерений.	+
Калибры, шаблоны прошли проверку на износ.	+

В качестве примера рассмотрим Штангенциркуль ШЦ-II-250-0,05 ГОСТ 166-89. Данный штангенциркуль типа Пс диапазоном измерения от 0 до 250 мм и значением отсчета по нониусу 0,05 мм. По ГОСТ 166-89 смотрим Технические требования. Для контролируемого размера 60 мм предел допускаемой погрешности: по нониусу $\pm 0,05$. За измеряемую длину принимают номинальное расстояние между измерительными поверхностями губок. У штангенциркулей с одним нониусом погрешность проверяют по губкам для измерения наружных размеров. При сдвигании губок штангенциркулей до их соприкосновения смещение нулевого штриха нониуса допускается только в сторону увеличения размера. Допуск плоскостности и прямолинейности измерительных поверхностей должен составлять 0,01 мм на 100 мм длины большей стороны измерительной поверхности штангенциркулей. При этом допускаемые отклонения плоскостности и прямолинейности измерительных поверхностей должны быть: 0,004 мм - для штангенциркулей со значением отсчета по нониусу, с ценой деления шкалы и шагом дискретности не более 0,05 мм и длиной большей стороны измерительной поверхности менее 40 мм; 0,007 мм - для штангенциркулей со значением отсчета по нониусу и с ценой деления шкалы 0,1 мм и длиной большей стороны измерительной поверхности менее 70 мм. Допуск прямолинейности торца штанги штангенциркулей типов I и T-I должен составлять 0,01 мм. По краям плоских измерительных поверхностей в зоне шириной не более 0,2 мм допускаются завалы. Остальные параметры см. по ГОСТ 166-89 [6].

Методика проверки штангенциркуля и оформление результатов проверки регламентированы ГОСТ 8.113-85 [7].

Результаты и обсуждение

По разработанному алгоритму аттестации была проведена аттестация рабочего места сотрудника ОТК. Результаты были зафиксированы в таблице. Все критерии отмечены знаком «+». Следовательно, рабочее место сотрудника ОТК готово к работе. Мастер расписался в протоколе об аттестации о соответствии данного рабочего места критериям аттестации.

Заключение

Разработанный и представленный в статье чек-лист позволяет беспристрастно и объективно провести аттестацию рабочего места контролёра ОТК (контрольной точки) на машиностроительном предприятии. Данный порядок аттестации применим к любому типу машиностроительного производства и объёму выпускаемой продукции. При некоторой доработке, подходит для заводов различных отраслей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войтоловский, В.Н. Организация технического контроля на промышленных предприятиях / В.Н. Войтоловский, В.Н. Федотов. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 214 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь», 48 с.
3. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.
4. Гасюк Д.П., Вырвич А.А., Ватулин А.И., Есин Б.В., Прилепа К.Н. Управление рисками аудита систем менеджмента качества // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: Научные труды Высшей школы машиностроения.- Санкт-Петербург, 2022. С. 228-237.
5. Варакута, С.А. Управление качеством продукции: учеб. пособие / С. А. Варакута – М.: ИНФРА - М, 2006. – 207 с
6. ГОСТ 166-89. «Штангенциркули. Технические условия», 12 с.
7. ГОСТ 8.113-85. «Государственная система обеспечения единства измерений. Штангенциркули. Методика поверки», 18 с.

D.P. Gasyuk, A.N. Usanova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

PROCEDURE FOR CERTIFICATION OF THE WORKPLACE AT THE CHECKPOINT OF THE TECHNICAL CONTROL DIVISION FOREVER UNDER THE CONDITIONS OF INTEROPERATIONAL CONTROL

Abstract

The paper considers the procedure for attestation of a workplace at a control point, principles, participants in attestation and evaluation criteria. In the context of scaling production, there is a need to improve the quality of products and products, which requires the organization of an additional point of interoperational control. As a result of the work done, a checklist was developed with key criteria for assessing the workplace of a QCD employee, which will allow an objective check of the readiness of the checkpoint for work.

Keywords: control point, attestation, audit, QCD employee.

Д.П. Гасюк, И.В. Узлов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, uzlovvana@yandex.ru

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЕЁ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В УСЛОВИЯХ ПОЗАКАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

В статье рассмотрены особенности применения неопределённости измерений в машиностроительном производстве.

Ключевые слова: неопределённость измерений, приёмочные границы.

Введение

В условиях рыночных отношений наиболее важным фактором привлечения внимания потребителя является качество продукции, которое определяет конкурентоспособность организации, её успешность. Между аналогичными товарами в одном ценовом диапазоне потребитель предпочитает продукцию, способную в большей степени удовлетворить его нужды и потребности, более качественную. В связи с этим основной мотивацией любой организации является повышение качества продукции, как объективное условия увеличение её успешности, конкурентоспособности [1 - 9].

В соответствии с требованиями ГОСТ 15467-79 [10] под качеством продукции понимается совокупность её свойств, обуславливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии её назначением.

Необходимым условием повышения качества продукции является анализ и учёт тех факторов, которые оказывают существенное влияние на процесс повышения качества продукции. К числу таких факторов можно отнести: технические, организационные, экономические, правовые, социальные, информационные и др.

По мере повышения качества увеличивается сложность производства продукции, что, в свою очередь, влечёт за собой возрастание вероятности появления брака продукции, который выявляется в ходе её технического контроля [11]. Выявление дефектной продукции осуществляется при измерении её свойств в ходе технического контроля, проводимого по согласованным с заказчиком и утверждённым руководством организации программам и методикам. Анализ проведения измерений на предприятиях машиностроения свидетельствует о том, что их результаты существенно влияют на принятие решения о соответствии качества продукции заданным заказчиком требованиям. Достоверность результатов измерений свойств продукции является определяющей при отнесении продукции к соответствующей требованиям или дефектной. Следовательно, обеспечение достоверности результатов измерений продукции машиностроения при проведении её технического контроля является определяющим фактором, влияющим на оценку качества продукции, а следовательно, и на успешность организации.

На достоверность результатов измерений продукции машиностроения при проведении её технического контроля оказывает существенное влияние ряд факторов, в том числе, погрешность измерения.

Погрешность возникает во время измерения. Результат измерения является случайной величиной, которая зависит от инструментальной погрешности средства измерения (СИ) и поля допуска измеряемого параметра. Для обеспечения максимальной достоверности результатов измерений необходимо рациональное соотношение инструментальной погрешности СИ и поля допуска измеряемого параметра. В соответствии с требованиями РМГ 63–2003 [12] предел допускаемой погрешности измерений, не приводящей к заметным потерям или другим неблагоприятным последствиям, может составлять 0,2–0,3 границы симметричного допуска на измеряемый важный параметр и для параметров, не относящихся к наиболее важным, - 0,5.

В процессе измерений может меть место применения СИ с инструментальной погрешностью, которая близка к предельным значениям поля допуска измеряемого параметра. В данном случае может возникнуть ситуация, когда годная деталь будет изготовлена по одной из предельных границ поля допуска. В данном случае может возникнуть вероятность того, что при приёмке данной детали её могут отнести к дефектной и наоборот, дефектную деталь могут приять как соответствующую требованиям. В соответствии с требованиями Р 50-609-40-01 [13] данную ситуацию рассматривают как возникновение вероятностей ошибок технического контроля 1-го и 2-го рода. Данные вероятности определяются в соответствии с положениями ГОСТ 8.051–81 [14]. Результатом появления данных ошибок 1-го и 2-го рода технического контроля на этапе сборки могут возникнуть существенные затраты, связанные с увеличением трудоёмкости на выполнение технологических операций подгонки, регулировки и настройки, что в конечном итоге может привести к существенным издержкам предприятия на стадии жизненного цикла производство.

Данные последствия ошибок технического контроля 1-го и 2-го рода объективно определяют актуальность потребности в получении достоверной информации о результатах измерений свойств продукции машиностроения при проведении её технического контроля.

Неопределённость измерений учитывает факторы, которые влияют на результаты контроля и позволяют снизить брак.

Неопределённость измерения – это параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Неопределённость результата измерения отражает отсутствие достоверных данных о значения измеряемой величины, а, следовательно, достоверных данных о качестве продукции по результатам измерений в ходе её технического контроля.

На основе вышеизложенного понимания содержания достоверности измерений в ходе технического контроля предложена следующая методика проведения измерений в ходе организации и проведения технического контроля качества продукции.

Оператор после изготовления детали проводит однократное измерение одного из её параметров с помощью одного из выбранных в соответствии с требованиями Р 50-609-39-01 [15] СИ. Убеждается, что нужный параметр находится в поле допуска и относит её к годным деталям, а если её параметр находится за полем допуска, то относит её к дефектным деталям. Затем годные детали попадают на технический

контроль специалистов ОТК. Там проводится их контроль и также идентифицируются дефектные. На этих этапах производится однократное измерение, а его результат считают действительным, не учитывая, что это случайная величина, на которую влияет множество факторов. В данном случае схема приёмки проводится в соответствии с требованиями ГОСТ8.051–81 [14]. Графическая иллюстрация данной схемы приведена на рисунке 1.

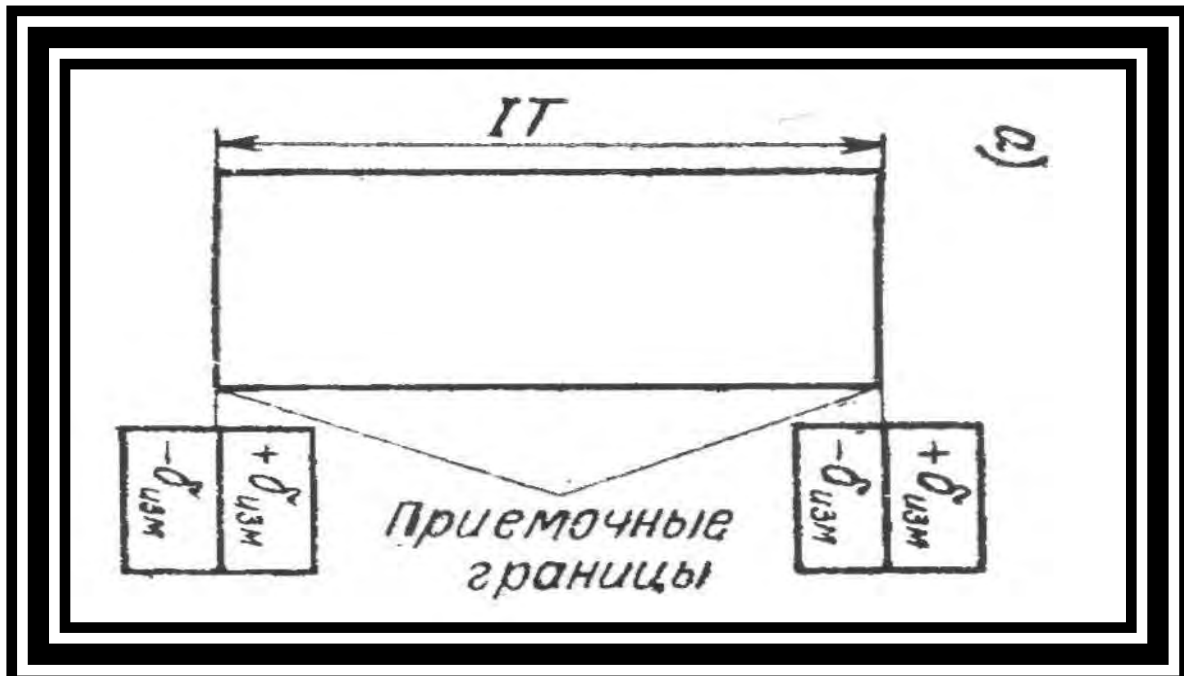


Рисунок 1 – Графическая иллюстрация схемы проведения технического контроля

В условиях данной методики приёмочные границы расположены без смещения. В данной ситуации наиболее вероятно наличие дефекта т. к. не учитываются следующие факторы:

- компетентность оператора;
- условия проведения измерения (температура, влажность, вибрация);
- нормированные метрологические характеристики СИ (дискретность, жесткость, коэффициент температурного расширения, стабильность ноль-пункта, значение и колебание измерительного усилия);
- объект измерения (шероховатость, отклонения формы, деформация при закреплении, коэффициент температурного расширения, чистота, твёрдость);
- методика выполнения измерений (выбор эталона, число операторов, число измерений, число точек, стратегия измерения).

Учёт неопределённостей позволяет расширить приёмочные границы за счёт учёта факторов неопределённости. Графическая иллюстрация учёта неопределённостей при проведении измерений приведена на рисунке 2.

К факторам неопределённости относят [16]:

1. Температурная неопределённость
2. Неопределённость оператора.
3. Инструментальная неопределённость
4. Неопределённость схемы измерений
5. Неопределённость базирования и линии измерения
6. Неопределённость от измерительного усилия

7. Неопределённость настройки
8. Неопределённость разрешения и округления
9. Неопределённость обратного хода
10. Неопределённость калибровки



Рисунок 2 – Графическая иллюстрация учёта неопределённостей при проведении измерений

Недостатком данного метода является тот факт, что он затратный по времени из-за постоянно меняющихся факторов. Для сокращения времени дополнительно необходимо проводить следующие мероприятия:

- соблюдение постоянной температуры (для этого используют подготавливают отдельные помещения с кондиционерами);
- перед контролем деталь должна отлежаться, чтобы частично снялись напряжения, а её температура выровнялась с температурой прибора;
- использовать поверенные СИ и в начале смены проводить калибровку оборудования.

Выполнение приведенных мероприятий позволит создать электронный калькулятор для быстрого расчёта результатов измерений с учётом неопределённостей.

Применение вышеизложенной методики наиболее вероятно приведёт к:

- повышению достоверности результатов измерений;
- повышению качества продукции машиностроения;
- обеспечению управления качеством продукции;
- расширению приёмочных границ за счёт пересчета неопределённости;
- снижение доли брака продукции.

Заключение

Таким образом можно сделать вывод о том, что учёт выше приведенных факторов, влияющих на неопределённость измерения в ходе технического контроля продукции в машиностроительном производстве, позволяет получить более достоверную информацию о качестве продукции и, в конечном итоге, снизить затраты на её изготовление и повысить конкурентоспособность организации в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин И.В. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И.В. Ильин [и др.]. - Санкт-Петербург, 2018. 289 с.
2. Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 655-658.
3. Федотова А.М., Гасюк Д.П. Анализ рисков возникновения проблем с качеством технологической подготовки производства и разработка мероприятий по их снижению в условиях АО "НИИЭФА" // Металлообработка. 2021. № 1 (121). С. 50-54.
4. Кузьменко А.А., Гасюк Д.П. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. - Санкт-Петербург, 2022. С. 434-439.
5. Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 7 (133). С. 147-152.
6. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Веселко А.А., Пак А.Ю. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 1. С. 30-35.
8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.
9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я. Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина, Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.
10. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. термины и определения. – Взамен ГОСТ 17341-71; введ.01.07.1979 – Москва: Издательство стандартов 1979. – 23 с.
11. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством. - 2-е изд. - СПб.: Питер, 2015. - 384 с.
12. РМГ 63-2003 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Метрологическая экспертиза технической документации.: Изд-во стандартов, 2004. - 16 с.
13. Р 50-609-40-01 Рекомендации. Технологическое проектирование технического контроля. Введ. 25.12.2001 - Нижний Новгород: ОАО НИЦ КД, 2001. – 29 с.
14. ГОСТ 8.051-81 Государственная система единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. – Взамен ГОСТ 8.051-73; введ. 01.01.1982 – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам 1981 – 10 с.

15. Р 50-609-39-01 Рекомендации. Правила выбора средств контроля. Введ. Введ. 25.12.2001 - Нижний Новгород: ОАО НИЦ КД, 2001. - 29 с.

16. ГОСТ 34100.3-2017 Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. Введ. 01.09.2018 – Москва: Стандартиформ 2018. – 30 с.

D.P. Gasyuk, I.V. Uzlov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, uzlovvana@yandex.ru

**METHODOLOGY FOR ENSURING THE RELIABILITY OF
MEASUREMENT RESULTS OF MECHANICAL ENGINEERING
PRODUCTS IN THE PROCESS OF ITS TECHNICAL CONTROL
IN THE CONDITIONS OF ORDERED PRODUCTION**

Abstract

The article discusses the features of the application of measurement uncertainty in machine-building production.

Keywords: measurement uncertainty, acceptance limits.

Д.П. Гасюк, Ю.А. Валуйских
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, yuriyvaluyskih@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ ВО ВНОВЬ ПРИСОЕДИНИВШИХСЯ РЕГИОНАХ РОССИИ

Аннотация

В работе рассмотрены структура и основные проблемы машиностроительной отрасли присоединившихся регионов России. В результате проделанной работы были предложены рекомендации, которые позволят помочь при разработке систем менеджмента качества, в новых регионах РФ в сложившихся условиях.

Ключевые слова: система менеджмента качества, проблемы машиностроительной отрасли, производство в новых регионах России.

Из всех образовавшихся в результате распада СССР государств Украина получила самое богатое наследство. Это развитое сельское хозяйство, мощный энергетический комплекс, развитая металлургия, транспортная сеть и промышленность, а также развитая база туризма. Во многом это заслуга бывших Луганской, Донецкой, Запорожской и Херсонской областей.

30 сентября президент России подписал указ о вхождении в состав России четырех новых регионов – Донецкой и Луганской народных республик, Запорожской и Херсонской областей. С 23 по 27 сентября в них прошли референдумы, на которых абсолютное большинство жителей поддержали решение о вступлении в состав Российской Федерации. Несмотря на то, что эти территории пострадали во время вооруженного конфликта, у них есть огромный потенциал для роста в условиях присоединения к России.

Основу экономики Донецкой и Луганской народных республик составляют промышленность (металлургия, производство электроэнергии, добыча угля) и сельское хозяйство. В 2013 году Донецкая и Луганская область вместе производили почти 16% ВВП Украины, уступая только Киеву. Доля Донбасса в объеме реализованной промышленной продукции была 27,3%, больше, чем в любом другом регионе страны, как и в экспорте товаров и услуг из Украины - 23,3%. [1]

В Донбассе добывается коксующийся уголь, используемый в металлургии, энергетический уголь, используемый для генерации электричества, а также самый дорогой сорт угля - антрацит. Его часто используют для нужд химической промышленности. Всего в Донбассе добывается около 23-24 млн тонн угля в год. Из них на неподконтрольных Киеву территориях - около 18 млн тонн. При этом производство угля в целом сократилось почти в три раза. То есть сохраняется огромный потенциал роста, который, например, не был использован в 2021 году, в период энергетического кризиса в Европе. [1]

Помимо добычи угля, в регионе широко развиты машиностроительная и химическая отрасли, производство стройматериалов. (рисунок 1) Предприятия поставляют холодильники, оборудование для авиадвигателей, цемент, шифер, антисептики, бытовую химию и другое. [2]



Рисунок 1 – Диаграмма удельного веса отраслевой промышленности ДНР за 2020 год

Согласно государственной службе статистики Донецкой Народной Республики структуру экспорта машиностроительной продукции составляют сырье, промышленные и потребительские товары (рисунок 2). А основной экспортируемой продукцией служит холодильное оборудование, оборудование для авиадвигателей, горношахтное оборудование и пожарная техника [3].



Рисунок 2 – Структура экспорта машиностроительной продукции ДНР [3]

Луганская Народная Республика (ЛНР) тоже опирается на угледобычу и металлургию, однако 15 сентября глава республики Леонид Пасечник заявил о необходимости переориентировать экономику, например, на выпуск автомобильной и электронной продукции.

Ввиду существующей геополитической ситуации и экономической блокады со стороны Украины и стран запада, экономическое и промышленное развитие территории чрезвычайно затруднено. Ввиду этого проблемы в машиностроении в новых регионах можно рассмотреть с четырех сторон: с экономической, социальной, политической и технологической (рисунок 3).

Отдельно нужно отметить, что внутренний рынок не способен обеспечить загрузку и рост производства мощного горно-металлургического, машиностроительного и химического комплексов, которые исторически создавались для обеспечения промышленных потребностей Центрального и Южного регионов Российской империи, СССР, а также Украины. В этой связи перспективы развития промышленного комплекса новых регионов лежат в плоскости тесной интеграции в

экономическое пространство Российской Федерации, а значит приоритетом является высококачественная продукция, способная составить высокую конкурентоспособность совместно с российскими предприятиями на мировом рынке [4 - 9].



Рисунок 3 – Основные проблемы машиностроительной отрасли в новых регионах РФ

Говоря о конкурентоспособности следует отметить, что основой конкурентоспособности выпускаемых товаров является их качество, которое, в свою очередь, достигается путем внедрения систем менеджмента качества [10 - 14].

Система менеджмента качества (СМК) – это комплекс систем, методов и инструментов, которые компания использует, чтобы удовлетворять требования потребителей и учитывать их ожидания относительно продукции, повышать свою конкурентоспособность и конкурентоспособность конкретной продукции, совершенствовать деятельность компании в целом

В сложившихся условиях имеют место особенности внедрения СМК на машиностроительных предприятиях присоединившихся регионов. Стоит понимать, что каждое предприятие следует рассматривать отдельно, так как деятельность каждого предприятия отличается наличием специфических этапов по подготовке, производству и реализации изделий. Но несмотря на предполагаемую специфику деятельности необходимо выделить и учесть ряд особенностей, что позволит не только помочь при разработке СМК, но и решить ряд основных проблем машиностроительной отрасли в новых регионах РФ в сложившихся условиях.

В первую очередь необходимо разработать алгоритм по поддержке инновационной и инвестиционной деятельности предприятия в данных условиях. Такая необходимость позволит достигнуть самостоятельности и выработать механизм

преодоления социально-экономической блокады. Также это позволит повысить конкурентоспособность предприятия и его продукции, расширит рынки сбыта и привлечет потенциальных инвесторов и высококвалифицированных рабочих.

Во-вторых, необходимо формирование системы подготовки квалифицированных кадров для машиностроительного сектора экономики, обладающих современным набором знаний и умений. Ввиду сильного оттока специалистов необходимо позаботиться о привлечении не только молодых специалистов, но и людей в возрасте.

Одной из важнейших особенностей является утрата технической документация. В период военных действий некоторые собственники оставили свои предприятия, и при этом вывезли всю техническую документацию. «На заводах никогда не хранились чертежи. Всю необходимую для производства документацию рабочим завода предоставляли владельцы предприятия» – прокомментировал, бывший министр промышленности ДНР Алексей Грановский. Таким образом, прежде чем приступить к организации работ по разработке документации СМК (руководство по качеству, документированные процедуры, записи по качеству) необходимо активизировать работу конструкторских и технологических отделов, начать активное восстановление и разработку технической документации. Также необходимо уделить внимание на развитие процесса сертификации продукции в условиях российской экономики, опираясь на опыт российских предприятий, и обеспечение их обслуживания т.е. весь последующий сервис.

В условиях санкционной блокады не только вновь присоединившихся регионов, но и России в целом, является необходимым активизировать реализацию принципов импортозамещения продукции, что также поможет обеспечить востребованность и конкурентоспособность продукции, произведенной в новых регионах, надежно закрепиться как на внутреннем рынке, так и на рынке дружественных стран России.

Анализ и учёт перечисленных особенностей позволит не только подготовить предприятия к внедрению СМК, но и решить ряд более глобальных проблем машиностроительного сектора присоединившихся регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская газета: [сайт]. – Москва, 1990 . - URL: <https://rg.ru/2022/02/23/kak-ustroena-ekonomika-doneckoj-i-luganskoj-narodnyh-respublik.html> (дата обращения 18.10.2022). – Текст: электронный.

2. Известия: информационный портал: [сайт]. - Санкт-Петербург, 2017 - URL: <https://iz.ru/1402390/aigul-khabibullina/mesto-sily-kakim-potentcialom-obladaiut-chetyre-novykh-regiona-rossii> (дата обращения 18.10.2022). – Текст: электронный.

3. Министерство промышленности и торговли ДНР: официальный сайт. - Донецк. – Обновляется в течение суток. -URL: <https://mpt-dnr.ru/pages/catalog.html> (дата обращения 18.10.2022). – Текст: электронный.

4. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

5. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н. Таможенная политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Вестник Российской таможенной академии. 2015. № 1. С. 14-19.

6. Черныш А.Я., Анисимов Е.Г. Концепция построения теории таможенного дела // Вестник Российской таможенной академии. 2009. № 3. С. 5-11.

7. Тебекин А.В., Анисимов Е.Г. О фронтах гибридной войны в экономическом и геополитическом пространстве // Журнал исследований по управлению. 2020. Т. 6. № 5. С. 60-74.

8. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354.

9. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2007. Т. 1. С. 15-18.

10. Гасюк, Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. – 2019. – С. 31–36.

11. Системы менеджмента качества: учебное пособие / Т. А. Борисова, В. Я. Дмитриев; под ред. Е. В.Ушаковой; С.-Петербург. ун-т технол. упр. и экон. -СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета технологий управления и экономики, 2017. – 168 с.

12. Гасюк Д.П., Валуйских Ю.А. Создание и внедрение системы менеджмента качества на предприятии машиностроения на основе риск-ориентированного мышления // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых.- Санкт-Петербург, 2022. С. 444-449.

13. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. - 358 с.

14. Гасюк Д.П., Вырвич А.А., Ватутин А.И., Есин Б.В., Прилепа К.Н. Управление рисками аудита систем менеджмента качества // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: Научные труды Высшей школы машиностроения.- Санкт-Петербург, 2022. С. 228-237.

D.P. Gasyuk, Yu.A. Valuiskikh
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
yuriyvaluyskih@gmail.com

FEATURES OF THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES IN THE NEWLY JOINED REGIONS OF RUSSIA

Abstract

The paper considers the structure and main problems of the machine-building industry of the affiliated regions of Russia. As a result of the work done, recommendations were proposed that will help in the development of quality management systems in new regions of the Russian Federation in the current conditions.

Keywords: quality management system, problems of the machine-building industry, production in new regions of Russia.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ, КОРРЕКТИРОВКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ КОМПЛЕКТУЕМОЙ СЕРИЙНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ОПК

Аннотация

Организация работ по комплектованию серийных изделий предприятий машиностроения ОПК в ходе выполнения контрактов или договоров, актуальной эксплуатационной документацией (ЭД), требует применение обоснованных атрибутов, содержащихся в науке управления. Развитие содержательной структуры атрибутов управленческой деятельности, позволила выстроить научно обоснованный универсальный для практики управления предприятий машиностроения процесс, позволяющий гарантированно комплектовать изделия актуальной ЭД, что также подтвердила практика его применения. В статье представлена авторская структурно-логическая схема процесса разработки, корректировки и изготовления ЭД, с описанием этапа приёма-передачи электронного макета ЭД от разработчика, изготовителю.

Ключевые слова: эксплуатационная документация, предприятия машиностроения, процессный подход, качество продукции, практика управления.

Введение

Эксплуатационная документация является обязательной и важной составляющей в комплектации изделия. Вопрос ее актуализации в процесс выпуска изделий, является организационно сложным по следующим причинам:

1. При изготовлении изделий в рамках одного контракта предполагается, что все они одинаковые. Однако ввод непринципиальных изменений, не меняющих ТТХ изделия, требует корректировки ЭД. Без проведения корректировки ЭД, ее использование может быть невозможно (различные обозначения и названия, а так же конструктивные особенности деталей и сборочных единиц). В итоге ЭД должно актуализироваться параллельно с изменениями в КД изделий. Проецируя это на весь контракт получается, что каждый изготавливаемый комплект ЭД будет индивидуальным для каждого отдельного изделия, получаемого заказчиком.

2. Изготовление ЭД для изделий по индивидуальным макетам, полученным от разработчика, требует более сложной организации процесса и контроля со стороны изготовителя. С учетом, что ЭД должно быть изготовлено по времени как можно ближе к отгрузке изделий, все работы проводятся в сжатые сроки без возможности исправления брака в случае его появления.

3. Работающие по кооперации типографии, для увеличения рентабельности при тиражировании ЭД, стремятся к выполнению наибольшего объема работ по каждому разовому заказу. Такой подход ограничивает количество контрагентов готовых производить работы со сложной процедурой приема-передачи, малых объемов эксплуатационной документации на разовое изготовление (по одному комплекту). Печать при этом с каждого макета ЭД, должна производиться в строго определенные

сроки без задержки, в ином случае задержки изготовления ЭД могут привести к срыву сроков отгрузки изделий. На типографию ложится дополнительная ответственность, через зависимость своевременной отгрузки изделий головным изготовителем.

Для получения ЭД требуемого качества необходимо, основываясь на научные изыскания и обобщенный опыт практики управления на предприятиях машиностроения [1], разработать практико-ориентированный управляемый процесс.

Методы

В ходе выполнения научного исследования использовались методы экспертных оценок, системного и критического анализа.

Результаты и обсуждение

Состав эксплуатационной документации должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 2.601 [2], ГОСТ РВ 0002–601[3] и включать следующие основные документы: паспорт; формуляр; руководство по эксплуатации; ведомость ЗИП.

В технических условиях на изделия, изготавливаемые АО «Завод «Универсалмаш» требования к качеству ЭД следующие: «В тексте не должно быть мест, затрудняющих чтение (непрочатка, расплывчатость, засвечивание, непроявка). Каждый документ брошюровать в переплет цельнотканевый бумвинил любого цвета, твердый; обложка из переплетного или комбинированного картона толщиной 0,5-2,0 мм; изнутри обложка должна быть оклеена белой или цветной, светлых тонов бумагой писчей ГОСТ 18510 [4] любого номера, или бумвинилом любого цвета. На обложках не допускаются складки, коробление, следы и подтеки клея». Актуальность ЭД поставляемой с изделиями, является одним из основных критериев качества, критерием соответствия.

Выполнение договорных обязательств предприятиями машиностроения, как изготовителем по выпуску серийных изделий, могут длиться различный период времени. Выражена такая длительность выполнения договоров, поэтапной отгрузкой изделий заказчику.

В ходе проведения работ по изготовлению серии изделий, разработчик проводит изменения в конструкторской документации (КД) связанные с актуализацией или вводом новых комплектующих [1, 5-**Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.**]. Проведение этих работ требует приведения в соответствие эксплуатационной документации, которой будет комплектоваться изделие.

Автором разработана структурно-логическая схема процесса разработки, корректировки и изготовления ЭД, с описанием этапа приёма-передачи электронного макета ЭД от разработчика к изготовителю (рисунок 1). Структурно-логическая схема была апробирована в АО «Завод «Универсалмаш» при выполнении договоров в период с 2019 по 2022 год.

Представленные процессы и сопутствующая документация в структурно-логической схеме, обеспечивают в практической деятельности предприятия машиностроения, управление, качество и корректировку ЭД, для ее своевременной актуализации под конкретное изделие или группу изделий.

Автором предложена формула (1) для определения качества ЭД изделий контракта, полученной заказчиком. Применение формулы 1 позволяет определить показатели качества комплектов ЭД полученных с изделиями заказчиком, в рамках одного договора или контракта в процентах.

$$Q_{manual} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{N} \times 100\%, \quad (1)$$

где: Q_{manual} – показатель качества получаемой ЭД изделий заказчиком, в %; a_i – ценность одного актуального комплекта ЭД i -го изделия, руб.; N – совокупные затраты заказчика на ЭД всех изделий контракта, руб.

$$\sum_{i=1}^n a_i = a_1 + a_2 + \dots + a_n, \quad (2)$$

где: n – количество изготовленных актуальных комплектов ЭД поставленных с изделиями заказчику, шт.

$$N = \sum (M \times V_i \times H_i), \quad (3)$$

где: M – общее количество изготовленных комплектов ЭД изделий в рамках контракта, шт.; V_i – цена за ЭД i -го изделия контракта, руб.; H_i – будущие издержки использования ЭД i -го изделия контракта заказчиком, руб.

При назначении показателя Q_{manual} равном ста процентам (100%), заказчик изделий получает полностью актуализированную ЭД в рамках договора или контракта, а соответственно и ожидаемое им качество (по критерию соответствия) получаемой с изделиями эксплуатационной документации.

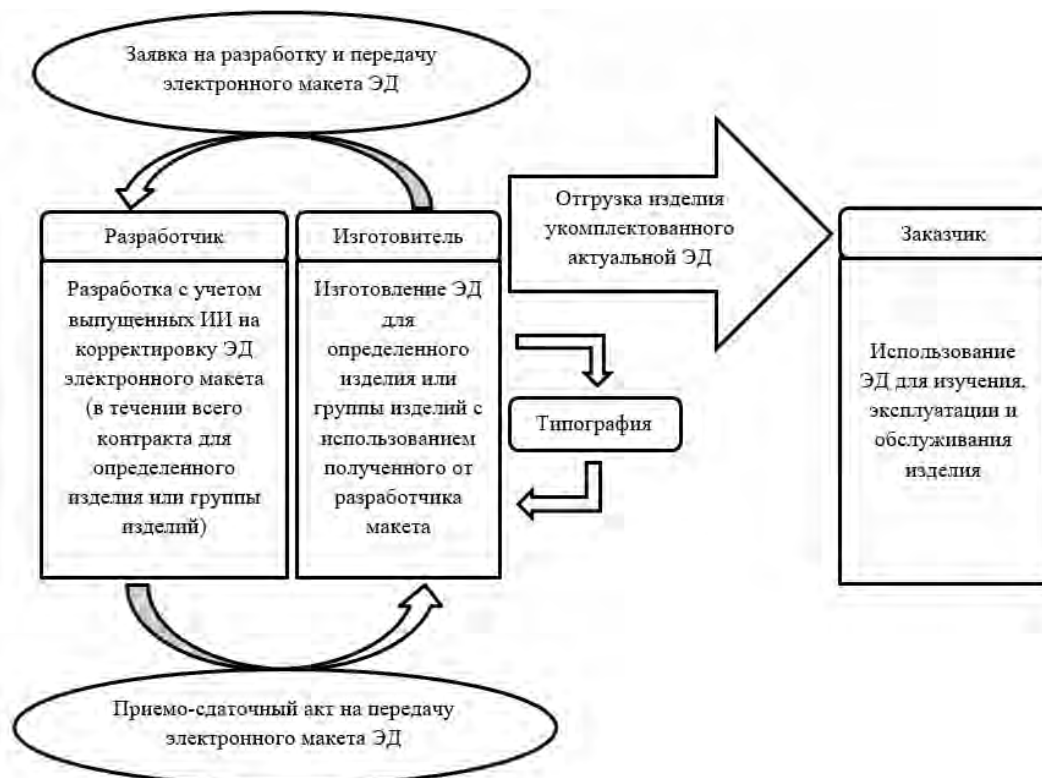


Рисунок 1 – Структурно-логическая схема процесса разработки, корректировки и изготовления ЭД, с описанием этапа приёма-передачи электронного макета ЭД от разработчика к изготовителю.

Заключение

В заключении стоит отметить, что представленная авторская структурно-логическая схема процесса разработки, корректировки и изготовления ЭД, с описанием этапа приёма-передачи электронного макета ЭД от разработчика к изготовителю, может иметь широкое применение на различных предприятиях машиностроения ОПК.

Направление дальнейших исследований в данной области, видится с переходом предприятий машиностроения на комплектование изделий цифровыми интерактивными формами эксплуатационной документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов, Б. Н. Онтология науки управления: философия, основания, атрибуты // Основы ЭУП. 2021. №2 (27).
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ontologiya-nauki-upravleniya-filosofiya-osnovaniya-atributy> (дата обращения: 01.12.2022).
2. ГОСТ Р 2.906-2019 Единая система конструкторской документации Эксплуатационные документы.
3. ГОСТ РВ 0002-601-2019 Единая система конструкторской документации Военная техника. Эксплуатационные документы.
4. ГОСТ 18510-87 Бумага писчая. Технические условия.
5. Кобзев, В. В. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях новой реальности / В. В. Кобзев, А. В. Бабкин, А. С. Скоробогатов // *п-Есопому*. – 2022. – Т. 15. – № 5. – С. 7-27. – DOI 10.18721/JE.15501.
6. Скоробогатов, А. С. Проблемы обоснования эффективности конструкторско-технологических изменений на предприятиях машиностроения / А. С. Скоробогатов, В. В. Кобзев, А. Е. Радаев // Новая экономическая реальность, кластерные инициативы и развитие промышленности (ИНПРОМ-2016): Труды международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19–26 мая 2016 года / под ред. А.В. Бабкина. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2016. – С. 384-388.
7. Скоробогатов, А. С. Подход к решению задачи обоснования технологии изготовления готовой продукции промышленного предприятия / А. С. Скоробогатов, В. В. Кобзев // Цифровая экономика и "Индустрия 4.0": проблемы и перспективы: труды научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 23–27 марта 2017 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 662-667. – DOI 10.18720/IEP/2017.1/98.

A.S. Skorobogatov

АО «Zavod «Universalmash», Saint Petersburg, Russia, skorobogatov.andrei@yandex.ru

FEATURES OF THE DEVELOPMENT, ADJUSTMENT AND MANUFACTURE OF MANUAL DOCUMENTATION FOR SERIAL PRODUCTS OF MECHANICAL ENGINEERING ENTERPRISES OF THE DEFENSE- INDUSTRIAL COMPLEX

Abstract

The organization of work on the acquisition of serial products of defense-industrial complex machine-building enterprises during the execution of contracts or contracts with up-to-date operational documentation requires the use of reasonable attributes contained in the science of management. The development of the content structure of the attributes of management activity allowed us to build a scientifically based universal process for the

management practice of machine-building enterprises, which makes it possible to complete products with up-to-date operational documentation, which is confirmed by the practice of application. The article presents the author's structural and logical scheme of the process of development, adjustment and manufacture of operational documentation, with a description of the stage of receiving and transmitting an electronic layout of operational documentation from the developer to the manufacturer.

Keywords: manual documentation, mechanical engineering enterprises, process approach, product quality, management practice.

ВЫБОР СПОСОБОВ ИСПЫТАНИЙ ВРЕМЕНИ ГОРЕНИЯ ВРЕМЯЗАДАЮЩИХ КОЛЕЦ И ОЦЕНКА ИХ ТОЧНОСТИ

Аннотация

В работе рассмотрены два основных метода испытания времени горения пиротехнических времязадающих колец. Проведены испытания 60 пиротехнических времязадающих колец разными методами при разных климатических условиях. В результате проведенных работ были выбраны методы для разных видов пиротехнических времязадающих колец.

Ключевые слова: испытания, взрывчатое вещество, времязадающее кольцо, время горения, пиротехника.

Введение

Основная функция пиротехнического времязадающего кольца – это прогорание за определенное время. Выбор способа испытания пиротехнического времязадающего кольца неотъемлемая часть при его проектировке и разработке.

Методы

При изучение данного вопроса были использованы: научная и нормативная литература на тему испытания пиротехнических времязадающих колец на время горение; многолетний опыт АО «НПО «Поиск» по работе с взрывательными устройствами разных типов; установка УВГ-1, предназначенная для испытания пиротехнических устройств на время горения в лабораторных условиях.

Результаты и обсуждения

В настоящее время существует несколько методов определения времени горения пиротехнических составов. Наиболее доступными и точными методами являются: метод определения при помощи фотоэлемента; метод определения при помощи замыкания или размыкания электрического контакта.

Метод испытания пиротехнического времязадающего кольца на время горения в открытом объеме при помощи фотоэлемента. Начало и конец горения пиротехнического состава определяется фотоэлектрическим способом по световым сигналам от форса огня, соответствующим началу и концу горения [1].

Для обеспечения испытаний времязадающих колец, имеющих различную величину форса огня, необходимо отрегулировать чувствительность схемы к световому импульсу. Если пиротехнический состав создает при горении освещенность менее 5 лк, рекомендуется для увеличения освещенности наносить на «выходную» поверхность подпорошку из другого состава, который в свою очередь увеличит освещенность.

Времязадающее кольцо при испытании воспламеняется с помощью электровоспламенителя, на который с технологического пульта был подан электрический импульс.

К схеме подключен секундомер, который в свою очередь запускается в момент начала горения и останавливается в момент окончания горения пиротехнического состава. Сигнал пуска секундомера формируется в момент замыкания кнопки, подающей питание на мостик электровоспламенителя. При замыкании кнопки на входе секундомера создается перепад напряжения от нуля до плюс U , вызывающий его пуск. В качестве источника напряжения U предпочтительно использовать внешний источник постоянного тока напряжением 10-50 В.

Сигнал остановки секундомера формируется фотоэлементом, подключенном к триггеру. При испытании триггер выдает на вход секундомера положительный импульс напряжения, вызывающий его остановку в момент засвечивания фотоэлемента лучом огня, который появляется при сгорании пиротехнического состава времязадающего кольца.

Метод испытания пиротехнического времязадающего кольца на время горения при помощи замыкания или размыкания электрического контакта соответствует методу Ж ОСТ В 84-509-83. В случае испытания пиротехнического времязадающего кольца на время горения данным методом источником воспламенения является электровоспламенитель. После подачи импульса на электровоспламенитель и его срабатывания, воспламеняется пиротехнический состав во времязадающем кольце. Воспламенение инициирующего состава, обеспечивает зажжение пиротехнического состава времязадающего кольца. Фиксация начала горения производится от момента подачи импульса напряжения на электровоспламенитель. Конец горения фиксируется замыканием или размыканием электрического контакта. Погрешность измерения при использовании данного метода испытания пиротехнических времязадающих колец составляет $(3+t) * 10^{-6}$ секунды. Для повышения достоверности результатов измерения рекомендуется секундомер-калибратор и осциллограф включить в схему параллельно [2].

При оценке работоспособности пиротехнических времязадающих колец были использованы оба метода для фиксации времени горения. Для этого были собраны спецборки, а также две схемы для проведения экспериментальных испытаний по оценке времени горения пиротехнических времязадающих колец и погрешность их измерений в соответствии с требованиями нормативной документации по проведению испытаний на время горения и техники безопасности по проведению лабораторных испытаний. Перед испытаниями обе схемы были проверены на соответствие приборов (сроки поверки и паспорта) и последовательность их подключения. Перед проведением эксперимента по методу испытания пиротехнического времязадающего кольца на время горения в открытом объеме при помощи фотоэлемента работоспособность схемы была подтверждена при помощи экспериментального имитатора спецборки для проверки времени горения времязадающего кольца.

На рисунке 1 представлена схема эксперимента проверки времени горения при помощи фотоэлемента.

Перед проведением эксперимента по методу испытания пиротехнического времязадающего кольца на время горения при помощи размыкания электрического контакта, работоспособность схемы была подтверждена при помощи

экспериментального имитатора спецборки для проверки времени горения времязадающего кольца.

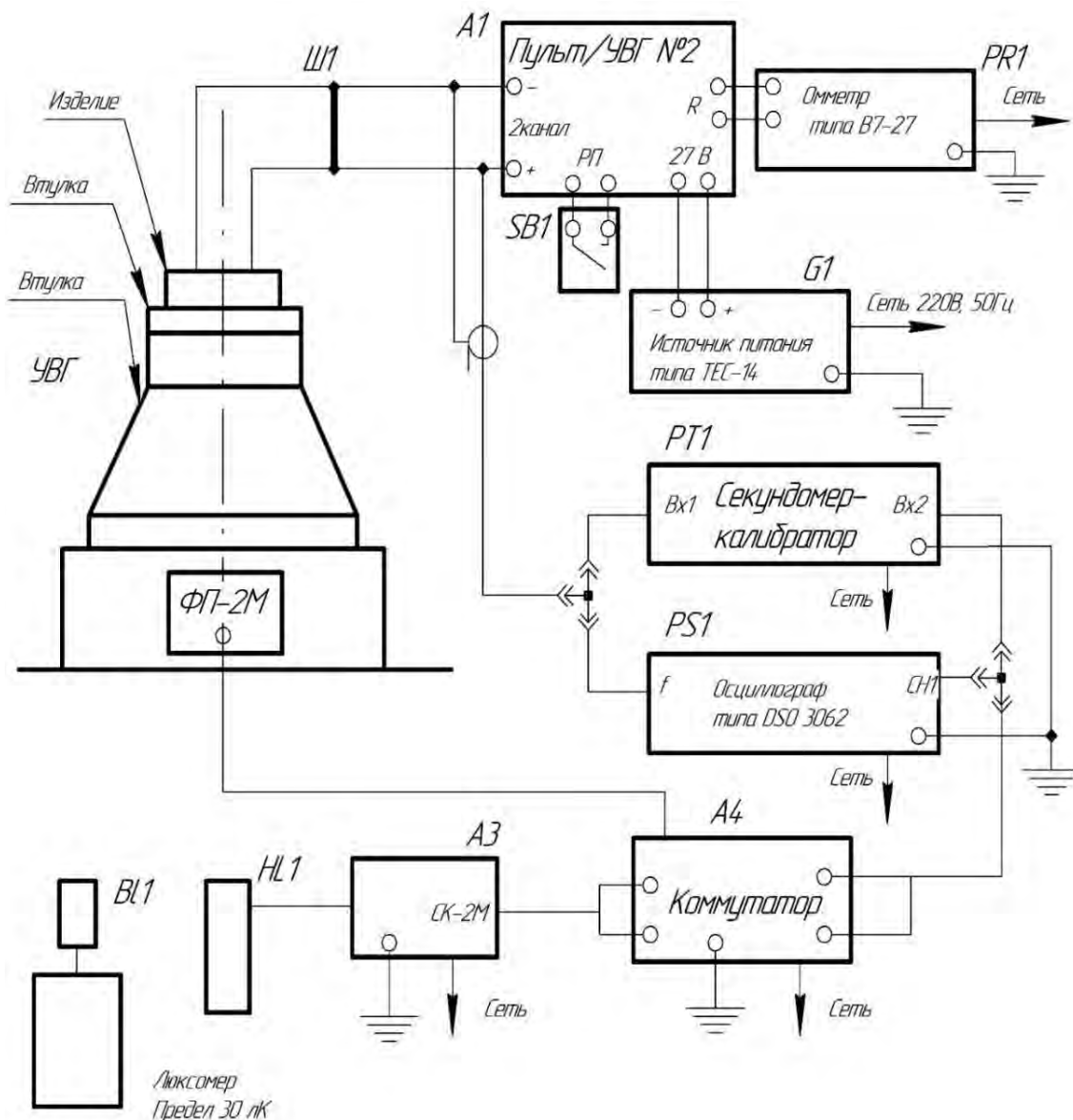


Рисунок 1 – Схема экспериментальной проверки времени горения при помощи фотоэлемента пиротехнического времязадающего кольца.

На рисунке 2 представлена схема эксперимента проверки времени горения при помощи замыкания или размыкания электрического контакта.

Для проведения экспериментальных испытаний были выбраны по 30 колец на каждый метод проверки времени горения. Пиротехнические времязадающие кольца были перед проведением испытаний помещены в камеры тепла и холода на 1 час при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ по 15 штук из каждой выборки. Эксперимент на время горения проводился через время не более чем 5 минут после извлечения спецборок из камер тепла и холода. На диаграмме представлены результаты проведенных экспериментов при $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3).

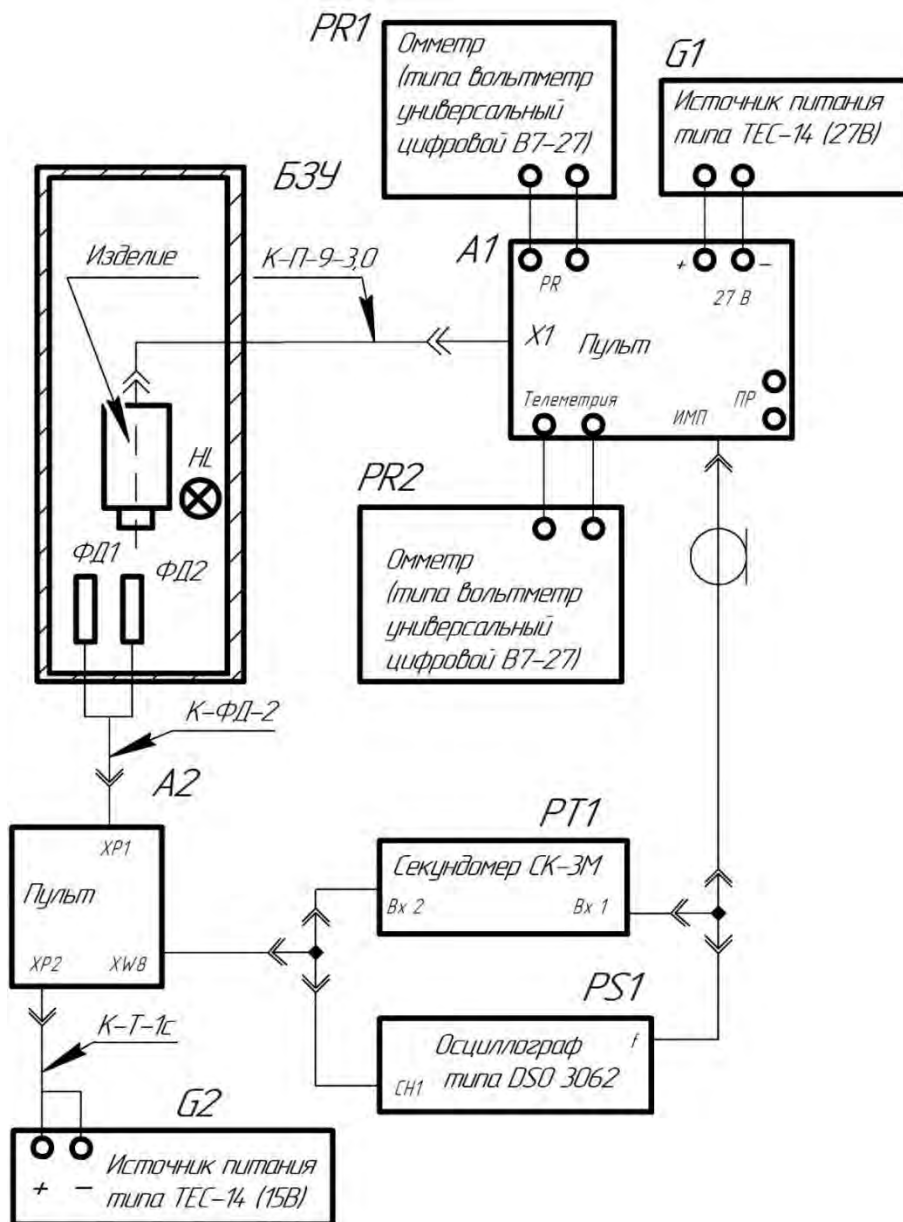
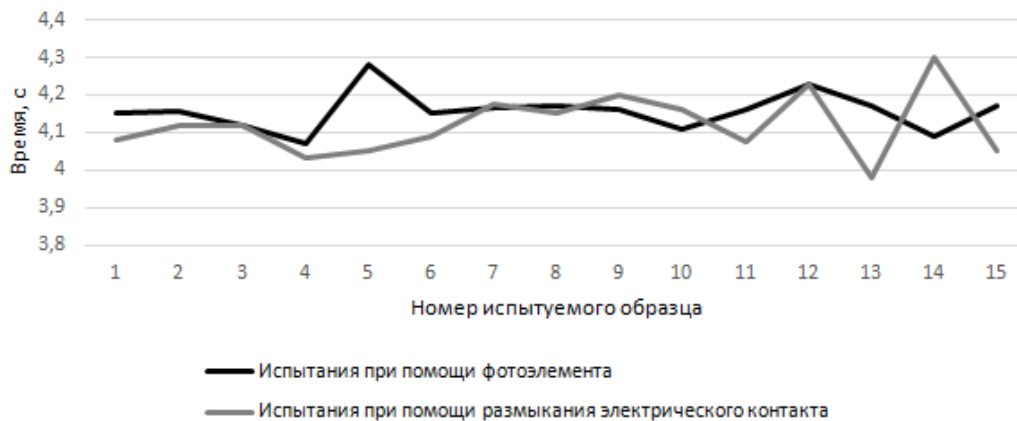
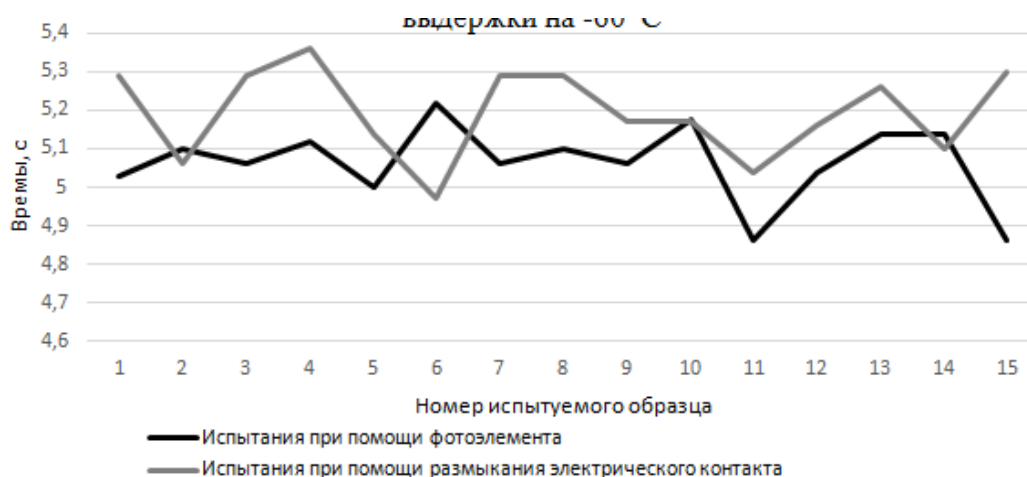


Рисунок 2 – Схема экспериментальной проверки времени горения при помощи размыкания или замыкания электрического контакта пиротехнического времязадающего кольца.



а



б

Рисунок 3 – Время горения образцов после выдержки при +60 °С (а) и при -60 °С (б)

Заключение

При проведении эксперимента по выбору метода испытания для пиротехнического времязадающего кольца было установлено, что если диапазон времени горения в мс, то предпочтительно выбрать метод, при котором используется фотоэлемент, так как при использовании данного метода погрешность измерений минимизирована. А если диапазон горения пиротехнического времязадающего кольца от 1 секунды и более, то рациональней использовать метод размыкания или замыкания электрического контакта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Техническое описание и инструкция по эксплуатации УВГ-1», АО «НПО «Поиск», 1986 г.
2. ОСТ В 84-509-83 КСКК. Взрыватели механические и электромеханические. Методы испытаний пиротехнических устройств на время горения в лабораторных условиях

K.S. Grechina^{1,2}, D.V. Lyakhovenko²

¹Peter the Great ST. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
grechina_ks@npo-poisk.ru

²JSC «NPO «Poisk», Murino, Russia

SELECTION OF METHODS FOR TESTING THE BURNING TIME OF TIMING RINGS AND ASSESSING THEIR ACCRACY

Abstract

Two main methods of testing burning time of pyrotechnics timing ring are considered in the work. 60 pyrotechnics timing ring were tested by different methods under different conditions. As a result of the work carried out, a method was chosen for different types of pyrotechnics timing rings.

Keywords: tests, explosive substance, the timing ring, burning time, pyrotechnics.

Songyuan Li¹, Shunca Li^{1,2}, Zhi Liu², V.I.Slatin³, A.V. Petrov³

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu Normal University,
Xuzhou Jiangsu, China, zscslc@263.net

²JSNU-SPBPU Institute of Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu, China

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint- Petersburg, Russia

ROUGHNESS PREDICTION MODEL OF MILLING NOISE-VIBRATION-SURFACE TEXTURE MULTI-DIMENSIONAL FEATURE FUSION FOR N6 NICKEL METAL

Abstract

Roughness is one of the important indicators for judging the quality of surface processing. In order to efficiently predict the surface roughness of nickel metal during milling, this paper builds a multi-dimensional signal monitoring system for nickel metal processing status, using sound level meters, three-way vibration sensors, industrial cameras, and roughness measuring instrument to collect noise, vibration, surface texture and roughness during milling. The particle swarm optimization algorithm (PSO) is used to optimize the least squares support vector machine (LSSVM), and a roughness prediction model of multi-dimensional feature fusion is established that takes the characteristic values of noise, vibration, and workpiece surface texture as input values and roughness as the output value. The results show that the prediction accuracy of roughness prediction model with the multi-dimensional feature based on PSO-LSSVM is 92.54%. The research can provides a theory guide for scientific monitoring of the surface roughness of milling workpieces.

Keywords: Nickel metal; Roughness; Milling noise; Milling vibration; Surface texture; Multi-dimensional feature prediction model

Introduction

Nickel metal has the advantages of high strength, good heat resistance, and strong corrosion resistance. It is widely used in the fields of machinery, electronics, and aerospace. Its machining performance has always been an important research topic[1]. When milling nickel metal, milling vibration will be accompanied by milling noise, and the surface of the workpiece will be corrugated, which will affect the surface processing quality of nickel alloy. The surface roughness of nickel metal is one of the important indicators to judge the quality of surface processing. It is closely related to the performance and life of processed nickel metal parts, so the measurement of roughness is of great significance to the study of nickel metal processing quality.

Roughness measurement methods can be divided into two types: contact and non-contact[2]. Contact roughness measurement is represented by a stylus profiler, whose measurement accuracy is limited by the radius of the stylus, and it is easy to scratch the surface of the workpiece. In order to overcome the limitations of the environment and measurement range of contact roughness measurement, non-contact roughness measurement has attracted more and more attention from scholars. Non-contact roughness measurement includes optical measurement and visual inspection. Taga[3] et al. developed a machining system that integrates the surface roughness values measured by optical sensors and used ANN-trained systems to determine the best cutting parameters for machining. As an

emerging detection method, non-contact vision measurement has the advantages of high efficiency, large amounts of information, and high precision. Many scholars use machine vision detection to predict the roughness. Rifai[4-6] et al. used artificial neural networks to predict the roughness of the surface texture image and compared it with the actual surface roughness value; Zhang[7] et al. used non-Gaussian Surface digital simulation technology and three-dimensional solid modeling technology generate virtual and processed sample surface images, which are used to predict the roughness of processed samples through training regression models; Patel[8] et al. used a high-end camera to capture the binary digital speckle pattern formed by the He-Ne laser light source beam, calculated the black and white pixel ratio from the binary image, and established the correlation between the black and white pixel ratio and the measured two-dimensional surface roughness parameters; Kumar[9] et al. studied a fusion reconstruction texture evaluation method similar to the human visual system, and the result was close to the roughness measured by a stylus profiler; Too[10-12] used a high-resolution camera to obtain the edge contour image of the sample after processing, extracted the edge contour from the digital image, and determined the roughness parameter. For machine vision photographs, scholars generally used wavelet transform[13-14], gray-level co-occurrence matrix[15], curve change[16], gray histogram[17], and other methods to extract the characteristics of surface texture, and find the correlation between features and roughness.

In order to reduce the expensive cost of roughness detection equipment, many scholars have established different roughness prediction models, such as fused deposition prediction model[18], micro-forming prediction model based on size effect[19], Bayesian linear regression prediction model based on PCA and KLPP[20], prediction model based on analysis of variance[21-22], Gaussian process regression and squared exponential covariance function prediction model[23], fuzzy logic prediction model[24]; Urbanain[25] established a model for predicting roughness based on the traces left by the simulated tool on the machined surface and cutting parameters; Han[26] et al. considered the influence of multiple factors in the metal forming process to establish a surface roughness prediction model.

It is known from the above literature that most scholars mainly search for the correlation between texture image features and roughness, or build prediction models based on processing features. However, there are few studies on establishing multi-dimensional feature roughness prediction models during processing. In this paper, the milling noise and vibration signals generated in the milling process of nickel metal are collected. At the same time, the industrial camera and roughness measuring instrument are used to obtain the surface texture image and roughness of the workpiece after milling. A multi-feature model is proposed to predict the surface roughness of the workpiece. The feature values of milling noise and vibration are extracted as one-dimensional features, and the texture image features of the workpiece surface are extracted as two-dimensional features. Based on particle swarm optimization least squares support vector machine (PSO-LSSVM), a multi-dimensional feature prediction model with one-dimensional and two-dimensional features as input parameters and roughness as an output parameter is established. The reliability of the prediction model is verified by comparing it with the measured roughness. Specific research processes are shown in figure 1.

Experimental designs

Test plan

In this experiment, the N6 nickel metal block was milled by dry milling with a four-

edge ultra-hard straight handle end miller with a diameter of 10 mm. In order to study the influence of spindle speed n , feed rate v_f and milling depth a_p on roughness, four levels of spindle speed (700,850,1000,1150 r/min), feed rate (8,10,12,14 mm/min), and milling depth (1,2,3,4 mm) were designed. According to the principle of total factor design, there are 64 groups of test schemes. Each group of test schemes carries out two tests, and a total of 128 tests are carried out. The test scheme is shown in table 1.

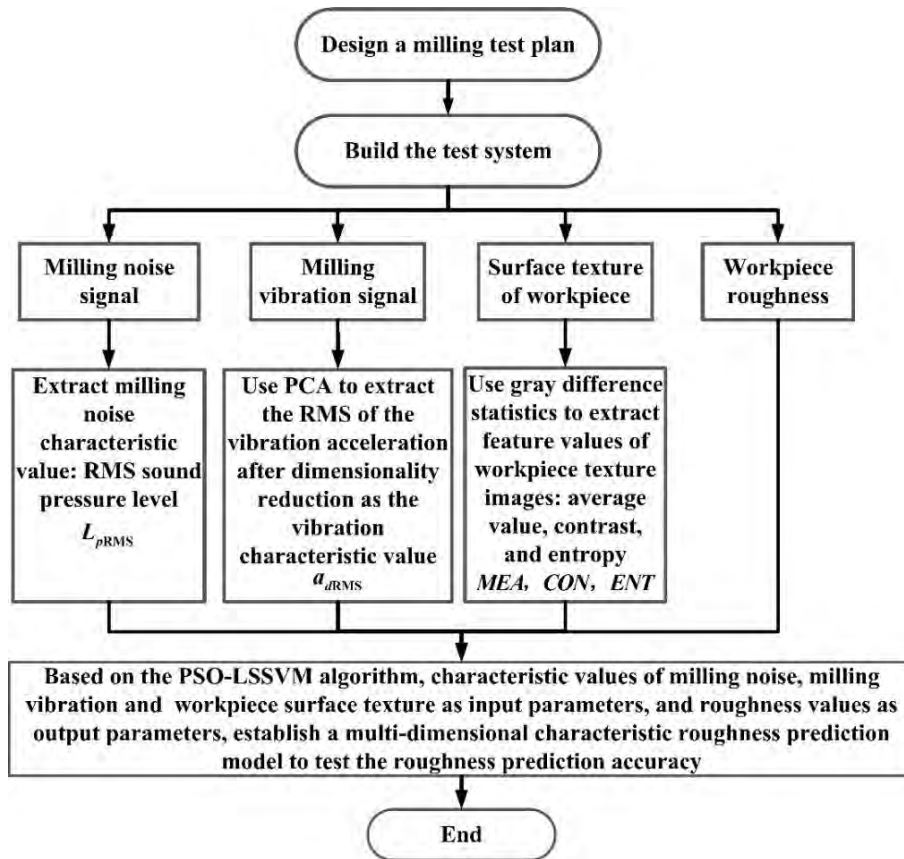


Figure1 – Research technology roadmap

Table 1 – Test Scheme

Number	Milling parameter	Unit	Factor levels			
			Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
1	Spindle speed(n)	r/min	700	850	1000	1150
2	Feed speed(v_f)	mm/min	8	10	12	14
3	Milling depth(a_p)	mm	1	2	3	4

Test procedure

The test system is set up as shown in figure 2, and the one-dimensional signal (milling noise and three-dimensional milling vibration), two-dimensional signal (texture image of workpiece surface), and roughness generated by the workpiece during milling are collected. The test steps are as follows:

1) Preparation of test milling machine and workpiece: XKA714 CNC milling machine is selected as the test machine, and the three-axis direction of the milling machine is shown in figure 2: X axis is along the direction of milling width, Y axis is along the direction of milling feed, and Z axis is along the direction of milling depth. The

100mm*40mm*100mm N6 nickel metal block is selected as the test workpiece, and the N6 nickel metal block is clamped along the Y axis with the gripping forceps on the milling machine working table.

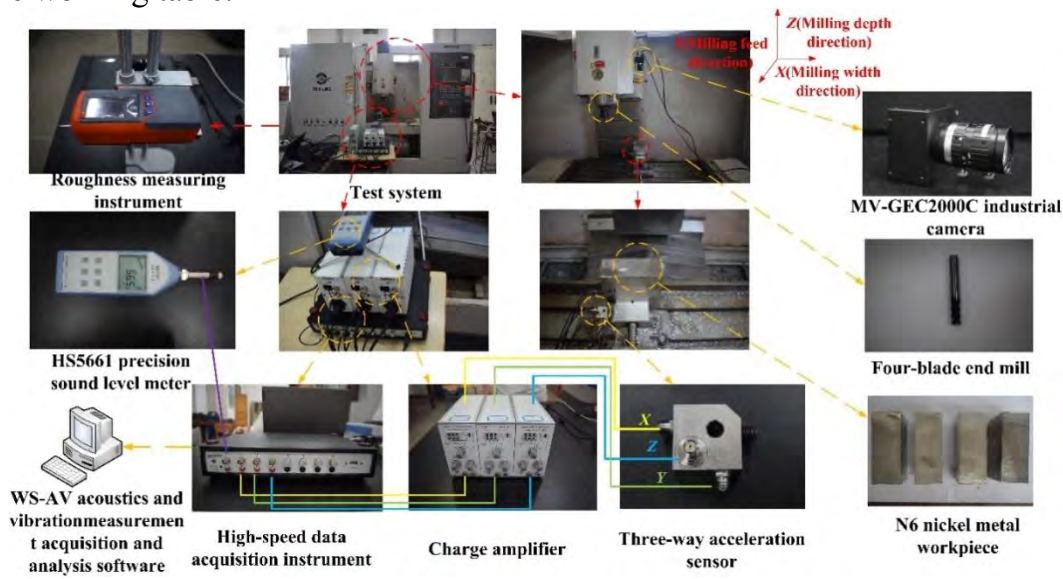


Figure 2 – Milling test system

2) Connecting and detecting noise equipment: The noise measurement system is mainly composed of sound calibrator, precision sound level meter, high-speed data acquisition instrument, WS-AV acoustic and vibration measurement acquisition and analysis software developed by Beijing Spectrum Company, and the sound level calibrator is used to calibrate the sound level meter before the beginning of the test. The sound level meter is connected to a high-speed data acquisition instrument, and the received sound signal is processed and converted into a voltage signal and input into the high-speed data acquisition instrument. The voltage signal collected by the high-speed data acquisition instrument is converted into the sound pressure time domain signal for display in the WS-AV acoustic and vibration measurement and analysis software;

(3) Connecting and testing vibration equipment: The vibration measurement system is mainly composed of YD-21 piezoelectric three-dimensional acceleration sensor, YE5852 charge amplifier, high-speed data acquisition instrument, WS-AV acoustic, and vibration measurement acquisition and analysis software developed by Beijing Spectrum Company. The output ports of the X, Y, Z axis of the piezoelectric three-dimensional acceleration sensor are connected to the charge amplifier respectively. The charge amplifier is connected to the high-speed data acquisition instrument through the dedicated data line. The vibration signal is converted into the voltage signal and input into the high-speed data acquisition instrument. The voltage signal collected by the high-speed data acquisition instrument is converted into a three-way vibration acceleration time domain signal for display in the WS-AV acoustic and vibration measurement acquisition and analysis software;

(4) Connecting and detecting surface texture: the surface texture acquisition device is composed of MV-GEC2000C industrial camera, optical lens, and MindVision software. Before the beginning of the test, the industrial camera was fixed near the spindle of the machine tool, and the focal length of the industrial camera equipped with optical lenses was adjusted. The industrial camera was connected to the MindVision software on the personal computer with a gigabit network. The workpiece after milling was moved to a fixed position, and the industrial camera was operated by the MindVision software for shooting;

(5) Complete the milling test: According to the test design developed in table 1, the milling test is carried out according to the test process in figure 3. According to the principle of full factor design, there are 64 groups of test schemes, each group of test schemes for two tests, a total of 128 experiments, in the test collection and preservation of milling sound pressure and milling vibration test data. At the end of each milling test, the nickel metal block is moved to a fixed position, and the industrial camera is operated by MindVision software to shoot the surface texture of the workpiece. After the shooting of the workpiece surface, the roughness measuring instrument is used to measure the milling surface for five times. The roughness measuring instrument is shown in figure 2. The average roughness of the five measurements is taken as the final roughness of the milling surface. The next test was conducted after the measurement, and the power supply was shut down until 128 tests were completed.

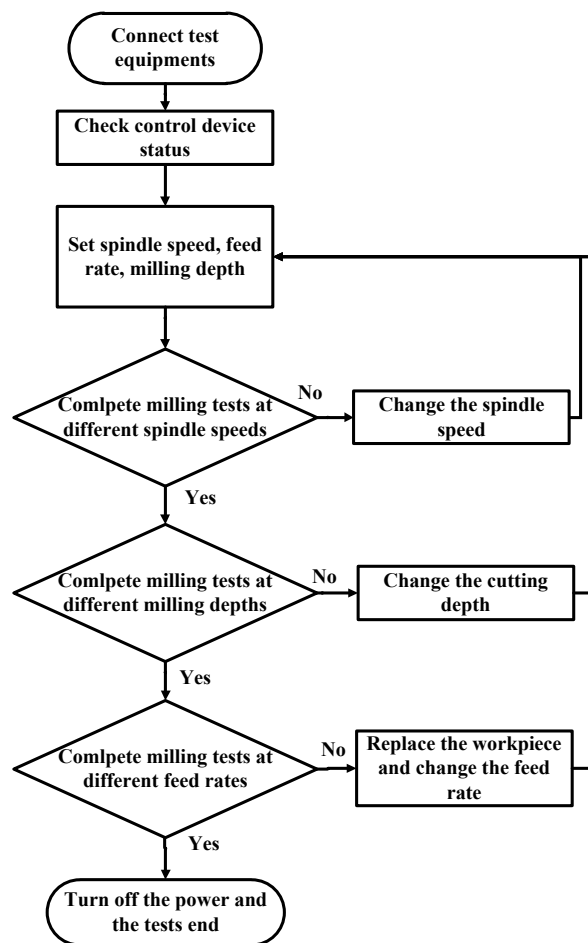


Figure 3 – Flow chart of the test scheme

Test results and analysis

Extract the characteristic values of milling noise-vibration and workpiece texture

The time domain signals of milling sound pressure and vibration were collected by WS-AV acoustic and vibration measurement and analysis software. According to the test records, figure 4 shows the time-domain curves of the first test milling sound pressure and three-dimensional milling vibration when $n = 850$ r/min, $v_f = 14$ mm/min, $a_p = 1$ mm.

1) Extraction of milling noise eigenvalue

According to Eq. (1), the sound pressure signal is converted into the sound pressure

level signal, and the root-mean-square of sound pressure level L_{pRMS} is taken as the characteristic value of milling noise.

$$L_p = 20 \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (1)$$

In the formula, p_0 is the reference sound pressure, usually $20 \mu\text{Pa}$, L_p is the sound pressure level of milling noise.

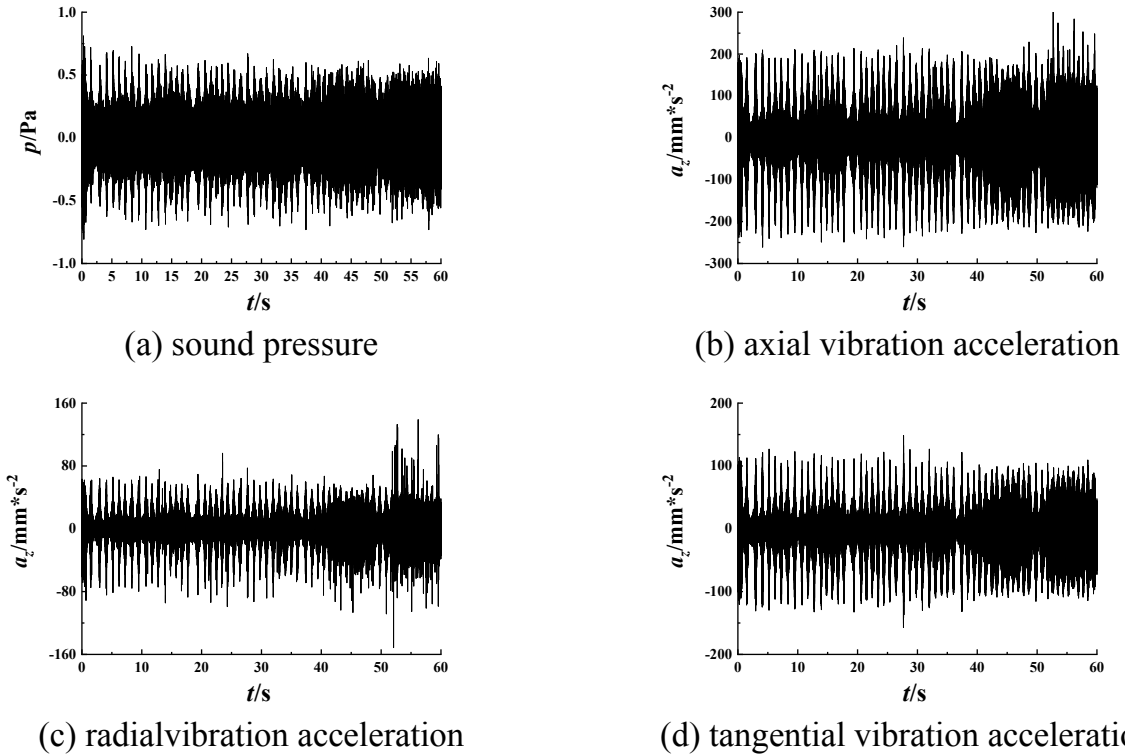


Figure 4 – Time-domain curve of milling sound pressure and vibration (at $n=850\text{r/min}$, $v_f=14 \text{ mm/min}$, $a_p=1\text{mm}$)

2) Extraction of three-way vibration eigenvalues in milling

The root-mean-square of three-way milling vibration acceleration (axial a_{RMS-x} , radial a_{RMS-y} , and tangential a_{RMS-z}) belongs to the same type of data. Therefore, principal component analysis (PCA) is used to reduce the dimensionality of three-way milling vibration acceleration [27]. First, standardize the root-mean-square data of the three-way milling vibration acceleration according to Eq. (2), and then calculate the correlation coefficient matrix based on the standardized data, as shown in table 2.

$$Z_j = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

In the formula, $\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n}$, $s_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}$, n is the number of trials, and m is the number of principal component variables.

Table 2 – Correlation coefficient matrix

Composition	Z_1	Z_2	Z_3
Z_1	1	0.9423	0.9701
Z_2	0.9423	1	0.9717
Z_3	0.9701	0.9717	1

The Jacobi method is used to solve the correlation coefficient matrix, and the eigenvalues and corresponding eigenvectors of the correlation coefficient matrix are obtained. The eigenvalues are arranged from large to small. Finally, the principal component contribution rate and the cumulative contribution rate of each eigenvalue are solved by Eq. (3), as shown in table 3.

$$e_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}, i = 1,2,3 \quad (3)$$

In the formula, e_i is the contribution rate of the principal component, $\sum_{i=1}^m e_i$ is the cumulative contribution rate. It is generally believed that the number of principal components when the cumulative contribution value is greater than 90% is the optimal number of variables.

Table 3 – Principal component characteristic value and variance contribution rate

Composition	Eigenvalue	Eigenvector			Principal component contribution rate %	Cumulative contribution rate %
Z ₁	2.9228	0.5753	0.5756	0.5811	97.43	97.43
Z ₂	0.0577	0.7169	-0.6970	0.0193	1.92	99.35
Z ₃	0.0195	0.3939	0.4277	-0.8136	0.65	100

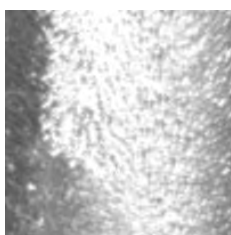
According to the calculated data in table 3, it can be seen that the cumulative contribution rate of the principal component Z₁ is 97.43%, which is higher than 90%. Therefore, the Z₁ corresponding eigenvector can be multiplied by the root-mean-square of three-way milling vibration acceleration instead of the original root-mean-square of three-way milling vibration acceleration to characterize the main information of the original sample. According to the eigenvectors in table 3, the principal component calculation formula can be obtained:

$$a_{dRMS} = 0.5753a_{RMS-x} + 0.5756a_{RMS-y} + 0.5811a_{RMS-z} \quad (4)$$

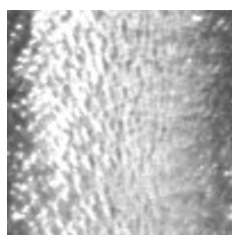
In the formula, a_{RMS-x} , a_{RMS-y} , and a_{RMS-z} are the root-mean-square of three-way milling, vibration acceleration, a_{dRMS} is the root-mean-square vibration acceleration after dimensionality reduction. Choose a_{dRMS} as the characteristic value of the three-way vibration acceleration.

3) Extraction of workpiece texture feature value

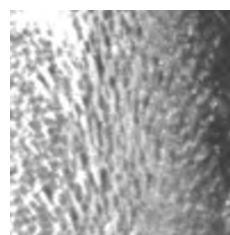
Use MindVision software to shoot the surface texture image of the workpiece after milling, and the image size is reduced to 256×256 resolution. According to the test record, figure 5 shows the surface texture image of the milled workpiece after the first test when $v_f=14$ mm/min and $a_p=4$ mm.



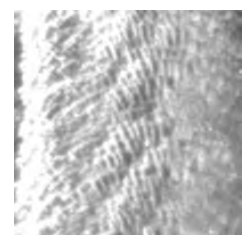
(a) $n=700$ r/min



(b) $n=850$ r/min



(c) $n=1100$ r/min



(d) $n=1150$ r/min

Figure 5 – Surface texture of workpiece

The feature value of workpiece surface texture is extracted according to grey difference statistics. Gray difference statistics is a method to describe the image characteristics by counting the difference between the two gray levels of the adjacent small distances[28]. The expression formula is shown in Eq. (5):

$$g(x, y) = f(x, y) - f(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (5)$$

Each $f(x, y)$ in the whole image is traversed to calculate $g(x, y)$, and the number of values obtained by $g(x, y)$ is counted to obtain the histogram of $g(x, y)$. The probability $p_g(i)$ (i is the gray difference) of $g(x, y)$ can be counted through the histogram. Based on the histogram, some characteristic parameters can be calculated, which quantify the image features. The main characteristic parameters are :

1. Mean represents the overall gray value of the image. If the image has more brightness areas, the average value is higher.

$$MEA = \frac{1}{m} \sum_i i p_g(i) \quad (6)$$

2. Contrast represents image clarity and texture groove depth. The deeper the texture groove, the greater the contrast value. The shallower the groove, the smaller the contrast value.

$$CON = \sum_i i^2 p_g(i) \quad (7)$$

3. Entropy represents the measurement of randomness. It is a measure of the amount of information in the image. When the distribution of the difference histogram is more dispersed, the entropy is larger.

$$ENT = - \sum_i p_g(i) \quad (8)$$

The root-mean-square of milling sound pressure level L_{pRMS} is selected as the characteristic value of milling noise signal, the root-mean-square of vibration acceleration a_{dRMS} after dimension reduction of root mean square of three-way milling vibration acceleration (axial a_{RMS-x} , radial a_{RMS-y} , tangential a_{RMS-z}) is selected as the characteristic value of milling vibration, and the average MEA , contrast CON and entropy ENT are selected as the characteristic values of workpiece surface texture image. In 128 milling tests, 18 tests were randomly selected as test data to verify the reliability of roughness prediction. In the test data, milling parameters, root mean square of milling sound pressure level, root-mean-square of vibration acceleration after dimension reduction, the eigenvalue of workpiece surface texture image, and measured roughness value are shown in table 4.

According to the test data, the correlation degree between milling parameters, milling noise, milling vibration, workpiece surface texture, and roughness is analyzed by grey correlation degree. Then, the PSO-LSSVM multidimensional feature prediction model is established with the root-mean-square of milling sound pressure level, the root-mean-square of reduced dimension milling vibration acceleration, mean MEA , contrast CON , and entropy ENT as feature input parameters, and the roughness as an output parameter. The reliability of the roughness prediction model is tested by comparing the correlation between the measured roughness and the predicted roughness.

Grey correlation analysis between roughness and multi-influencing factors

The grey relative correlation degree is to judge the similar correlation degree between

the sequences according to the change rate development trend of the factor sequence and the initial point [29]. In this paper, the correlation between roughness and influence factors (milling parameters, milling noise, milling vibration, and workpiece surface texture) is analyzed by grey relative correlation degree. The greater the value of grey relative correlation degree, indicating that the correlation between the impact factor and roughness is more significant.

Table 4 – Roughness test data

Test №	n (r/min)	v_f (mm/min)	a_p (mm)	L_{pRMS} (dB)	a_{dRMS} (mm/s ²)	EA	CON	NT	$Ra(\mu m)$
1	850	14	3	84.50	118.86	0.08	0.06	4.70	1.77
2	700	14	2	84.60	136.72	0.10	0.09	3.92	0.97
3	1000	14	1	77.00	36.92	0.06	0.09	4.04	0.19
4	700	12	3	89.70	220.99	0.09	0.08	4.08	0.38
5	850	12	3	90.40	230.81	0.11	0.06	4.40	0.41
6	1000	12	3	86.80	123.47	0.06	0.09	3.92	0.27
7	850	12	2	88.80	217.49	0.08	0.09	3.93	0.34
8	700	10	4	83.50	113.64	0.15	0.03	5.62	1.47
9	1000	10	4	83.70	109.04	0.16	0.03	5.40	2.08
10	1000	10	3	83.50	114.28	0.16	0.03	5.50	2.18
11	1150	10	2	81.50	81.96	0.15	0.04	5.07	1.57
12	850	10	1	79.60	72.70	0.14	0.03	5.23	0.97
13	1150	10	1	79.90	58.27	0.17	0.03	5.35	1.03
14	700	8	4	80.90	110.18	0.11	0.05	4.73	1.27
15	1150	8	2	87.60	185.23	0.17	0.03	5.38	1.14
16	850	8	1	76.20	28.83	0.13	0.05	4.76	0.66
17	1000	8	1	77.80	43.83	0.11	0.06	4.38	0.72
18	1150	8	1	81.40	83.06	0.16	0.03	5.49	1.41

According to the test data, the dimensions of milling parameters, root-mean-square of milling sound pressure level, root-mean-square of three-way milling vibration acceleration, and workpiece surface texture characteristic value are removed, and the initial values of each sequence are subtracted from the corresponding sequence values to obtain the initial value image of each sequence. The initial images of roughness Ra , spindle speed n , feed rate v_f milling depth a_p , milling sound pressure L_{pRMS} , three-dimensional milling vibration (axial/X-axis milling vibration a_{RMS-x} , radial/Y-axis milling vibration a_{RMS-y} , tangential/Z-axis milling vibration a_{RMS-z}), and workpiece surface texture (mean MEA , contrast CON , entropy ENT) are denoted as $X_0, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$, respectively. Grey relative correlation is expressed by γ_{ji} , and the calculation formula is as follows :

$$\gamma_{ji} = \frac{1 + |s'_j| + |s'_i|}{1 + |s'_j| + |s'_i| + |s'_i - s'_j|} \quad (10)$$

Among them,

$$|s'_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_j^{0'}(k) + \frac{1}{2} x_j^{0'}(n) \right| \quad (11)$$

$$|s'_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_i^{0'}(k) + \frac{1}{2} x_i^{0'}(n) \right| \quad (12)$$

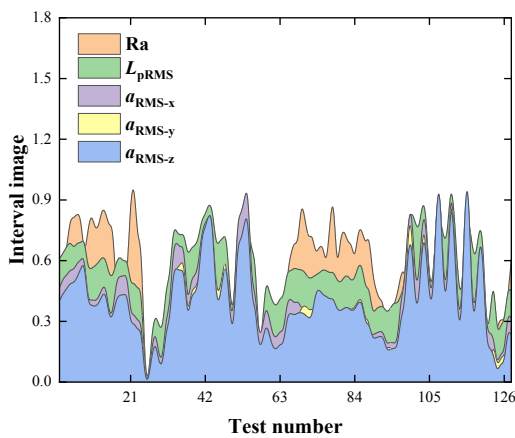
$$|s'_i - s'_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_i^{0'}(k) - x_j^{0'}(k)) + \frac{1}{2} (x_i^{0'}(n) - x_j^{0'}(n)) \right| \quad (13)$$

In the formula, $x_i^{0'}(n)$ and $x_j^{0'}(n)$ is the initial zero image of $X_i(n)$ and $X_j(n)$, $i, j=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$.

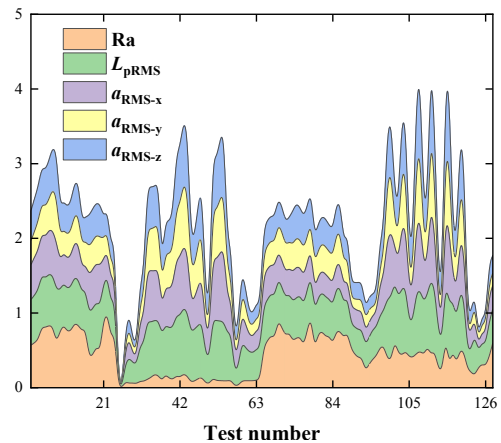
Table 5 – Grey relative correlation analysis between roughness and milling parameters

Roughness	Milling parameters	Grey relative correlation degree γ_{ji}	Grades
X_0	X_1	0.50	3
	X_2	0.95	1
	X_3	0.82	2

According to table 5: (1) The correlation coefficient between roughness and spindle speed is 0.5, indicating that the correlation between spindle roughness and speed is weak. (2) In the milling parameters, the grey correlation coefficient between roughness and feed speed is the highest, and the coefficient reaches 0.95, indicating that in the milling parameters, the correlation between feed speed and roughness is strong.



(a) Geometric similarity graph



(b) Trend similarity graph

Figure 6 – Changing trend of roughness, milling noise, and milling vibration after removing dimensions

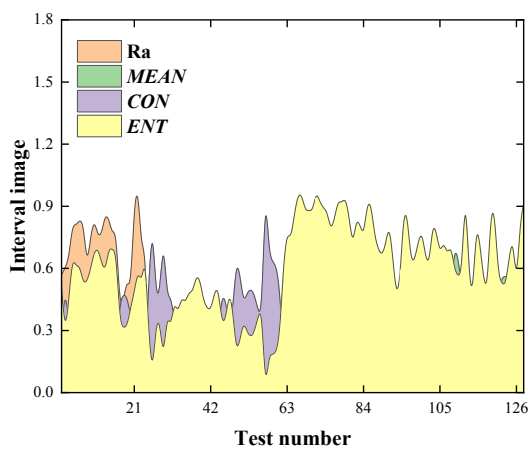
The variation trend of the waterfall diagram of milling noise, milling vibration, and roughness after dimensionless is shown in figure 6. It is found from figure 6 (a) that the overlapping area of milling noise, milling vibration, and roughness is small in the range of geometric transformation. It is found from figure 6 (b) that the variation trends of milling noise, milling vibration, and roughness are basically consistent. The grey correlation degree between milling noise, milling vibration, and roughness is further solved, and the calculation results are shown in table 6.

According to table 6: (1) The overall grey correlation coefficient of milling noise, milling vibration and roughness is small, which indicates that milling noise and milling vibration has a weak correlation with roughness. (2) In the three-way milling vibration, the

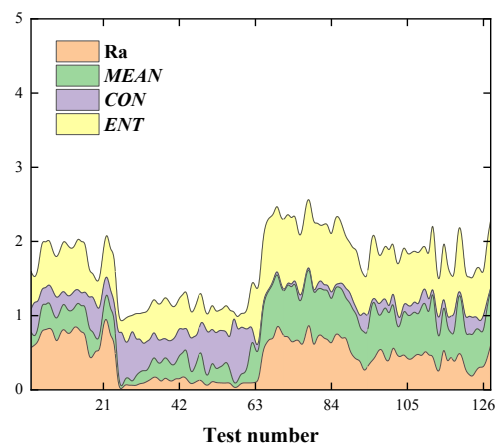
correlation between axial milling vibration and roughness is the largest, followed by tangential milling vibration and radial milling vibration. (3) The grey correlation coefficient between roughness and milling noise is 0.53, which indicates that the correlation between roughness and milling noise is not significant.

Table 6 – Grey relative correlation analysis between roughness and milling noise, milling vibration

Roughness	Milling noise-vibration	Grey relative correlation degree γ_{ji}	Grades
X ₀	X ₄	0.53	2
	X ₅	0.60	1
	X ₆	0.51	4
	X ₇	0.52	3



(a) Geometric similarity graph



(b) Trend similarity graph

Figure 7 – Changing trend of roughness and surface texture after removing dimensions

The variation trend of the waterfall diagram of surface texture and roughness of workpiece after dimensionless is shown in figure 7. It is found from figure 7 (a) that the surface texture and roughness of the workpiece are in the range of geometric transformation, and the overlapping area is large. It is found from figure 7 (b) that the variation trend of surface texture and roughness of workpiece is basically similar. The grey correlation degree between surface texture and roughness of workpiece is further solved, and the calculation results are shown in table 7.

Table 7 – Grey relative correlation analysis between roughness and surface texture

Roughness	Surface texture	Grey relative correlation degree γ_{ji}	Grades
X ₀	X ₈	0.50	3
	X ₉	0.79	1
	X ₁₀	0.51	2

According to table 7: (1) Among the feature values of the surface texture of the workpiece, the gray correlation coefficient between roughness and contrast is the highest, indicating that the correlation between roughness and contrast is better; (2) The correlation coefficient between other eigenvalues (mean and entropy) of workpiece surface texture and roughness is about 0.5, indicating that the correlation between these two eigenvalues and

roughness is weak.

Multi-dimensional feature roughness prediction model based on PSO-LSSVM

In order to monitor the surface quality of nickel metal and reduce the rejection rate of workpieces. In this paper, a multi-dimensional feature roughness prediction model is established. One-dimensional features (root-mean-square of sound pressure level L_{pRMS} and root-mean-square of vibration acceleration a_{dRMS}) and two-dimensional features (mean MEA , contrast CON , and entropy ENT) are selected as input parameters, and roughness is selected as an output parameter. A multi-dimensional feature prediction model is established based on particle swarm optimization least squares support vector machine (PSO-LSSVM), and the reliability of the prediction model is detected by actual roughness measurement.

Least squares support vector machine

LSSVM is a new machine learning method. This article uses LSSVM as a predictive model. Its main principles are as follows[30]: For the sample group $U = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ that records the input parameter x_i and output parameter y_i , the regression function of the least square support vector machine (LSSVM) is constructed using a nonlinear mapping from the input space to the output space:

$$y(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (14)$$

In the formula, the weight vector used in the w -dimensional high-dimensional feature space, the b -dimensional preset bias constant. Based on the principle of structural risk minimization, the least squares support vector machine optimization problem can be regarded as solving the minimum value of the above regression function by Eq. (15).

$$\begin{cases} \min H(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ y_i = w^T \varphi(x_i) + b + e_i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (15)$$

The regularization method used in the model is very helpful to improve the generalization ability of the model, γ is the regularization parameter, and e_i is the error between the output and the result of the regression function. Then introduce the Lagrange function to transform Eq. (15) into a dual space optimization model that is easier to solve:

$$L(w, b, e, a) = H(w, e) - \sum_{i=1}^n a_i (w^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i) \quad (16)$$

In the formula, $a_i \in R$ is the Lagrange multiplier. The RBF function is selected as the kernel function of LSSVM, and the width coefficient of the kernel function is σ , which can be expressed as:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|(x_i - x_j)\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

Take the partial derivative of Eq. (16), eliminate other variables to be sought, and introduce the kernel function of Eq. (17), which can be finally simplified into the solving function for a_i and b :

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n a_i K(x_i, x_j) + b \quad (18)$$

The fitting ability of the LSSVM model mainly depends on the selection quality of the regularization parameter γ and the kernel function width value σ , where γ affects the fitting accuracy and generalization ability of the model, and σ directly determines the calculation amount and execution efficiency of the model.

Parameter optimization of LSSVM based on particle swarm optimization

The particle swarm optimization is used to optimize the regularization parameter γ and the kernel function width value σ in LSSVM. The specific method is as follows:

Suppose that in a D -dimensional target search space, there are N particles forming a community, where the i -th particle is represented as a D -dimensional vector $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, and The "flying" speed of the i -th particle is also a D -dimensional vector, denoted as $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, the optimal position searched by the i -th particle so far is called the individual extremum, denoted as $p_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, and the optimal position searched so far by the entire particle swarm is the global extremum, denoted as $g_{best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$. When finding these two optimal values, the particles update their speed and position according to the following Eqs. (19) and Eqs. (20):

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{best}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (g_{best}^t - x_{id}^t) \quad (19)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (20)$$

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) * (f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max} & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (21)$$

Among them, c_1 and c_2 are learning factors, also called acceleration constants, ω is inertia weight, r_1 and r_2 are uniform random numbers in the range of $[0, 1]$, f is the real-time objective function value of the particle, f_{\min} and f_{avg} are all current the minimum target value and the average target value of the particle, ω_{\max} and ω_{\min} are the maximum and minimum inertia weights.

Steps of particle swarm optimization least square support vector machine:

- 1) Call the least squares support vector machine toolbox and import data samples;
- 2) Initialize the parameters of PSO and LSSVM: the value range of particle population number N , iteration number T , regularization parameter γ , and kernel function width value σ ;
- 3) Divide the training set and test set according to the set proportion. The training set consists of 110 groups and the test set consists of 18 groups. The input parameters are the root-mean-square of sound pressure level, the root-mean-square of dimensionality reduction vibration acceleration, the mean MEA , the contrast CON , and the entropy ENT , and the output parameter is roughness. The training set data are imported into the LSSVM model for training. At the same time, (γ, σ) is taken as the particle population, and the difference between the predicted roughness obtained by (γ, σ) training and the actual measured roughness is used as the fitness value $\text{Fit} [i]$;
- 4) Find the minimum fitness value $\text{Fit} [i]$ in the particle, denoted as the individual extreme p_{best} . The values of (γ, σ) are updated according to Eq. (19) and (20), where ω is calculated by Eq.(21);
- 5) The optimal parameters (γ, σ) of the LSSVM model obtained after the number of iterations is set, and LSSVM with the optimal parameters is used for model training to obtain the optimal LSSVM model;
- 6) The test set data are imported into the optimal LSSVM model for prediction, and the roughness prediction results are obtained.

The data of the test set in table 4 are imported into the optimal LSSVM to predict the roughness, and the correlation between the predicted value and the measured value of the roughness is analyzed. The change curve of the predicted value and the measured value is shown in figure 8, and the prediction accuracy of the optimal LSSVM is verified by the correlation coefficient. The optimal parameters (γ, σ) , correlation coefficient R , and root-

mean-square of prediction error MSE are shown in table 8.

Table 8 Multi-dimensional feature prediction model optimization parameters and prediction accuracy

Optimization Results	γ	σ	R	$MES (\mu m)$
	4.1564	0.6000	0.9254	0.2431

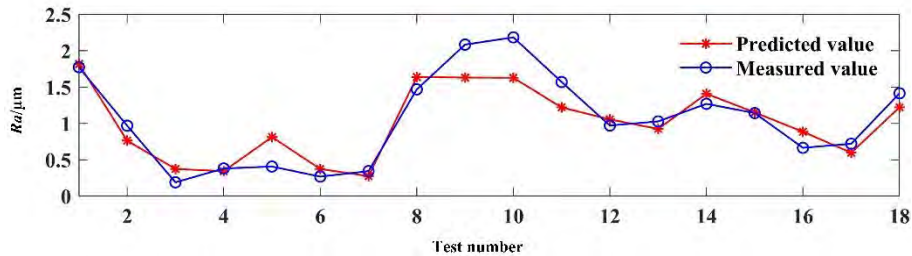


Figure 8 – Roughness measured value and predicted value change curve

According to table 8 and figure 8, the multi-dimensional feature roughness is predicted by PSO-LSSVM. The correlation coefficient between the predicted roughness and the measured roughness is relatively high, reaching 92.54 %, and the root-mean-square error is 0.2431. The prediction model has high reliability.

Conclusions

This paper takes nickel metal N6 as the research object, establishes a test system that collects nickel metal milling noise, milling vibration, workpiece surface texture, and roughness. The characteristic values of noise, vibration, and surface texture are extracted, and the root-mean-square of milling sound pressure level, the root-mean-square of vibration acceleration after dimensionality reduction, the mean, contrast, and entropy of surface texture are obtained. Through the gray relative correlation analysis method, the correlation between roughness and multi-influencing factors is analyzed. Finally, a multi-dimensional feature roughness prediction model of PSO-LSSVM with milling noise, milling vibration, and feature values of workpiece surface texture as input parameters and roughness as an output parameter is established. research shows:

(1) Among the multi-influencing factors, the grey correlation coefficient between roughness and feed speed is more than 0.9, indicating that the correlation between roughness and feed speed is significant. The gray correlation coefficient of milling noise, milling vibration and roughness is between 0.5 and 0.6, indicating that the correlation between noise-vibration and roughness is weak. Among the two-dimensional eigenvalues, the gray correlation coefficient between contrast and roughness is the highest, indicating that the depth of texture grooves in the image has a strong correlation with roughness;

(2) The multi-dimensional feature roughness prediction model is established based on PSO-LSSVM, and the optimal parameters of LSSVM are found based on PSO: regularization parameter γ is 4.1564, and kernel function width σ is 0.6. The prediction accuracy of the multi-dimensional feature roughness prediction model established by LSSVM with optimized parameters reaches 92.54 %, and the root-mean-square of prediction error is less than 0.25. The research shows that the LSSVM prediction model with optimized parameters can better predict the roughness.

Acknowledgment

This work was supported by the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX21_2618), Joint scientific research project of Sino foreign cooperative education platform in Jiangsu Province, the Science and Technology Plan Project of Xuzhou City (KC20188), and Undergraduate Innovation Training Program (202010320033Z).

REFERENCES

1. G. Jangali Satish, V. N. Gaitonde, V. N. Kulkarni. Traditional and non-traditional machining of nickel-based superalloys: A brief review. *Mater. Today* 2021; 44: 1448-54. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.632.
2. D. R. Patel, M. B. Kiran. A non-contact approach for surface roughness prediction in CNC turning using a linear regression model. *Mater. Today* 2020; 26: 350-5. doi:10.1016/j.matpr.2019.12.029.
3. O. Taga, Z. Kiral, K. Yaman. Determination of cutting parameters in end milling operation based on the optical surface roughness measurement. *Int. J. Precis. Eng. Man* 2016; 17(5): 579-89. doi:10.1007/s12541-016-0070-4.
4. A. P. Rifai, H. Aoyama, N. H. Tho, S. Z. Md Dawal, N. A. Masruroh. Evaluation of turned and milled surfaces roughness using convolutional neural network. *Measurement* 2020; 161: 107860(11pp). doi:10.1016/j.measurement.2020.107860.
5. V. Kumar, C. P. Sudheesh Kumar. Investigation of the influence of coloured illumination on surface texture features: A Machine vision approach. *Measurement* 2020; 152: 107297(6pp). doi:10.1016/j.measurement.2019.107297.
6. R. K. Beemaraj, M. S. Chandra Sekar, V. Vijayan. Computer vision measurement and optimization of surface roughness using soft computing approaches. *T. I. Meas. Control* 2020; 42(13): 2475-81. doi:10.1177/0142331220916056.
7. H. Zhang, J. Liu, S. Chen, W. Wang. Novel roughness measurement for grinding surfaces using simulated data by transfer kernel learning. *Appl. Soft. Comput* 2018; 73: 508-19. doi:10.1016/j.asoc.2018.08.042.
8. D. R. Patel, M. B. Kiran. Non-contact surface roughness measurement using laser speckle technique. *Mater. Sci. Eng* 2020; 895: 012007(7pp). doi:10.1088/1757-899x/895/1/012007.
9. H. Kumar, J. Ramkumar, K. S. Venkatesh. Surface texture evaluation using 3D reconstruction from images by parametric anisotropic BRDF. *Measurement* 2018; 125: 612-33. doi:10.1016/j.measurement.2018.04.090.
10. S. Ghodrati, M. Mohseni, S. Gorji Kandi. Application of image edge detection methods for precise estimation of the standard surface roughness parameters: Polypropylene/ethylene-propylene-diene-monomer blend as a case study. *Measurement* 2019; 138: 80-90. doi:10.1016/j.measurement.2019.02.033.
11. M. X. Too, M. M. Ratnam, H. M. Akil. Investigation on the effect of machining parameters on surface roughness during turning of kenaf fiber-reinforced composite using non-contact vision method. *Int. J. Adv. Manuf. Tech* 2020; 110(1-2): 309-25. doi:10.1007/s00170-020-05691-2.
12. S. Ghodrati, S. G. Kandi, M. Mohseni. Nondestructive, fast, and cost-effective image processing method for roughness measurement of randomly rough metallic surfaces. *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image. Sci. Vis* 2018; 35(6): 998-1013. doi:10.1364/JOSAA.35.000998.
13. J. Mahashar Ali, H. Siddhi Jailani, M. Murugan. Surface roughness evaluation of

electrical discharge machined surfaces using wavelet transform of speckle line images. *Measurement* 2020; 149: 107029(10pp). doi:10.1016/j.measurement.2019.107029.

14. S. Nouhi, M. Pour. Prediction of surface roughness of various machining processes by a hybrid algorithm including time series analysis, wavelet transform and multi view embedding. *Measurement* 2021; 184: 109904(12pp). doi:10.1016/j.measurement.2021.109904.

15. D. R. Patel, M. B. Kiran. Experimental analysis on relationship between roughness parameters and texture features of 6082T6 sandblasted components. *Mater. Today* 2019; 18: 3008-3016. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.172.

16. R. S. Umamaheswara Raju, R. Ramesh, V. R. Raju, S. Mohammad. Curvelet transforms and flower pollination algorithm based machine vision system for roughness estimation. *JOpt* 2018; 47(2): 243-250. doi:10.1007/s12596-018-0457-y.

17. Y. D. Chethan, H. V. Ravindra, Y. T. Krishne Gowda. Machined Surface Monitoring in Turning Using Histogram Analysis by Machine Vision. *Mater. Today* 2018; 5(2): 7775-81. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.455.

18. A. Cerro, P. E. Romero, O. Yiğit, A. Bustillo. Use of machine learning algorithms for surface roughness prediction of printed parts in polyvinyl butyral via fused deposition modeling. *Int. J. Adv. Manuf. Tech* 2021; 115(7-8): 2465-75. doi:10.1007/s00170-021-07300-2.

19. G. Wang, J. Han, Y. Lin, W. Zheng. Investigation on size effect of surface roughness and establishment of prediction model in micro-forming process. *Mater. Today. Commun* 2021; 27: 102279(14pp). doi:10.1016/j.mtcomm.2021.102279.

20. D. Kong, J. Zhu, C. Duan, L. Lu, D. Chen. Surface roughness prediction using kernel locality preserving projection and Bayesian linear regression. *MSSP* 2021; 152: 107474(24pp). doi:10.1016/j.ymsp.2020.107474.

21. G. Rajkumar, R. Balasundaram, N. Ganesh, S. Rajaram. Investigation of Turning Parameters of Machining INCONEL 718 using Titanium and Carbide Inserts. *Mater. Today* 2018; 5(5): 11283-94. doi:10.1016/j.matpr.2018.02.095.

22. S. Chandravadhana, R. Ohmsakthi Vel, D. Shameer, S. Kannappan, R. Nandhakumar, R. Kalyanasundaram. Surface roughness prediction on drilled holes on strenx steel using AWJM process. *Mater. Today* 2021; 45: 2419-21. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.838.

23. J. Lu, Z. Zhang, X. Yuan, J. Ma, S. Hu, B. Xue, X. Liao. Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression. *Measurement* 2020; 157: 107578(11pp). doi:10.1016/j.measurement.2020.107578.

24. S. Ngerntong, S. Butdee. Surface roughness prediction with chip morphology using fuzzy logic on milling machine. *Mater. Today* 2020; 26: 2357-62. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.506.

25. G. Urbikain Pelayo, D. Olvera-Trejo, M. Luo, L. N. López de Lacalle, A. Elías-Zuñiga. Surface roughness prediction with new barrel-shape mills considering runout: Modelling and validation. *Measurement* 2021; 173: 108670(10pp). doi:10.1016/j.measurement.2020.108670.

26. J. Han, J. Zhu, W. Zheng, G. Wang. Influence of metal forming parameters on surface roughness and establishment of surface roughness prediction model. *IJMS* 2019; 163: 105093(14pp). doi:10.1016/j.ijmecsci.2019.105093.

27. D. Q. Li, S. C. Li, Y. T. Hu, Z. Y. Chen. Research on the Relationship Between Turning Temperature Rising and Turning Vibration Based on Particle Swarm Optimization.

T. Can. Soc. Mech. Eng 2020; 45(2): 1-20. doi:10.1139/tcsme-2020-0030.

28. J. Heled, X. Zhang, H. Xue, G. Xiaojing, A. Yuan. Milk Somatic Cells Recognition based on Gray-Scale Difference Statistics. Matec. Web. Conf 2018; 173: 03065(4pp). doi:10.1051/mateconf/201817303065.

29. Y. Hu, S. Li, S. Li, E. Popov. Research on the combined prediction model of milling sound pressure level based on force-thermal-vibration multi-feature fusion. Int. J. Adv. Manuf. Tech 2021; 115(1-2): 233-45. doi:10.1007/s00170-021-07071-w.

30. P. Wang, S. Peng, T. He. A novel approach to total organic carbon content prediction in shale gas reservoirs with well logs data, Tonghua Basin, China. J. Nat. Gas. Sci. Eng 2018; 55: 1-15. doi:10.1016/j.jngse.2018.03.029.

Сонгуан Ли¹, Шунцай Ли^{1,2}, Жи Лиу², В.И. Слатин³, А.В. Петров³

¹Школа Машиностроения и Электротехники, Университет Цзянсу, Цзянсу, Китай, zslsc@263.net

²УЦ-СПБПУ Институт Инжиниринга, Университет Цзянсу, Цзянсу, Китай

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НИКЕЛЯ N6 ВО ВРЕМЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МНОГОМЕРНОЙ МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ШУМ, ВИБРАЦИЮ И ТЕКСТУРУ

Аннотация

Шероховатость является одним из важных показателей качества обработки поверхности. Для эффективного прогнозирования шероховатости поверхности металлического никеля во время фрезерования, в статье предложена многомерная система мониторинга сигналов о состоянии обработки никеля с использованием измерителей уровня звука, трехсторонних датчиков вибрации, промышленных камер и прибора для измерения шероховатости. Система собирает данные о шуме, вибрации, текстуре поверхности и шероховатости в процессе фрезерования. Алгоритм роя частиц (PSO) используется для оптимизации метода наименьших квадратов опорных векторов (LS-SVM), и, таким образом, создается модель прогнозирования шероховатости, которая принимает на вход характеристические значения шума, вибрации и текстуры поверхности образца и генерирует выходное значение шероховатости. Результаты показывают, что точность прогнозирования модели прогнозирования шероховатости с многомерным признаком на основе PSO-LSSVM составляет 92,54%. Исследование может дать теоретическое руководство для научного мониторинга шероховатости поверхности фрезерных заготовок.

Ключевые слова: никель; шероховатость; шум при фрезеровании, вибрация при фрезеровании; текстура поверхности; многомерная модель прогнозирования

В. Гридина, Д. П. Гасюк
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, viqwr@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ДОКУМЕНТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ, РАСКРЫВАЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЦЕССАМ АНТИКОРРОЗИЙНОГО ПОКРЫТИЯ В ИЗДЕЛИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Аннотация

В статье рассмотрены особенности разработки документов по стандартизации организации, которые раскрывают требования к антикоррозионным покрытиям.

Ключевые слова: стандарт организации, требования, процесс.

Особенностью географического расположения России является холодный климат. Холодный климат во многих регионах России сопровождается повышенной влажностью, что, соответственно, влияет на коррозионную устойчивость металлов. Над этой проблемой бьются долгие годы, одним из решений является нанесение защитного покрытия. Но ввиду протяженности границ, климат сильно разнится. Поэтому приходится разрабатывать покрытия с разными свойствами. Для его безопасного производства, нанесения и использования необходима стандартизация.

В России имеется несколько видов стандартов: предварительные национальные стандарты, национальные стандарты, международные стандарты, региональные стандарты, межгосударственные стандарты, стандарты организаций.

Рассмотрим особенности разработки документов стандарта организации, которые раскрывают требования к антикоррозионным покрытиям. При разработке стандарта организации необходимо опираться на национальные стандарты и технические регламенты Российской Федерации [1].

Для разработки документа стандарта, раскрывающих требования к антикоррозионным покрытиям, необходимо определить под какие требования будет разработан документ. Рассмотрим требования к обезжириванию поверхности растворителем, к промывке и сушке.

В качестве растворителей для обезжиривания используют трихлорэтилен стабилизированный, тетрахлорэтилен, уайт-спирит и нефрас-С 50/170. Трихлорэтиленом не допускается обрабатывать изделия:

- смоченные водой или водными растворами;
- из алюминия и его сплавов, содержащие большое количество стружки или имеющие небольшую толщину (менее 0,5 мм);
- из титана и его сплавов, используемые в авиастроении.

Водородный показатель водной вытяжки трихлорэтилена должен быть не менее 6. При использовании нестабилизированного трихлорэтилена в него добавляют стабилизатор СТАТ-1 в количестве от 5 до 10 кг/м³ или 0,01 кг/м³ одного из следующих веществ: триэтиламин, монобутиламин, уротропин.

Обезжиривание растворителями может проводиться как самостоятельно, так и в сочетании с другими методами обезжиривания в технологическом процессе.

Промывка проводится питьевой водой после каждой технологической стадии химической подготовки. Увеличение числа ступеней промывки улучшает качество

подготавливаемой поверхности. Так как химические компоненты предыдущей операции могут остаться на поверхности, воду в последней ванне промывки необходимо контролировать [2] таблица 15.

Продолжительность промывки должна составлять не менее 0,5 минуты. Их применяют как при методе погружения, так и при струйном методе. Ванны промывки должны быть проточными, ванна улавливания – непроточной, но с возвращением уловленного раствора в предыдущую технологическую ванну.

Для сушки применяются камеры любого типа, которые обеспечивают рециркуляцию горячего воздуха, газодинамический обдув изделий и удаление с них паров влаги. Сушку деталей, транспортируемых в барабанах из полипропилена проводят, не вынимая их из барабанов в сушильной камере с циркуляцией нагретого воздуха температурой не более 80°C.

При обезжиривании изделий с помощью щёток или протирочного материала, смоченных уайт-спиритом, допускается протереть поверхность насухо чистым обтирочным материалом, не оставляющим ворса, и обдуть сухим очищенным сжатым воздухом.

Несмотря на общие требования к рассмотренным процессам, каждая организация разрабатывает стандарт опираясь на свои климатические условия и региональные стандарты. В этом и заключается особенность разработки документов стандарта организации. В зависимости от климатических условий организация может использовать иные способы обезжиривания, промывки или сушки. Также может получить одобрение на разработку собственного способа того или иного этапа технологического процесса, при его грамотном обосновании.

Для снижения трудоёмкости и затрат в процессе обезжиривания организация может использовать фтористые растворители. Фтористые растворители в сравнении с остальными имеют ряд преимуществ: не воспламеняемы, обладают меньшей токсичностью, имеют очищающую способность уайт-спирита. Также имеют низкую точку кипения и незначительную теплоту испарения, что позволяет сократить расходы энергии на дистилляцию и даёт возможность вести сушку при низкой температуре, сокращая время на её проведение.

Для снижения расходов воды и сбросов сточных промывочных вод рекомендуется создание противоточных схем промывок. Также возможно приобрести устройство для очистки воды после промывок.

Таким образом, особенности разработки документов стандарта организации, которые раскрывают требования к антикоррозийным покрытиям заключаются в выборе требований, в климатических условиях и в финансовой составляющей. Также были даны некоторые рекомендации по снижению трудоёмкости и затрат в процессе обезжиривания и промывки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 1.4-2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения.
2. ГОСТ 9.402-2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию.

V. Gridina, D. P. Gasyuk
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia,
viqwr@gmail.com

**FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF DOCUMENTS ON THE
STANDARDIZATION OF THE ORGANIZATION REVEALING THE
REQUIREMENTS FOR THE PROCESSES OF ANTI-CORROSION COATING
IN MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTS**

Abstract

The article discusses the features of the development of documents on the standardization of the organization which disclose the requirements of anti-corrosion coatings.

Keywords: organization standard, requirements, process.

К.В. Пономарева, Д.П. Гасюк
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, ponomareva.kajra@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА НОРМИРОВАНИЯ ТРУДА НА ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В УСЛОВИЯХ ПОЗАКАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Статья раскрывает особенности организации нормирования труда на предприятиях с опытно-экспериментальным производством. Определены особенности организации опытно-экспериментального производства. Определена сущность и задачи нормирования труда. Определены методы нормирования.

Ключевые слова: опытно-экспериментальное производство, нормирование труда, нормы времени.

В период плановой экономики были организационно-штатные структуры предприятий похожие по своей сути в тех или иных отраслях, поэтому существовали единые общесоюзные нормы по порядку нормирования затрат труда специалистов. В наше время существуют отраслевые методические указания по определению нормативов трудовых затрат на тех или иных производствах. Но, в конечном итоге, нормы устанавливаются предприятиями самостоятельно в зависимости от имеющихся ресурсов, компетентности персонала и технологического оснащения. Также это касается и опытно-экспериментального производства.

Нормирование труда, направленное на реальную оценку затраченных ресурсов времени, сырья и материалов в процессе производства, является составной частью технологической подготовки производства. Нормирование создает основу для учета и планирования затрат труда [1].

Основными задачами нормирования затрат труда являются:

1. Выявление резервов дальнейшего роста производительности труда за счет внедрения технически обоснованных норм времени;
2. Выявление и устранение потерь рабочего времени;
3. Поддержание постоянной прогрессивности норм путем своевременного их пересмотра, исходя из внедряемых организационно-технических мероприятий, повышения навыков и квалификации работников, а также улучшения условий труда.

Проведенный анализ процесса проведения нормирования труда позволил выделить ряд основных методов нормирования труда, нашедших наибольшее распространение:

- аналитический, который включает в себя аналитический исследовательский (АИМ), аналитический расчетный (АРМ), комплексный (сочетание АИ АР), математико-статистический методы;
- суммарный, который включает в себя метод экспертных оценок, метод статистической аналогии.

Опытно-экспериментальное производство является особым типом производства, обеспечивающее процесс научной деятельности, представляющее итоги данной деятельности, создающее условия для передачи и единичного

производства нового продукта в серийное или массовое производство [2], обеспечивающее формирование мотивации по освоению новых технологий, организаций на других предприятиях промышленности. Главная задача данного производства является отработка первых образцов новых изделий, специальной оснастки.

В соответствии с ГОСТ 14.004-83 «Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий» [3], *опытное производство* - производство образцов, партий или серий изделий для проведения исследовательских работ или разработки конструкторской и технологической документации для установившегося производства.

Ю.С. Ширяева и М.В. Оранова [4] предложили свое определение данного типа производства. *Опытное производство* — это особый тип производства, созданный по инициативе научных учреждений, или по инициативе самостоятельных физических и юридических лиц, целью которого является:

- разработка и проектирование новых видов техники, технологий и продукции;
- изготовление, испытание и доведение до серийного производства современных, оригинальных, уникальных опытных образцов, соответствующих запланированным технико-экономическим характеристикам с заданным или превосходящим экономическим эффектом в условиях, максимально приближенных к промышленным;
- изготовление специального оборудования для проведения новых научных исследований и разработок.

На опытно-экспериментальном производстве проведение нормирования труда является трудоёмким процессом, сопровождаемым рядом неопределённостей и требующим постоянной корректировки установленных норм для каждого последующего заказа. Выполняемые работы являются различными как по сложности, так и по продолжительности, поэтому на производственном участке необходимо присутствие различного вида оснасток, инструментов и другого оборудования широкого спектра специализации.

В рамках опытно-экспериментального производства выполняемые заказы являются уникальными. Поэтому работники планово-экономического отдела машиностроительных предприятий не могут проводить сравнение затрат по предыдущим годам или предшествующим заказам.

Продукция опытно-экспериментального производства является результатом НИР и ОКР, что сопровождается выпуском соответствующей конструкторской и технологической документацией. Данная документация при передаче на производство требует централизованное нормирование в установленные сроки, а также для оформления необходимой документации (нарядов) для рабочих.

Программа производственной деятельности опытного участка предприятия не имеет постоянного плана производственно-хозяйственной деятельности, что является причиной для пересмотра норм инженером по нормированию труда совместно с мастером участка от заказа к заказу. В таком случае производится пересмотр норм времени, фотографирование рабочего дня и хронометраж наблюдений.

Как ранее было отмечено, основное оборудование опытно-экспериментального производства – универсальное. Оно требует высокой квалификации рабочих. Этот факт является особенностью процесса нормирования труда, так как при пересмотре норм времени, количества рабочих и трудоемкости изделия принимается решение о сокращении количества работников на участке, о своевременной переподготовке

либо повышении квалификации специалистов, а также рассмотрения вопроса оплаты труда.

Существенной отличительной чертой опытного производства является логистика и расположение производственных участков, согласно технологии изготовления конечного изделия. Организация участка или цеха требует создания производственных участков по видам необходимых работ: токарная, фрезерная, термическая, шлифовальная, сварочная, монтажная, маркировочная, испытательная, упаковочная и т.д. В связи с этим инженер по нормированию труда производит пооперационное нормирование трудовых затрат по межотраслевым и местным нормативам (прим. Единый тарифно-квалификационный справочник) [5], а также аналитическим расчетным методом применительно к видам работ, где норма определяется для каждой операции на основании технологических процессов.

Таким образом, процесс нормирования труда на опытно-экспериментальном производстве необходимо проводить постоянно при выполнении каждого нового заказа, в связи со сложностями организации труда на данном типе производства, за счет единичного и мелкосерийного производства, оснащения цехов, квалификации работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО АБ-45.06.01.80 Стандарт организации, Комплексная система управления качеством работ, Организация нормирования труда и заработной платы на опытном производстве оптических приборов, 1980- 29 с.
2. Каракоц В.В. Экономика научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и ОКР). Учебное пособие. Ленинград, 1979. 72 с.
3. ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. – Москва: Изд-ство стандартов. 1983- 6с.
4. Ширяева Ю. С., Оранова М. В. Современный взгляд на опытное производство и механизм управления им на промышленном предприятии // Вестник ННГУ. 2007. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyu-vzglyad-na-opytnoe-proizvodstvo-i-mehanizm-upravleniya-im-na-promyshlennom-predpriyatii>.
5. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 07.10.2022) // Тарифные системы оплаты труда.

K. V. Ponomareva, D.P. Gasyuk
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, ponomareva.kajra@yandex.ru

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF MOUNTING ANGLE SENSORS ON ELECTRIC MOTORS

Abstract

The article is devoted to the peculiarities of the organization of labor rationing at enterprises with pilot production. The features of the organization of experimental production are determined. The essence and tasks of labor rationing are defined. The methods of rationing are defined.

Keywords: pilot production, labour rate setting, standard time.

УДК 004.94:539.3

А.И. Веремейчик
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
vai_mrtm@bstu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА НОЖА ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ДВИЖУЩИМСЯ НОРМАЛЬНО-КРУГОВЫМ ИСТОЧНИКОМ

Аннотация

Для повышения эксплуатационных свойств дробильного инструмента предлагается использование плазменного упрочнения рабочей поверхности с помощью сжатой движущейся плазмы. С целью определения оптимальных режимов термообработки проведено исследование температурных полей в ноже дробильной машины при действии движущегося нормально-кругового источника тепла.

Ключевые слова: пятно нагрева, плазменная струя, температура, источник нагрева, тепловой поток.

Введение

Термическое упрочнение является одним из наиболее эффективных способов увеличения ресурса работы деталей машин и инструмента [1]. Из всех способов такой термообработки можно выделить поверхностную закалку деталей при помощи движущейся плазменной дуги [1-3]. В отличие от традиционных способов термообработки воздействие концентрированной плазменной струи включает одновременное тепловое, механическое и радиационное воздействие. Суть поверхностной плазменной закалки состоит в быстром нагреве поверхностного слоя до аустенитного состояния и интенсивном охлаждении с целью получения высокой твердости, износостойкости и прочности приповерхностного слоя в сочетании с вязкой сердцевиной самого тела. Важнейшей характеристикой процесса термообработки является температурное поле. Темп изменения температуры при нагревании или охлаждении определяет величину температурных градиентов и напряжений и влияет на фазовые превращения в металле. Поэтому величины температур и скорости нагрева или охлаждения должны оказывать огромное влияние и на структуру материала в зоне нагрева. Кроме того, в последнее время появилась необходимость в совершенствовании элементов оборудования для плазменной закалки в связи с появлением новых материалов, скоростных методов их обработки, а также предъявляемых требований к качеству обрабатываемых поверхностей. Все это с учетом дорогостоящего оборудования для таких исследований приводит к необходимости разработки компьютерных моделей процесса плазменного упрочнения, позволяющих варьировать режимами и параметрами процесса. Использование систем автоматизации инженерных расчетов (CAE-систем) на современном этапе является одним из наиболее эффективных способов решения

такого рода задач по исследованию напряженно-деформированного состояния тел, оценке прочностных характеристик и прогнозирования долговечности конструкций. Программная система конечно-элементного анализа ANSYS является одной из наиболее эффективных CAE-систем. Программное обеспечение ANSYS со специальным интерфейсом *ANSYS Workbench* позволяет успешно решать различные задачи механики деформируемого твердого тела, теплофизики т. д.

Целью работы является изучение температурных полей в ноже для измельчения древесных отходов при нагреве режущего лезвия движущимся источником с тепловым потоком в форме пятна с распределенной по нормальному закону интенсивностью, моделирующим процесс поверхностной плазменной закалки движущейся плазменной дугой.

Методы

Нож дробильной машины представляет собой усеченную пирамиду из конструкционной легированной стали 40X (рисунок 1).

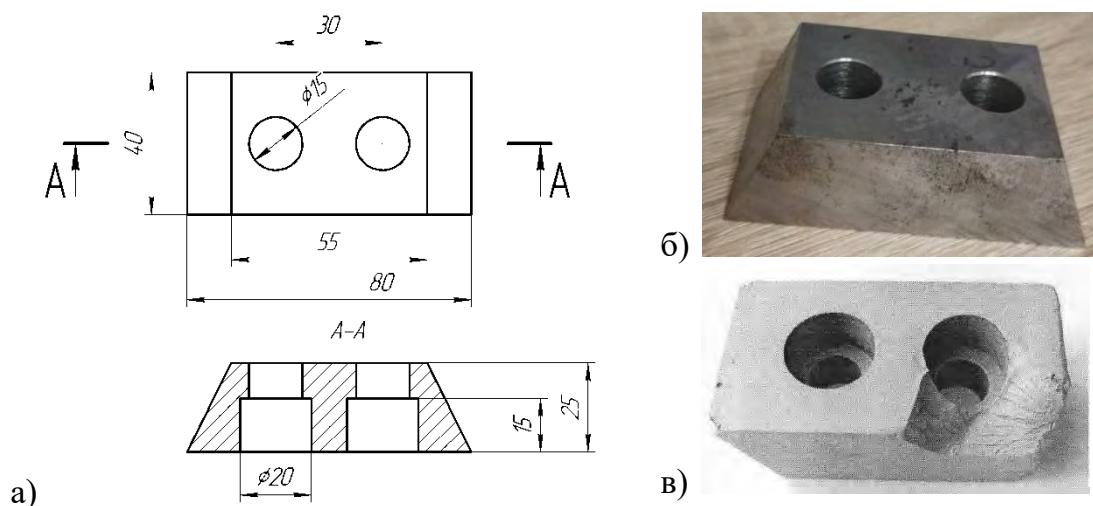


Рисунок 1 – Нож дробильной машины: а) чертеж, б) внешний вид, в) после эксплуатации

В процессе изготовления ножи подвергались предварительной объемной закалке до 34–42 HRC. Анализ характера повреждаемости и износа ножей позволил выявить основные дефекты в процессе эксплуатации – смятие и сколы режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне, трещины и вмятины на поверхности, поверхностная коррозия металла [4] (рисунок 1, в). Результаты проведенных экспериментов позволили установить, что объемная термозакалка не обеспечивает требуемой прочности поверхностного слоя детали. Для повышения износостойкости в процессе трения и увеличения сопротивляемости пластическому и хрупкому разрушению предлагается применить предварительную объемную закалку и поверхностную плазменную закалку как наиболее полно обеспечивающую оптимальное сочетание величины вязкости сердцевины детали с высокой поверхностной твердостью. Такое упрочнение реализуется путем локальной закалки с помощью быстро перемещающегося высокоинтенсивного концентрированного источника тепла – плазменной дуги, генерируемой плазмотроном постоянного тока, и характеризуется рядом преимуществ: достаточно малой глубиной закалки до 0,7 мм и лишь в местах износа; твердость и

износостойкость поверхностного слоя значительно выше, чем при объемной закалке; отсутствие термических деформаций благодаря локальности и кратковременности взаимодействия струи плазмы с поверхностью металла.

Для разработки оптимальных режимов термообработки проведено исследование температурных полей при упрочнении зоны режущей кромки ножа. Для моделирования и расчетов использовалась конечно-элементная расчетная платформа *ANSYS Workbench 2019 R2*. Все термодинамические свойства материала, зависящие от температуры, задавались в табличном виде (таблица 1) [5] с помощью модуля управления материалами, представленном в *ANSYS Workbench* элементом *EngineeringData*, входящим в структуру блока инженерного анализа.

Таблица 1 – Характеристики стали 40X

Свойства	Температура, °C									
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Плотность ρ_n , кг/м ³	7850	7850	7800	7800	7800	7650	7650	7650	7650	7650
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)	42	39	36	34	32	30	28	26	24	22
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°C		12,2	13,2	13,7	14,1	14,6	14,8	15,0	15,0	15,0
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·°C)	466	508	529	563	592	622	634	664	664	664

Построение геометрической модели детали выполнено с использованием графического модуля *ANSYS SpaceClaim*. Сетка построена при помощи модуля *Mesh*. В зоне воздействия источника тепла с помощью команды *EdgeSizing* задается уплотненная сетка. Схема нагружения режущей части ножа движущимся источником тепла и его конечно-элементная модель приведены на рисунке 2. Ось y направлена в сторону движения центра пятна, ось z – вглубь детали, x – вдоль ребра длиной 80 мм (рисунок 2).

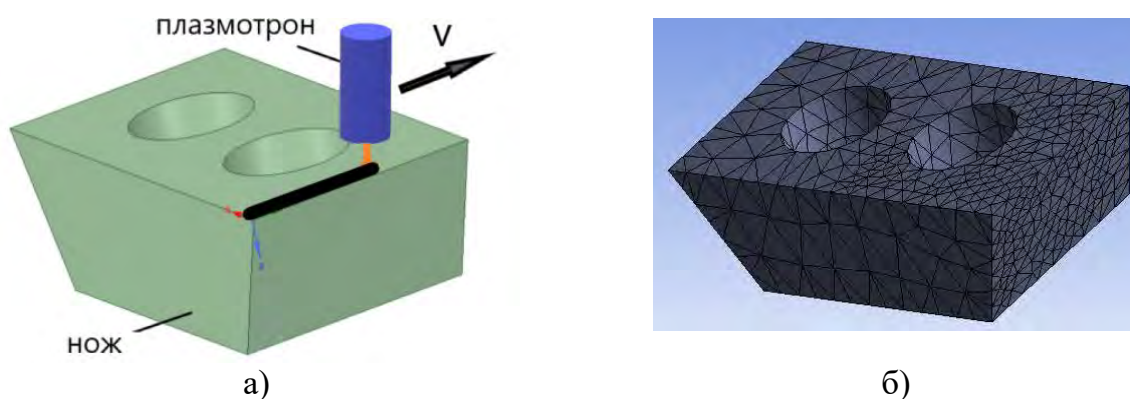


Рисунок 2 – Схема процесса термообработки (а) и конечно-элементная модель ножа (б)

Для описания поля температур в ноже при нагреве его плазменной дугой необходимо решить краевую задачу теплопроводности с граничным условием второго рода. Задача рассматривается в пространственной постановке для теплового потока в форме пятна с интенсивностью, распределенной по нормальному закону:

$$q(r) = q_0 \exp(-kr^2) \quad (1)$$

где $q_0 = P_0 \frac{k}{\pi}$ – максимальная интенсивность потока; P_0 – эффективная мощность источника тепла; r – радиальная координата; k – коэффициент сосредоточенности потока, характеризующий концентрацию энергии в пятне нагрева, определяется по формуле:

$$k = 1/r^2, \quad (2)$$

где r – граничный радиус пятна нагрева.

Начальная температура принималась равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Интенсивность потока во времени принимается постоянной. Для моделирования распространения температуры вглубь детали создан макрос для *ANSYS Mechanical* на параметрическом языке программирования *APDL*, в котором задается скорость движения источника нагрева, координаты его начального положения, время движения и др. В соответствии со скоростью движения пятна нагрева к узлам конечно-элементной модели ножа вдоль режущего лезвия пошагово последовательно прикладывалась тепловая нагрузка.

На поверхностях модели ножа задавалась конвекция с коэффициентами теплоотдачи $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Расстояние от центра пятна нагрева до вершины лезвия в процессе перемещения пятна нагрева не менялось и варьировалось в пределах $s = 2 \dots 5 \text{ мм}$, скорость движения источника тепла $V = 2 \dots 20 \text{ мм/с}$, радиус пятна нагрева изменялся в диапазоне $r = 1 \dots 10 \text{ мм}$.

Результаты и обсуждение

В результате теоретических исследований динамической модели в широком диапазоне параметров были получены результаты решения задачи теплопроводности в виде линий уровня (изотерм), отражающих распределение температуры в ноже. Некоторые результаты определения температурных полей и тепловых потоков для различных скоростей источника нагрева и радиусов пятна нагрева при $P_0 = 1500 \text{ Вт}$ приведены на рисунках 3–6. Следует отметить возможности *ANSYS Workbench* в визуализации результатов в сечении и построении зависимостей температуры от времени. Применяя функцию *SectionPlane*, создавалась плоскость для построения сечения модели (рисунок 3).

Для различных скоростей движения источника нагрева исследовано распределение температуры на поверхности ножа и по глубине, а также влияние радиуса пятна нагрева на температурное поле и тепловой поток. Типичные зависимости показаны на рисунках 7, 8.

По результатам исследований установлено, что зона термического воздействия в поперечном сечении ножа имеет форму сегмента. Анализ температурных полей в ноже показывает, что при движении источника нагрева точка, в которой возникает максимальная температура, отстает от центра пятна нагрева, в котором плотность теплового потока максимальна.

Результаты теплового анализа сохраняются в отдельном файле и могут использоваться при проведении статического анализа (определении напряженно-деформированного состояния) модели в качестве внешней нагрузки.

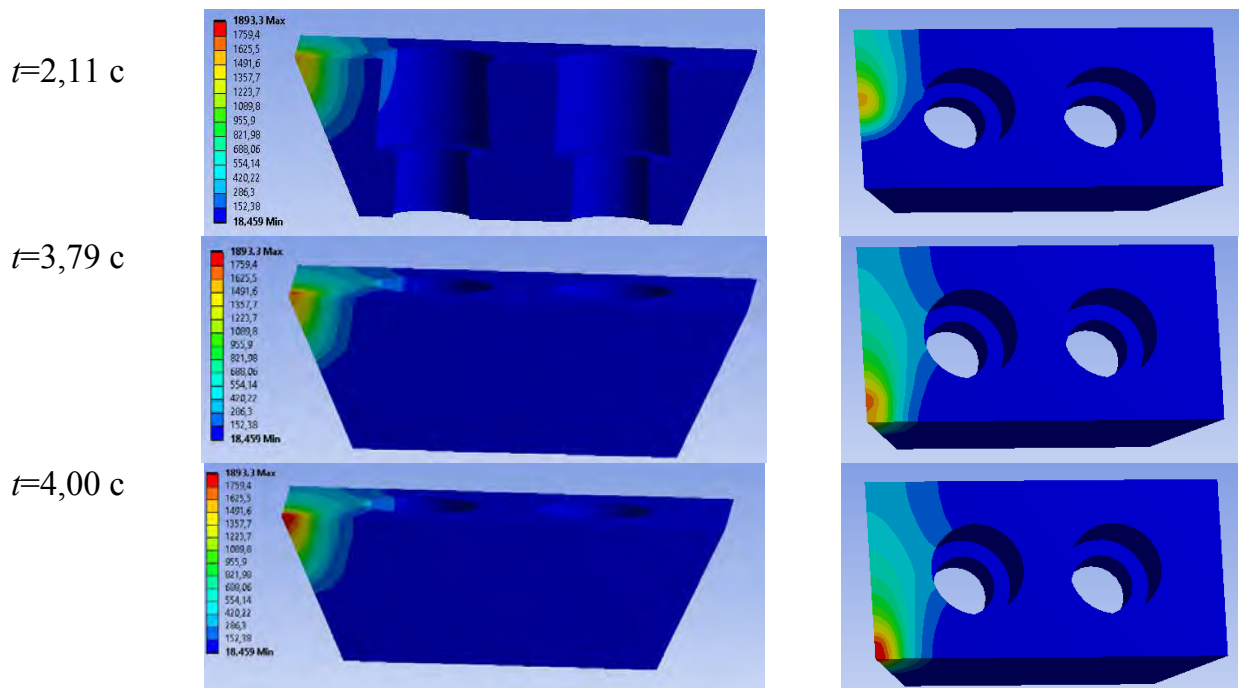


Рисунок 3 – Распределение полей температур на поверхности и в сечении ножа при скорости движения источника нагрева $V=10$ мм/с, $s=2,5$ мм, $r=5$ мм

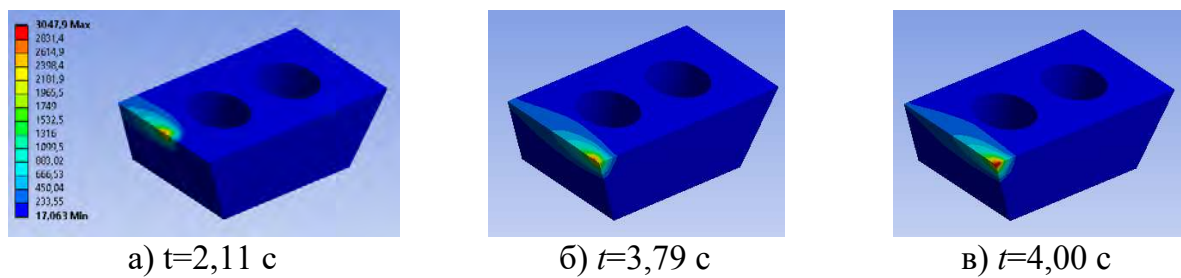


Рисунок 4 – Распределение полей температур на поверхности ножа при скорости движения источника нагрева $V=10$ мм/с, $s=2,5$ мм, $r=2$ мм

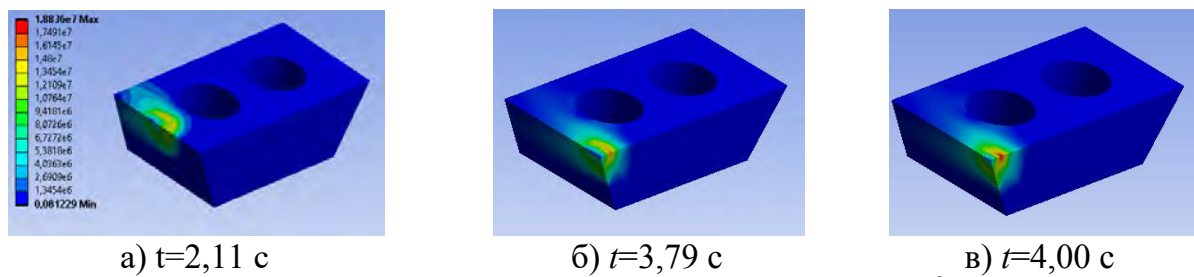
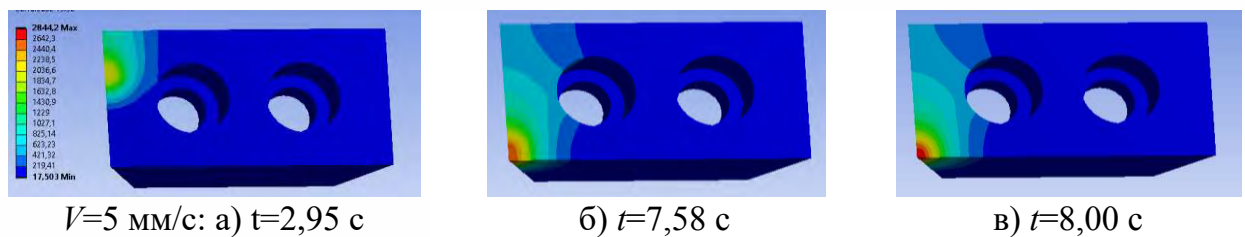


Рисунок 5 – Распределение плотности теплового потока ($Вт/м^2$) при скорости движения источника нагрева $V=10$ мм/с, $s=2,5$ мм, $r=5$ мм



$V=5$ мм/с: а) $t=2,95$ с

б) $t=7,58$ с

в) $t=8,00$ с

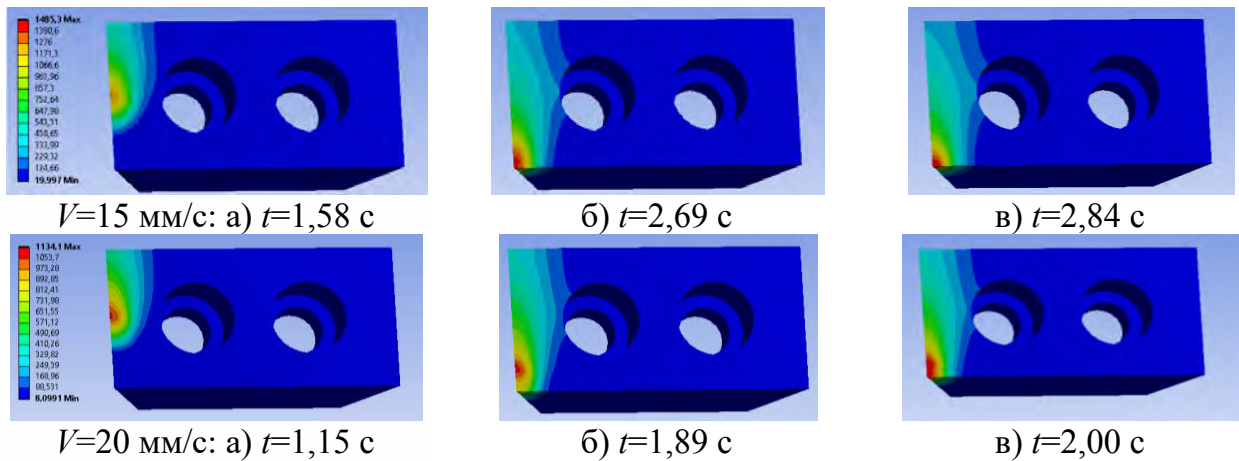


Рисунок 6 – Распределение температуры на поверхности ножа при различных скоростях движения источника нагрева $V=10$ мм/с, $s=2,5$ мм, $r=5$ мм

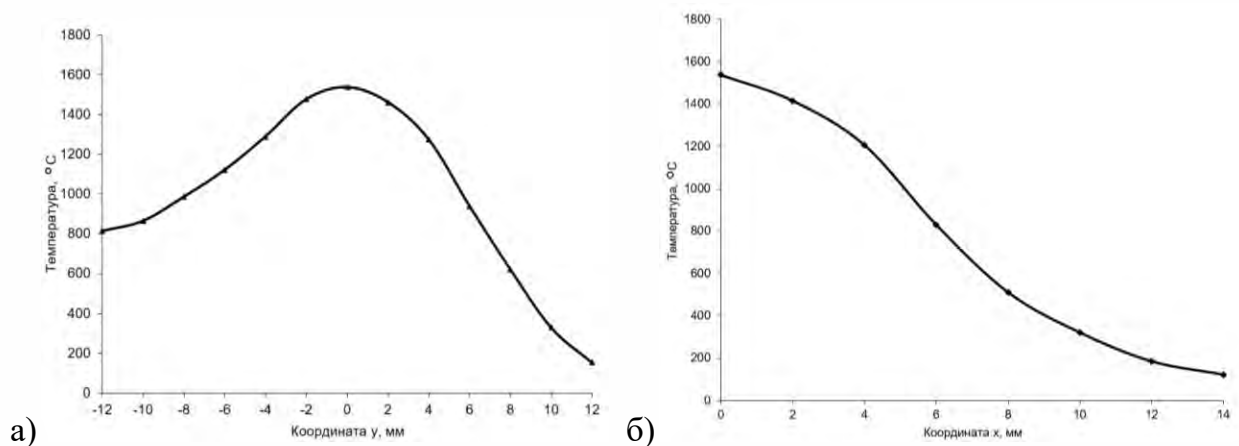


Рисунок 7 – Зависимость температуры на поверхности ножа от координат y (а) и z (б) при скорости движения источника нагрева $v=10$ мм/с в момент времени $t=1,5$ с, $s=2,5$ мм, $r=5$ мм (начало координат в центре пятна нагрева)

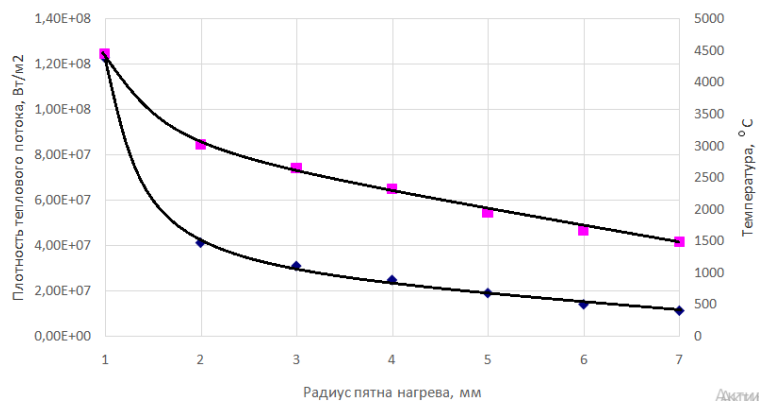


Рисунок 8 – Зависимость максимальной интенсивности теплового потока (1) и максимальной температуры (2) на поверхности ножа от радиуса пятна нагрева, $V=10$ мм/с, $s=2,5$ мм, $P_0 = 1500$ Вт

Заклучение

Создана конечно-элементная модель распространения тепла в ноже дробильной машины при действии на него движущегося нормально-кругового источника нагрева. Осуществлена численная реализация краевой задачи теплопроводности для

разработанной ANSYS-модели «плазменная дуга – нож», учитывающей неравномерность распределения направленного теплового потока по диаметру пятна нагрева и зависимость характеристик материала от температуры. Исследовано температурное поле при поверхностной плазменной закалке рабочей зоны ножа. Применение концентрированного потока плазмы позволяет осуществить поверхностное упрочнение инструмента в зонах интенсивного износа, сохраняя пластичными свойства его сердцевины. Такой способ термообработки повышает сопротивление износу и усталости; обеспечить высокую твердость и износостойкость поверхности; уменьшить деформации упрочняемых деталей благодаря локальности и кратковременности взаимодействия плазмы с поверхностью металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н.В. Спиридонов [и др.]; под общ. ред. В.И. Чачина. - Мн.: Вышэйшая школа, 1988. - 155 с.
2. Тюрин, Ю.Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю.Н. Тюрин. - Киев: Наукова думка, 2008. – 215 с.
3. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский [и др.]; под общ. ред. Л. К. Лещинского. - Киев: Тэхніка, 1990. – 109 с.
4. Веремейчик, А.И. Исследование поверхностного упрочнения деталей движущейся плазменной дугой / А.И. Веремейчик, М.И. Сазонов, В.М. Хвисевич // Актуальные проблемы прочности: / В.А. Андреев [и др.]; под. ред. В.В. Рубаника. - Молодечно: Типография «Победа», 2020. – Гл. 24. – С. 301–315.
5. Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. И.К. Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

A.I. Verameichyk
Brest State Technical University, Brest, Belarus, vai_mrtm@bstu.by

SIMULATION OF THE HEATING OF A CRUSHING MACHINE KNIFE BY A MOVING NORMALLY CIRCULAR SOURCE

Abstract

To improve the operational properties of the crushing tool, it is proposed to use plasma hardening of the working surface using compressed moving plasma. In order to determine the optimal modes of heat treatment, a study of temperature fields in the knife of a crushing machine under the action of a moving normally circular heat source was carried out.

Keywords: hardening, plasma jet, temperature, temperature stresses, microhardness, wear.

В.Г. Комаров, В.В. Ларькин, И.А. Спивак, С.А. Акатьев, В.А. Хохлов
Михайловская военная артиллерийская академия,
Санкт-Петербург, Россия, valentin_larkin@mail.ru

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Аннотация

Одной из важнейших проблем эксплуатации и модернизации существующего промышленного оборудования, а также создания нового на основе накопленных, является обеспечение его средствами технической диагностики. В современных системах большинство диагностических задач решается методами вибромониторинга, и они составляют основу этого процесса. Уже несколько лет при создании нового ответственного оборудования многие производители комплектуют его системами мониторинга и диагностики, часто функционально интегрируя их с системами автоматического управления. В этой статье рассматривается актуальность применения предиктивной диагностики, а также разработка на ее основе универсального алгоритма оперативного мониторинга технического состояния объектов с постоянным и дискретным сканированием узлов.

Ключевые слова: мониторинг, предиктивная диагностика, эксплуатация, база данных.

Введение

Функционирование объектов в сложных условиях меняющейся обстановки предполагает организацию контроля их технического состояния в режиме реального времени. При этом построение систем мониторинга должно быть выполнено с учетом общих принципов) [1 - 4].:

- принцип достаточности;
- принцип информационной полноты;
- принцип инвариантности;
- принцип самодиагностики;
- принцип структурной гибкости и программируемости;
- принцип коррекции;
- принцип дружелюбности интерфейса при максимальной информационной емкости;
- принцип многоуровневой организации;
- принцип интеграции производственной исполнительной системы предприятия (MES-система

Постоянный мониторинг обеспечивает своевременное выявление ошибок в системе и соответственно их исправление в кратчайшие сроки. Но, что делать, если даже эти кратчайшие сроки, складывающиеся из времени на определение неисправного узла, поиска, заказа и ожидания доставки нужных для ремонта компонентов критичны, а объект мониторинга состоит не только из постоянно работающих узлов (электроприводы, турбины, насосы и др.), но и работающих дискретно (манипулятор, переключатели, система позиционирования и др.).

Для создания полной картины текущего состояния объекта мониторинга необходимо объединить показания всех задействованных узлов объекта. Создание системы контроля параметров оборудования с длительным режимом использования связано со сложностями исключения его из рабочего цикла и требует проведения контроля в следящем режиме. Система контроля параметров кратковременно используемого оборудования может выполняться в нерабочее время или непосредственно перед использованием. При организации контроля оборудования повторно-кратковременного использования необходимо ее согласовать с режимом использования оборудования.

Информация, поступающая от оборудования, построенного по дискретному принципу, должна обрабатываться в соответствии с правилами формальной логики, что требует применения подобных же принципов построения алгоритмов диагностирования. В оборудовании, построенном по непрерывному принципу действия, преобразование физических величин должно происходить в соответствии с заложенными отношениями.

Анализ источников свидетельствует о том, что, несмотря на актуальность проблемы и значительное количество исследовательских работ, действующие методики позволяют осуществлять только единовременные оценки показателей надежности и безопасности и не ориентированы на использование для оперативных оценок и прогнозирования в режиме реального времени с применением современных компьютерных технологий.

Для сведения к минимальным значениям времени простоя, вызванного отказом, существует возможность на основании данных о параметрах технологических процессов прогнозировать развитие событий. В первую очередь, должны быть оценены степень удаленности фактического значения параметра процесса от критических границ, а также динамика приближения к границам. Во-вторых, необходимо оценить статус других параметров системы: к примеру, опыт эксплуатации объекта, который свидетельствует о том, что об опасности возникновения определенных неисправностей можно судить по группе параметров. В зависимости от динамики в группе одновременно изменяющихся параметров можно выявить и спрогнозировать нештатную ситуацию или более серьезную неисправность.

Для сложного объекта можно выделить три типа состояний, работоспособности [5 - 7]:

- непосредственный выход объекта из состояния, позволяющего осуществлять заданные функции;
- выход параметров и характеристик объекта и процесса эксплуатации за нормативные значения с сохранением работоспособности;
- работоспособное состояние, когда объект выполняет заданные функции при значениях показателей работы его узлов, не выходящих за границы допустимых значений.

В связи с этим при разработке системы мониторинга объекта и решении задач прогнозирования и принятия решений актуальны два направления:

- анализ показателей, характеризующих свойство объекта и его элементов сохранять состояние работоспособности (на основании статистических данных);
- анализ характеристик, параметров, факторов, определяющих свойство объекта сохранять работоспособность (на основании эксплуатационных данных).

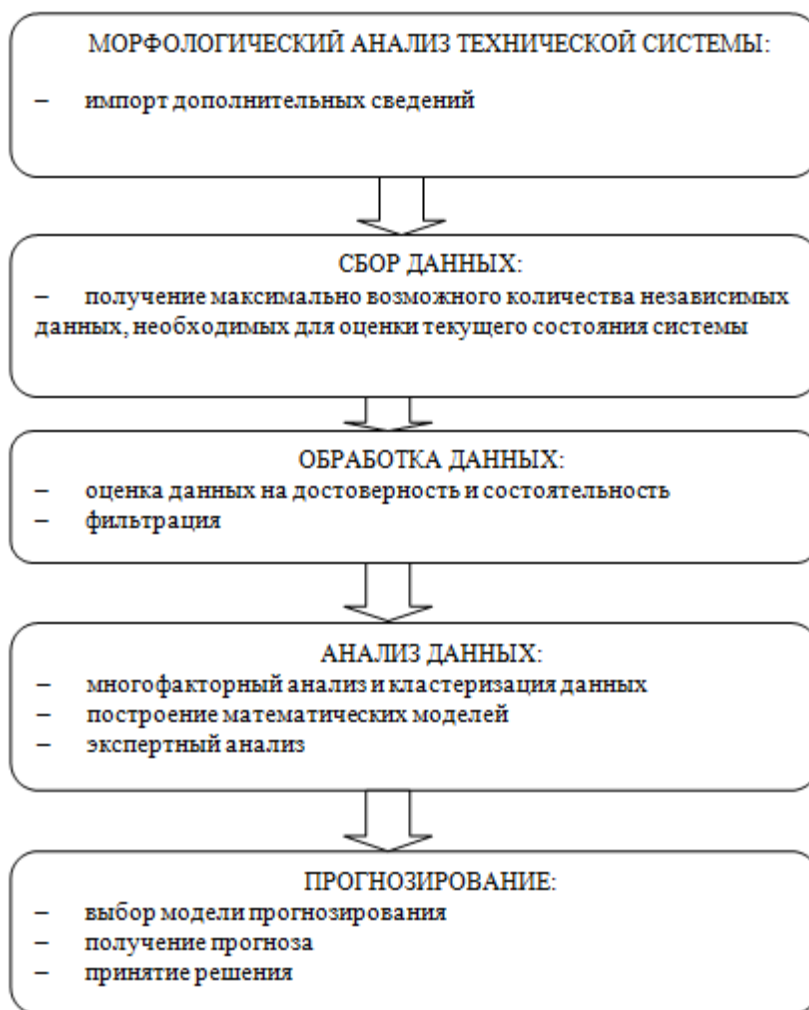


Рисунок 1 – Универсальный алгоритм оперативного мониторинга объекта для принятия управленческих решений

Анализ и управление системой мониторинга необходимо проводить в режиме реального времени комплексом алгоритмов, позволяющим:

- осуществлять оценку показателей каждого элемента системы на любом уровне и устанавливать наиболее уязвимые элементы;
- определять, какие параметры системы оказываются наиболее значимыми.
- определять зависимость между внешними воздействиями и изменением границ допустимых показателей системы [8].

Поэтому концепция системы мониторинга основана на положениях системного анализа, практически единственного, позволяющего корректно осуществлять принятие решений в условиях большого количества информации различной природы и высокой степени неопределенности [9 - 11].

Практически любая система технологического мониторинга использует информационный банк данных. Алгоритм сбора исходной информации для создаваемой системы мониторинга построен таким образом, что может быть реализован на предприятиях как при действующем аппаратном обеспечении, так и с применением новых инструментальных средств. Следовательно, методики оценки и анализа состояний для технических объектов могут быть реализованы по результатам диагностики, паспортизации и аттестации эксплуатируемых объектов с контролем условий эксплуатации в режиме АСУ ТП и современных on-line технологий контроля.

Программная реализация методик и алгоритмов, по мнению автора, может быть успешно реализована на основании MES и MPC концепции, которые предусматривают принцип непрерывного сканирования показателей и сравнения полученных значений с критическими. При достижении контролируемыми факторами критических значений определяется область и вид технического вмешательства. Универсальный алгоритм (рисунок 1) морфологического анализа технической системы, построенный с учетом вышеуказанных требований на основании экспертных систем с последующей возможностью выработки решений.

Заключение

Особенностью разработанного алгоритма является технология непрерывного сканирования показателей и реализации расчетных многофакторных моделей в режиме on-line. Безусловно, такая система, ориентированная на оптимизацию технологических процессов эксплуатации производства, может быть реализована с применением теории математического программирования и нейросетевой оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В.Г., Зегжда П.Д., Супрун А.Ф., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А. Риск-ориентированный подход к организации контроля в подсистемах обеспечения безопасности информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2016. № 3. С. 61-67.
2. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Богоева Е.М. Формализация процедуры риск-ориентированного подхода при выполнении государственными органами контрольных функций // Вестник Российской таможенной академии. 2014. № 4. С. 96-102.
3. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Белов А.С., Скубьев А.В. Эффективность обеспечения живучести подсистемы управления сложной организационно-технической системы // Телекоммуникации. 2020. № 11. С. 41-47.
4. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Богоева Е.М. Методологические основы применения риск-ориентированного подхода при выполнении контрольных (надзорных) функций государственных органов // Теория и практика применения риск-ориентированного подхода при выполнении контрольных (надзорных) функций государственных органов: Сборник материалов Межведомственной научно-практической конференции Российской таможенной академии.- Федеральная таможенная служба, Российская таможенная. 2014.- С. 17-24.
5. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Ковальчук А.М., Романюта А.Е. Методический подход к оценке надежности циклически применяемых сложных технических систем // Журнал технических исследований. 2021. Т. 7. № 4. С. 57-62.
6. Гасюк Д.П., Казенов И.Д. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно-артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды III Межвузовской научно-практической конференции. 2018. С. 268–272.
7. Гасюк Д.П., Хрулев В.Л. Законы и принципы развития и функционирования системы обеспечения ракетных войск и артиллерии ракетами и боеприпасами в современных условиях // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 20–22.

8. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. – 399 с.

9. Гасюк Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. 2019. С. 31–36.

10. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Семко А.Н. Распределение ресурсов сложной системы в условиях неопределенности // В сборнике: Вопросы механики и процессы управления.- Ленинград: Ленинградский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственный университет им. А.А. Жданова. 1986. С. 35-41.

11. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2020. № 3 (53). С. 59–65.

V.G. Komarov, V.V. Larkin, I.A. Spivak, S.A. Akatiev, V.A. Khokhlov
Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Saint Petersburg, Russia,
valentin_larkin@mail.ru

DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL ALGORITHM FOR OPERATIONAL MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF OBJECTS BASED ON PREDICTIVE DIAGNOSTICS

Abstract

One of the most important problems of operation and modernization of existing industrial equipment, as well as the creation of a new one based on accumulated ones, is to provide it with technical diagnostic tools. In modern systems, most diagnostic tasks are solved by vibration monitoring methods, and they form the basis of this process. For several years, when creating new critical equipment, many manufacturers have been completing it with monitoring and diagnostic systems, often functionally integrating them with automatic control systems. This article discusses the relevance of the use of predictive diagnostics and the development on its basis of a universal algorithm for operational monitoring of the technical condition of objects with constant and discrete scanning of nodes.

Keywords: monitoring, predictive diagnostics, operation, database.

С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев
Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,
Тула, Россия, kutepov.sergei@mail.ru

ДЛИТЕЛЬНАЯ КОРРОЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ 22Х2Г2АЮ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ

Аннотация

Исследовано влияние уровня прочности, температуры отпуска, времени между концом прокатки и началом отпуска на стойкость стержневой арматуры класса прочности А1000 из стали 22Х2Г2АЮ к коррозионному растрескиванию под напряжением в среде кипящего раствора нитратов (60% Са (NO₃)₂ + 5% NH₄NO₃ + 35% Н₂О) при 110 °С. Установлено, что образцы арматуры имеют сравнительно невысокую длительную коррозионную прочность. При отпуске от температур 150...450 °С в течение двух часов механические свойства образцов остаются в пределах класса прочности А1000, а длительная коррозионная прочность практически не возрастает. Отпуск при 500...600 °С в течение двух часов приводит к увеличению длительной прочности, но наблюдается разупрочнение стали. Временя выдержки между концом прокатки и началом отпуска в интервале 2...48 часов практически не влияет на длительную коррозионную прочность.

Ключевые слова: арматурная сталь, длительная коррозионная прочность, коррозионное растрескивание под напряжением, температура отпуска.

Введение

Выпускаемая в настоящее время термически упрочненная с прокатного нагрева и горячекатаная стержневая арматура из малоуглеродистых и низколегированных сталей, предназначенная для использования в железобетонных конструкциях и изделиях, в состоянии поставки имеет высокую склонность к растрескиванию в водородсодержащих средах, что резко сокращает эффект от ее применения в промышленных масштабах [1-3]. На длительную коррозионную прочность таких сталей, большое влияние оказывает микроструктура, формируемая в процессе прокатки и последующей термической обработки [4-6]. К основным микроструктурным факторам можно отнести размер зерна, тип микроструктуры, особенности распределения карбидной фазы, внутренние структурные напряжения. Считается, что чувствительность рассматриваемых сталей к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) в зависимости от структурного состояния повышается в следующем порядке: нижний бейнит → закаленный и отпущенный мартенсит → перлит → мартенсит [7].

Использование дополнительной термической обработки (например, повторного отпуска) позволяет существенно снизить чувствительность стали к растрескиванию. Стойкость стали к КРН при различных температурах отпуска существенно зависит от ее химического состава и комплекса физико-механических характеристик [4-8]. Начальное повышение температуры отпуска способствует снижению чувствительности к растрескиванию; затем по достижении определенной температуры она несколько возрастает; дальнейшее повышение температуры отпуска приводит к ее значительному снижению. В связи с этим, для каждой марки стали

необходимо экспериментально подбирать оптимальные режимы термообработки, обеспечивающие высокие значения физико-механических характеристик и минимальную чувствительность к растрескиванию в агрессивных средах.

В настоящей работе исследовано влияние уровня прочности, температуры отпуска, времени между концом прокатки и началом отпуска на длительную коррозионную прочность (ДКП) стержневой арматурной из стали 22Х2Г2АЮ при испытаниях на коррозионное растрескивание под напряжением.

Методы

Исследование влияние уровня прочности и температуры отпуска на стойкость стержневой арматуры класса прочности А1000 к КРН проводили на образцах опытно-промышленных плавов стали марки 22Х2Г2АЮ. Выбор плавов производили с таким расчетом, чтобы химический состав плавов (табл. 1) соответствовал, по возможности, верхнему, среднему и нижнему уровню марочного состава по ГОСТ 57-81-82. Для получения образцов арматуры с различными механическими характеристиками в пределах класса прочности А1000 образцы арматуры подвергали печному отпуску при 400 и 450 °С. Также сталь после прокатки и доставки в лабораторию (примерно через 4,5 месяца) подвергали печному отпуску в диапазоне температур 150...600 °С продолжительностью два часа.

Таблица 1 - Химический состав исследованных плавов

Марка стали	№ плавки	Химический состав, % (масс.)							
		C	Mn	Si	Cr	Ti	Al	N	S
22Х2Г2АЮ	Опытные (промышленные) плавки								
	1	0,24	1,52	0,48	1,77	0,040	0,030	0,030	–
	Опытные (лабораторные) плавки								
	2	0,18	1,46	0,60	1,80	–	0,090	0,030	0,029
	3	0,18	1,40	0,48	1,76	0,080	–	0,030	–

Исследование стойкости к КРН проводили на натуральных образцах ($l = 300$ мм; $\varnothing 18$ мм) стержневой арматуры периодического профиля в исходном состоянии и после отпуска. Испытания на коррозионное растрескивание проводили в кипящих растворах нитратов на рычажных установках в условиях одноосного растяжения образцов, по методике [9]. Рабочая часть образца составляла 100 мм. Стойкость стали к КРН оценивали временем до разрушения по результатам испытаний 4...6 образцов на каждую экспериментальную точку графика. Для создания условий эксперимента, максимально приближенных к эксплуатационным, испытания проводили в кипящем растворе нитратов (60% Ca (NO₃)₂ + 5% NH₄NO₃ + 35% H₂O) при температуре 110 °С и рабочих напряжениях $\sigma_{\text{э}} = (0,1...0,8) \sigma_{\text{в}}$.

Исследование влияния интервала времени между концом прокатки и началом отпуска на стойкость к КРН проводили на лабораторных образцах круглого профиля $\varnothing 12$ мм, которые получали прокаткой из образцов арматуры периодического профиля $\varnothing 18$ мм. Для этого образцы подвергали печному отпуску при 250 °С в течении 1,5 час, через 2, 4, 6, 24 и 48 час после прокатки и проводили испытания по определению длительной прочности в кипящем растворе нитратов в условиях одноосного растяжения образцов с учетом рекомендаций [9].

Для получения дополнительных данных о превращениях, происходящих в стали при отпуске, применяли метод внутреннего трения. Измерения температурных зависимостей внутреннего трения (ТЗВТ) проводили на натуральных образцах ($\varnothing 12$ мм, $l = 200$ мм) при различных температурах (20...500 °С) при $f \sim 10^3$ с⁻¹ по резонансной методике [10]. Превращения, происходящие при отпуске, оценивали по изменению высоты пика Кестера.

Механические свойства при испытаниях на статическое растяжение арматурного проката определяли по ГОСТ 12004–81 [11]. За среднее значение принимали результаты, полученные по испытаниям трех образцов.

Результаты и их обсуждение

Изменение механических образцов арматуры после отпуска при 400 и 450 °С показало, что с увеличением температуры отпуска пределы прочности и текучести уменьшаются, а пластичность возрастает.

Результаты испытаний на КРН стали 22Х2Г2АЮ в состоянии поставки и последующем отпуске при температурах 400 и 450 °С позволило установить, что вне зависимости от уровня прочности и пластичности, а также от величины приложенных растягивающих напряжений стержневая арматура класса прочности А1000 имеет высокую склонность к КРН. Даже при напряжениях 250 МПа, что составляет всего 30 % от расчетных для арматурных сталей класса прочности А1000, время до разрушения составляет всего 1,5...6,7 час. Следует также отметить значительный разброс отдельных значений времени до разрушения, что может указать на большую неоднородность свойств исследуемой стали. Снижение в результате отпуска прочности стали с 1490 до 1145 МПа практически не повлияло на сопротивляемость арматуры КРН. Некоторое повышение стойкости к КРН после отпуска при 450 °С настолько незначительно, что при существующем разбросе экспериментальных данных не может быть принято во внимание.

Анализ влияния температуры отпуска в интервале 150...600 °С на изменение механических свойств арматуры и ее ДКП позволил установить следующее: 1) резко выраженное разупрочнение стали наблюдается с температуры 300 °С; 2) увеличение температуры отпуска до 450 °С практически не влияет на стойкость к КРН, и только при более высоких температурах она начинает увеличиваться. Однако при этом наступает сильное разупрочнение стали. В случае отпуска при температуре 450 °С в течение 2-х часов арматура имеет прочность несколько ниже класса прочности А1000. При более высоких температурах отпуска (500 и 600 °С) наступает еще большее разупрочнение.

Данные об изменении механических свойств арматуры хорошо согласуются с результатами измерения ТЗВТ для образцов арматуры после соответствующего режима отпуска. На ТЗВТ в районе 330...350 °С наблюдается максимум, соответствующий 200 °С при частоте $f \sim 1$ Гц. С повышением температуры отпуска наблюдается значительное уменьшение высоты максимума, а после отпуска при температуре 600 °С максимум практически отсутствует, что может свидетельствовать о более равновесном состоянии структуры стали. Наиболее резкое уменьшение высоты максимума происходит в интервале температур отпуска 200...400 °С.

Наличие на ТЗВТ пика при 200 °С является результатом сложного сочетания нескольких процессов, в числе которых существенное значение имеет релаксация напряжений [12]. В этой связи можно предположить, что так как прочность стали при

отпуске до 300°C, снижается очень незначительно, основной вклад в уменьшение высоты максимума на ТЗВТ на этом этапе отпуска вносит релаксация остаточных напряжений, обусловленная атомной перестройкой и контролируемая диффузионной подвижностью атомов внедрения. При дальнейшем увеличении температуры отпуска основной вклад в снижение высоты максимума вносят процессы разупрочнения. Иначе говоря, при отпуске до 300°C в стали происходят превращения, связанные, в основном, с релаксацией остаточных напряжений. При увеличении температуры отпуска преобладают разупрочняющие процессы. Так как ДКП образцов стали 22Х2Г2АЮ начинает увеличиваться только после значительного разупрочнения, то из сопоставления этих выводов с результатами коррозионных испытаний следует, что ее высокая чувствительность к растрескиванию обусловлена прежде всего особым структурным состоянием.

При исследовании влияние интервала времени между концом прокатки и началом отпуска на стойкость к КРН использовали данные [13], где было показано, что для структуры в упрочненном состоянии чрезвычайно сильное влияние на стойкость к КРН оказывает уровень остаточных напряжений и релаксационная способность структуры. В связи с этим можно предположить, что в процессе вылеживания после прокатки в стали с неравновесной структурой возможно появление в локально перенапряженных зонах необратимой пластической деформации, что в свою очередь может сказаться на устойчивости ее к КРН. Особое значение этот фактор может иметь для стали с сильно упрочненной структурой.

Для подтверждения данного предположения были проведены дополнительные исследования. Испытания проводили по вышеизложенной методике. После прокатки и отпуска образцы исследуемой стали имели следующие механические свойства: $\sigma_B = 1450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1300$ МПа, $\delta_5 = 7\%$.

Анализ полученных результатов показал, что интервал времени от 2 до 48 час между концом прокатки и началом отпуска практически не влияет на стойкость арматуры из стали класса прочности А1000 против КРН. Незначительное изменение стойкости для интервала времени в 24 и 48 час не может быть учтено, так как это изменение стойкости находится в пределах разброса отдельных экспериментальных значений.

Для того, чтобы убедиться, происходят ли в стали при описанной выше обработке какие-либо необратимые процессы, методом внутреннего трения измеряли модуль упругости (E) и внутреннее трение (Q^{-1}). Измерения показали, что через шесть часов после прокатки исследуемые показатели практически не изменились. При увеличении длительности выдержки после прокатки наблюдается существенное снижение модуля упругости и повышения внутреннего трения. Так, например, для образцов, отпуск которых был проведен через 48 час после прокатки, внутреннее трение повысилось в 1,5 раза, а модуль упругости снизился с 21×10^{-3} до 19×10^{-3} МПа. Это подтверждает предположение о том, что в стали по мере вылеживания после прокатки происходят процессы, вызывающие необратимые явления.

Отсутствие достаточного количества материала не позволило более подробно исследовать этот вопрос. Тот факт, что стойкость против КРН при интервале времени между прокаткой и отпуском до 48 час практически не изменялась, не может считаться окончательным. Не исключено, что, так как в стали наблюдаются необратимые явления, при большем интервале времени возможно обнаружение зависимости от него стойкости стали против КРН. Кроме того, вопрос влияния времени между прокаткой и отпуском на длительную прочность следовало бы

изучить на другой плавке стали, а также и на стали класса прочности А800 (например, на стали 23Х2Г2Т), так как отсутствие зависимости стойкости против КРН от интервала времени между прокаткой и отпуском для исследуемой плавки стали может объясняться очень высокой чувствительностью ее к растрескиванию.

Результаты проведенных исследований показывают, что арматура А1000 из опытно-промышленной плавки стали имеет очень высокую склонность к КРН. Например, при механических свойствах на уровне класса прочности А800 ($\sigma_B = 1010$ МПа, $\sigma_{0,2} = 950$ МПа, $\delta_5 = 10\%$) и напряжениях на уровне расчетного для класса прочности А800 время до разрушения составляет 2...2,7 ч, что примерно в сорок раз хуже, чем при тех же условиях для стали 23Х2Г2Т ($\sigma_B = 1030$ МПа, $\sigma_{0,2} = 760$ МПа, $\delta_5 = 13\%$) [14].

Полученные результаты противоречат результатам исследований лабораторных плавок стали класса прочности А1000. Так, стржевая арматура круглого профиля диаметром 12 мм из лабораторных плавок (химический состав приведен в табл. 1) стали 22Х2Г2АЮ, имея механические свойства на уровне рассматриваемого класса прочности, даже при напряжениях 900 МПа при прочих равных условиях эксперимента не разрушалась в течение 50 час.

Это позволяет предположить, что для исследованной опытно-промышленной плавки стали 22Х2Г2АЮ высокая чувствительность к КРН прежде всего связана с измененным состоянием структуры и в первую очередь, учитывая, что распространение трещин межкристаллитное – с состоянием границ зерен. В пользу этого вывода говорят и данные о влиянии температуры отпуска на длительную прочность стали. Как следует из полученных данных ДКП арматуры из стали 22Х2Г2АЮ при увеличении температуры отпуска до 450°С практически не изменяется и остается очень низкой, хотя процесс релаксации остаточных напряжений, оказывающих, как это было показано ранее [13], очень большое влияние на стойкость к КРН, интенсивно начинается при отпуске уже с 200°С, а резкое разупрочнение стали – с 300°С. При увеличении в стали 23Х2Г2Т содержания углерода и хрома при сложившейся технологии производства наряду с повышением прочности стали резко возрастает ее чувствительность к КРН [14]. Для исследуемой стали возможна аналогичная ситуация. Высокая чувствительность стали 22Х2Г2АЮ к КРН может быть обусловлена образованием и выделением прежде всего по границам аустенитного зерна устойчивой при отпуске хрупкой карбидной составляющей, что с одной стороны может повышать химическую активность границ зерен и способствовать быстрому распространению коррозионных трещин, а с другой – затруднять перераспределение между зернами внешних растягивающих напряжений, вызывая тем самым локальные (пиковые) напряжения, ускоряющие процесс растрескивания, особенно на стадии зарождения трещин [15-16].

Однако, очень высокая стойкость против КРН арматуры из стали 22Х2Г2АЮ лабораторной плавки, химический состав которой отличается от химического состава опытно-промышленной плавки только большим содержанием углерода, указывает, что причины низкой стойкости арматуры из промышленной плавки заключаются прежде всего, в отклонениях от оптимальных технологических режимов.

Заключение

1. Установлено, что изменение прочности арматурной стали 22Х2Г2АЮ класса прочности А1000 в пределах класса не влияет на ее стойкость к КРН. Некоторое повышение устойчивости арматуры через 4,5 месяца после прокатки к КРН вызывает

только проведение отпуска при 450°C. Однако при этом наступает сильное разупрочнение стали.

2. Выявлено, что интервал времени до 48 часов между концом прокатки и началом отпуска стали не оказывает заметного влияния на ее стойкость против КРН, несмотря на то, что при этом наблюдается существенное изменение модуля упругости (E) и внутреннего трения (Q^{-1}), свидетельствующее о протекании в структуре стали необратимых процессов.

3. Полученные результаты о влиянии уровня прочности, температуры отпуска и интервала времени между концом прокатки и началом отпуска на стойкость к КРН стали 22Х2Г2АЮ следует считать предварительными. Полученная разница в стойкости против КРН для стали лабораторной и опытно-промышленной плавки требует тщательной проверки технологических режимов и дополнительных исследований на нескольких промышленных плавках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, В.Ф. Долговечность бетона / В.Ф. Степанова - М.: Ассоциация строительных вузов, 2014 г. – 142 с.

2. Кустов, Б.А. О природе разрушений высокопрочной термически упрочненной арматурной стали / Б.А. Кустов, Н.В. Пушница, Е.Д. Демченко, А.Г. Клепиков, И.Л. Федорова // Сталь, 1994. № 6. С. 69–74.

3. Черненко, В.Т. Водородное охрупчивание высокопрочной низкоуглеродистой кремнемарганцовистой арматурной стали / В.Т. Черненко, О.Г. Сидоренко, И.П. Федорова, В.А. Миронов, Е.М. Демченко // Сталь – 1998. – № 6. – С. 85–89.

4. Сычков, А.Б. Высокопрочный арматурный прокат из высокоуглеродистой стали / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2005. – № 3(9). – С.42–45.

5. Снимщиков, С.В. Сравнительный анализ современных требований к арматурному прокату для ненапряженного железобетона / С.В. Снимщиков, И.Н. Суриков, А.В. Харитонов, В. А. Харитонов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – № 2(41). – С. 56–59.

6. Стеблов, В.В. Как улучшить коррозионную стойкость строительной арматуры / В.В. Стеблов, Л.И. Елшина // Литье и металлургия – 2016. – № 1(82). – С.85–90.

7. Lynch, S.P. Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms (Chapter 2) / S.P. Lynch // Stress Corrosion Cracking. WoodheadPublishingLimited, 2011. – P. 90–130.

8. Ажогин, Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей / Ф.Ф. Ажогин. - М.: Металлургия, 1974. – 256 с.

9. Сергеев, Н.Н. Водородное охрупчивание и растрескивание высокопрочной арматурной стали: монография / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 180 с.

10. ГОСТ 25156–82. Металлы. Динамический метод определения характеристик упругости. М.: Издательство стандартов, 1982. – 21 с.

11. ГОСТ 12004–81. Сталь арматурная. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями № 1, 2). М.: Стандартинформ, 2009. – 10 с.

12. Криштал, М.А. Внутреннее трение и структура металлов / М.А. Криштал, С.А. Головин. - М.: Металлургия, 1976. – 376 с.

13. Сергеев, Н.Н. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2018. - Т. 22. - № 2(77). - С. 52–63.

14. Сергеев, Н.Н. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на стойкость против коррозионного растрескивания / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.Н. Чуканов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2018. – № 9. – С. 409–420.

15. Карпенко, Г.В. Коррозионное растрескивание сталей / Г. В. Карпенко, И.И. Василенко Киев: Издательство «Техніка», 1971. 192 с.

16. Стеренбоген, Ю.А. Роль пиковых напряжений в образовании холодных трещин в сварных соединениях закаливающих сталей / Ю.А. Стеренбоген, Д.В. Васильев, Э.Л. Демченко, Д.П. Новикова // Автоматическая сварка. - 2006. – № 4. – С. 11–20.

S.N. Kutepov, D.S. Klementev
Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy,
Tula, Russia, kutepov.sergei@mail.ru

LONG-TERM CORROSION RESISTANCE OF REINFORCING STEEL 22X2G2AYU DURING CORROSION CRACKING TESTS

Abstract

The influence of the strength level, tempering temperature, the time between the end of rolling and the start of tempering on the resistance of A1000 strength class steel rod fittings made of 22Kh2G2AYU to stress corrosion cracking in a boiling nitrate solution (60% Ca (NO₃)₂ + 5 % NH₄NO₃ + 35% H₂O) at 110 °C. It is established that the reinforcement samples have a relatively low long-term corrosion resistance. When released from temperatures of 150...450 °C for two hours, the mechanical properties of the samples remain within the strength class A1000, and the long-term corrosion resistance practically does not increase. Tempering at 500...600 °C for two hours leads to an increase in long-term corrosion resistance, but steel softening is observed. The holding time between the end of rolling and the start of tempering in the interval of 2 ...48 hours practically does not affect the long-term corrosion resistance.

Keywords: reinforcing steel, long-term corrosion resistance, stress corrosion cracking, tempering temperature.

В.В. Ларькин, В.Л. Хрулев, М.Л. Бегунов, М.В. Левицкий, А.В. Кропачев
Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия,
valentin_larkin@mail.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРИСПОСОБЛЕННОСТИ ОБРАЗЦА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ К ПРОАКТИВНОМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ И РЕМОНТУ

Аннотация

В данной статье разработана система показателей, основанных главным образом, на структуре диагностических операций, числе и трудоемкости элементарных проверок. В основу предлагаемой методики положено деление его на иерархически соподчиненные системы и элементы. Методика предназначена для оценки приспособленности образцов сложных технических систем (СТС), их подсистем (агрегатов, узлов) к проактивному техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР). Она может быть использована при установлении контрольных значений показателей эксплуатационной технологичности для вновь создаваемых образцов СТС, так и при доработке положений нормативной и технической документации существующих образцов техники. Данная методика основана на оценке показателей контролепригодности, доступности, легкосъемности и взаимозаменяемости образца СТС.

Ключевые слова: проактивное техническое обслуживание и ремонт, сложная техническая система, приспособленность конструкции технических изделий, контролепригодность.

Введение

Так как необходимым условием внедрения проактивного ТОиР в практику эксплуатации СТС является приспособленность образцов техники к данной стратегии, то разработка методики оценки приспособленности образца сложной технической системы к проактивному ТОиР рассматривается как методическая основа реализации этого инновационного подхода. Подход базируется на изучении свойства (совокупности свойств) под названием эксплуатационная технологичность [1].

Методы

На уровень приспособленности к проведению технического обслуживания (ТО) решающее влияние оказывают две взаимосвязанные группы факторов: конструктивно-производственные и эксплуатационные.

К конструктивно-производственным факторам относятся: доступность, контролепригодность, легкосъемность, взаимозаменяемость, наличие средств ТОиР, унификация элементов и устройств изделий [2].

В группу эксплуатационных факторов относят: формы организации ТОиР, степень совершенства системы обеспечения запасными частями и инструментом, классификация обслуживающего персонала, а также полнота и качество эксплуатационной документации.

Конструктивно-производственные факторы определяют свойство самой конструкции, а эксплуатационные – среду, в которой эти свойства проявляются. Обе группы факторов вместе и будут определять приспособленность образца СТС к проактивному ТОиР. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что применение стратегии проактивного ТОиР возможно, если:

объект обладает развитой системой встроенного контроля (предпочтительно на основе элементов предиктивной диагностики);

конструкция подсистем (агрегатов, узлов) объекта – контролепригодна и обеспечивает возможность проведения дискретного (или непрерывного) контроля параметров, характеризующих их техническое состояние;

конструкция подсистем (агрегатов, узлов) объекта, их размещение и компоновка обладает высоким уровнем эксплуатационной технологичности (обеспечение доступности, легкосъемности и взаимозаменяемости при ТОиР);

группировка съемных изделий в монтажные узлы (панели) и размещение их в специализированных отсеках с обеспечением нормальных условий работы в них обслуживающего состава либо удобство доступа или замены узлов с помощью роботизированных средств ремонта;

определены режимы диагностирования подсистем (агрегатов, узлов) объекта (определяющие параметры, их предельные и предотказные значения, периодичность проверок);

разработаны эффективные методы и средства технической диагностики, а также методы сбора и обработки статистической информации о техническом состоянии объекта;

обслуживающий персонал имеет необходимую подготовку для организации и проведения проактивного ТОиР в том числе и с применением роботизированных средств ремонта [3].

Очевидно, среди перечисленных факторов главенствующее значение принадлежит группе конструктивных факторов или свойствам самой конструкции объекта.

Разработка и внедрение стратегии проактивного ТОиР осуществляется на базе измерительной и вычислительной техники, эффективность применения которой для диагностирования образцов вооружения в значительной мере зависит от уровня их контролепригодности.

Под контролепригодностью образца вооружения понимают приспособленность его к диагностическим операциям, обеспечивающим в заданных условиях необходимую достоверность диагностирования при минимальных затратах труда, времени и средств. Контролепригодность – составная часть эксплуатационной технологичности любых изделий и диагностического обеспечения их производства, ТОиР. С учетом такой роли; и назначения контролепригодности разработаны технические требования к контролепригодности изделий [4].

Структура технических требований к контролепригодности изделий в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.309–98 состоит из требований: к конструкции изделий и устройствам его сопряжения с техническими средствами контроля (диагностирования); к параметрам и методам диагностирования; к номенклатуре и количественному значению показателей контролепригодности изделий; к технической документации.

В данной структуре требований основным является требование к показателям контролепригодности изделий. В соответствии с ГОСТ РВ 20.39.309–98 номенклатуру и значения показателей контролепригодности следует задавать с учетом: технических требований на изделие; вида и назначения системы контроля (диагностирования); информации о контролепригодности прототипов изделий и его сборочных единиц отечественного и зарубежного производства; обеспечение возможности сравнения контролепригодности однотипных изделий.

Результаты и обсуждение

Для оценки контролепригодности изделий необходимо располагать системой показателей, основанных главным образом, на структуре диагностических операций, числе и трудоемкости элементарных проверок. Показатели контролепригодности локально характеризуют приспособленность конструкции сборочных единиц изделия к контролю их параметров (диагностирования) в качественном и количественном выражении. Качественное выражение показателей основывается на связи с факторами, характеризующими трудоемкость процесса контроля параметров технического состояния, а количественное – на их влиянии (весе) на комплексный уровень контролепригодности всего изделия [5].

В основу методики расчета показателей контролепригодности изделий положено деление его на иерархически соподчиненные системы и элементы. От выбранного уровня детализации структуры отдельных систем зависит значение, как дифференциальных показателей, так и комплексный уровень контролепригодности всего изделия.

Дифференциальные показатели контролепригодности вычисляют по статистическим данным о трудоемкости и повторяемости диагностических операций и элементарных проверок. Для этого определяют их перечень, число видов, повторяемость и трудоемкость. В качестве дополнительных показателей можно использовать массогабаритные характеристики устройств сопряжения, степень их унификации и т. д. [6].

Основными показателями контролепригодности изделий являются:

1. Средняя оперативная трудоемкость данного вида диагностирования τ_D

$$\tau_D = \sum_{j=1}^M \tau_{Dj}, \quad (1)$$

где M – число операций данного вида диагностирования, необходимых для определения технического состояния; τ_{Dj} – оперативная трудоемкость j -ой операции диагностирования.

Если заданы продолжительности контроля параметров t_{Dj} , то средняя оперативная продолжительность данного вида диагностирования t_D определяется по формуле

$$t_D = \sum_{j=1}^M t_{Dj}. \quad (2)$$

2. Коэффициент безразборного диагностирования $K_{БД}$

$$K_{БД} = \frac{П_K}{П_H}, \quad (3)$$

где $П_K$ – число контролируемых параметров изделия данного вида диагностирования, для измерения которых не требуются демонтно-монтажные работы; $П_H$ – общее число контролируемых параметров данного вида диагностирования.

В работе в качестве показателей контролепригодности предлагаются следующие коэффициенты:

1. Коэффициент полноты проверки исправности (работоспособности) K_{Π}

$$K_{\Pi} = \lambda_K / \lambda_0, \quad (4)$$

где λ_K, λ_0 – суммарные интенсивности отказов проверяемых и всех составных частей сборочных единиц или элементов системы соответственно на принятом уровне деления.

Если интенсивности отказов не известны, то коэффициент полноты проверки можно приближенно вычислить по формуле

$$K_{\Pi} = n_K / n_0, \quad (5)$$

где n_K – число диагностических параметров, для измерений значений которых имеются приборы контроля; n_0 – общее число диагностических параметров объекта, использование которых обеспечивает методическую достоверность проверки.

2. Коэффициент глубины поиска дефекта

$$K_{\Gamma\Pi} = R / R_0, \quad (6)$$

где R – число однозначно различимых составных частей сборочных единиц или элементов системы на принятом уровне деления, с точностью до которых определяется место дефекта;

R_0 – общее число составных частей сборочных единиц или элементов системы на принятом уровне деления, с точностью до которых требуется определение места дефекта.

Другим, не менее важным свойством конструкции изделий является доступность параметров контролю.

В работе доступность параметров оценивается по шестибальной системе и рассматривается как относительная эффективность измерения данного параметра.

Принимаются следующие оценки доступности i -го параметра:

$b_1 = 5$, если параметр контролируется «на глаз» и имеет два результата – 0 и 1;

$b_1 = 4$, если параметр легко и быстро можно измерить с помощью встроенных средств контроля;

$b_1 = 3$, если параметр измеряется с помощью штатных приборов контроля;

$b_1 = 2$, если приборы контроля созданы, но эксплуатация их относительно сложна;

$b_1 = 1$, если приборы контроля разрабатываются или могут быть разработаны, однако их установка трудоемка и предусматривает проведение доработок;

$b_1 = 0$, если параметр в принципе может быть измерен приборами, но этих приборов нет и создание их не предусматривается.

Если объект контроля имеет N_0 параметров технического состояния, то его доступность контролю можно оценить коэффициентом доступности K_D

$$K_D = \frac{\sum_{i=0}^{N_0} b_1}{N_0}. \quad (7)$$

Легкосъемность и взаимозаменяемость в работе количественно оценивают коэффициентом затрат труда K_T , который равен средней доле трудозатрат на выполнение вспомогательных (подготовительно-заключительных) работ. Этот коэффициент вычисляется по формуле

$$K_T = \frac{\tau_{\text{ВСП}}}{\tau_{\text{ОСН}} + \tau_{\text{ВСП}}} \quad (8)$$

где $\tau_{\text{ВСП}}$ – трудоемкость подготовительно-заключительных работ; $\tau_{\text{ОСН}} + \tau_{\text{ВСП}}$ – общая трудоемкость диагностирования.

Также используются коэффициент основных работ $K_{\text{ОР}}$:

$$K_{OP} = 1 - K_T = \frac{\tau_{OCH}}{\tau_{OCH} + \tau_{BSP}}. \quad (9)$$

Если вместо трудоемкостей работ по диагностированию объектов заданы их продолжительности, то выражение для коэффициентов K_T и K_{OP} принимают следующий вид:

$$K_T = \frac{\tau_{BSP}}{\tau_{OCH} + \tau_{BSP}}, \quad (10)$$

$$K_{OP} = \frac{\tau_{OCH}}{\tau_{OCH} + \tau_{BSP}}, \quad (11)$$

где τ_{OCH}, τ_{BSP} – продолжительности основных и подготовительно-заключительных работ по диагностированию объекта.

Значения K_T и K_{OP} могут вычисляться как для отдельных, так и для сложных работ (операций).

К подготовительно-заключительным работам относятся: открывание и закрывание люков, горловин; присоединение и отсоединение шлангов, штепсельных разъемов; снятие и установка вновь деталей, мешающих выполнению основных операций ТОиР [7].

В работе в качестве количественного показателя легкосъемности и взаимозаменяемости подсистем изделия предлагается интегральная форма распределения доли (процента) выполненных работ по времени – функция технологичности $L(t)$, которая определяется по следующей формуле

$$L(t) = \sum_j^{N_2} \Delta L_j, \quad (12)$$

где ΔL_j – приращение доли выполненных работ; N_2 – количество приращений доли выполненных работ.

В свою очередь, ΔL_j определяется по следующей зависимости

$$\Delta L_j = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} t_{kj}}{\sum_{i=1}^{N_1} t_i}, \quad (13)$$

где N_1 – число всех работ по ТО; n_j – число работ, заканчивающихся рассматриваемой; t_{kj} – время завершения j -ой работы по ТОиР; t_i – продолжительность i -й работы по ТОиР.

Зависимость $L(t)$ характеризует приспособленность изделия к определенному этапу ТО или ремонта. Она показывает предельные возможности изделия при достаточном количестве специалистов, материалов, запасных частей и при правильном планировании работ.

Для оставления функции технологичности обслуживания изделия по опытным данным могут быть использованы линейные или сетевые графики, матрицы и другие способы описания типовых работ по ТОиР [8].

Результаты рассмотрения показателей эксплуатационной технологичности позволяют перейти к формированию методики оценки приспособленности образца СТС к проактивному ТОиР.

Методика предназначена для оценки приспособленности образцов СТС, их подсистем (агрегатов, узлов) к проактивному ТОиР. Она может быть использована при установлении контрольных значений показателей эксплуатационной технологичности для вновь создаваемых образцов вооружения, так и при доработке положений нормативной и технической документации существующих образцов СТС. Данная методика основана на оценке вышеизложенных показателей контролепригодности, доступности, легкосъемности и взаимозаменяемости образца вооружения.

Предлагаемая методика сводится к последовательному выполнению следующих этапов.

1. Подготовка исходных данных.

Исходными данными являются: Подсистемы (системы, агрегаты, узлы, элементы) образца вооружения; Диагностические параметры каждой подсистемы образца СТС, существующие приборы (способы) контроля этих параметров; Продолжительность контроля каждого диагностического параметра, трудоемкости (продолжительности) основных и подготовительно-заключительных работ при контроле параметров.

Источниками получения этих данных могут являться как существующие «Технические описания и инструкции по эксплуатации образца вооружения», так и перспективные интерактивные электронные руководства (ИЭТР), представляющие собой структурированный комплекс взаимосвязанных технических данных, требуемых на этапах эксплуатации изделия (в том числе с применением технологии цифрового двойника).

2. Оценка контролепригодности подсистем образца вооружения. При решении этой задачи по формулам (2), (3), (5) находятся значения $t_d, K_{Бд}, K_{П}$ для каждой подсистемы образца вооружения. В дальнейшем проводится ранжирование подсистем образца вооружения по каждому показателю контролепригодности. Подсистема, имеющая минимальную сумму рангов, будет наиболее контролепригодной.

3. Оценка доступности подсистем образца вооружения к контролю.

Сначала по шестибальной системе оцениваются доступности параметров к контролю, потом для каждой подсистемы по формуле (7) находится значение коэффициента K_d и проводится ранжирование подсистемы по K_d .

4. Оценка легкосъемности и взаимозаменяемости подсистем.

Используя выражение (9) для каждой подсистемы, определяется $K_{ОР}$, а потом проводится ранжирование по значению этого коэффициента.

5. Оценка эксплуатационной технологичности подсистем образца вооружения.

Для каждой подсистемы находится сумма рангов показателей эксплуатационной технологичности. Подсистема, имеющая минимальную сумму рангов, будет наиболее приспособленной к проактивному ТОиР.

Заключение

Разработанная и представленная в данной работе позволяет определять степень приспособленности каждой подсистемы СТС на основе ранжирования этих подсистем по значениям показателей эксплуатационной технологичности. Она может быть использована при установлении контрольных значений показателей контролепригодности, доступности, легкосъемности для вновь разрабатываемых образцов СТС, а также при разработке практических рекомендаций по внедрению стратегии проактивного ТОиР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк, Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. – 2019. – С. 31–36.

2. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Мартыщенко Л.А., Шатохин Д.В. Методы оперативного статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции. - Санкт-Петербург, Тула: Международная академия информатизации, 2001. –72 с.

3. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством. – Санкт-Петербург, 2013. – 399 с.

4. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Барабанов В.В., Филиппов А.А. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2015. № 648. С. 6-12.

5. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2007. – № 4. – С. 100–104.

6. Гасюк Д.П., Филатов И.Н. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2008. – Т. 2. – С. 317–318.

7. Гасюк Д.П. Нормативно-правовые основы создания, цели, задачи и функции группы стандартизации и каталогизации вооружения, военной и специальной техники // В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. – 2019. – С. 370–374.

8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Математические модели и методы в управлении развитием сложных технических систем. - Санкт-Петербург, 2004.- 280 с.

V.V. Larkin, V.L. Khrulev, M.L. Begunov, M.V. Levitskiy, A.V. Kropachev
Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Saint Petersburg, Russia,
valentin_larkin@mail.ru

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FITNESS OF A SAMPLE OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM FOR PROACTIVE MAINTENANCE AND REPAIR

Abstract

This article has developed a system of indicators based mainly on the structure of diagnostic operations, the number and complexity of elementary checks. The proposed methodology is based on its division into hierarchically subordinate systems and elements. The technique is designed to assess the fitness of samples of STS, their subsystems (aggregates, nodes) to proactive MRO. It can be used in establishing control values of operational manufacturability indicators for newly created STS samples, and in finalizing the provisions of regulatory and technical documentation of existing equipment samples. This technique is based on the assessment of the indicators of controllability, accessibility, ease of removal and interchangeability of the STS sample.

Keywords: proactive maintenance and repair, complex technical system, fitness.

Л.В. Логинов, В.В. Ларькин, А.С. Ерюшев, А.А. Вырвич, Е.А. Мельников
Михайловская военная артиллерийская академия,
Санкт-Петербург, Россия, valentin_larkin@mail.ru

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ ОСВОЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

Предметом исследования являются процесс освоения оператором дистанционно-управляемых роботизированных сложных технических систем (РСТС). *Актуальность исследования* обусловлена тем, что повышающийся уровень автоматизации и роботизации таких комплексов приводит не к исключению человека из системы управления ими, а к усложнению его функций, а техническое совершенствование только повышает требования к уровню профессиональной подготовки операторов. Это требует обоснование классификационных и квалификационных требований к отбору, уровню подготовки и срокам обучения операторов РСТС. Методология исследования базируются на системном подходе с применением методов математического моделирования, положений теории вероятностей и теории надежности, методов научного прогнозирования и военно-экономического анализа, а также современных способов статистической обработки информации.

Ключевые слова: система освоения, уровень подготовки, классификация и квалификация, роботизированные сложные технические системы, теория надежности, качество.

Введение

В фундаментальных и технологических областях за последнее время произошли существенные изменения, обеспечивающие развитие робототехники, разработаны и внедрены экспериментальные, дистанционно-управляемые и полуавтономные образцы РСТС. Перспектива автоматизации движения роботов вплотную подошла к практическому осуществлению. Определенный прогресс достигнут в области интеллектуализации процессов управления РСТС и технологий группового управления ими [1 - 7].

Современные РСТС являются дистанционно-управляемыми комплексами. Высокий уровень роботизации и автоматизации таких РСТС приводит не к исключению человека из системы управления ими, а к усложнению его функций, а техническое совершенствование предъявляет повышенные требования к уровню профессиональной подготовки операторов таких РСТС.

Одной из актуальных проблем в вопросах эксплуатации является проблема подготовки операторов. Она заключается в различии компетенций номеров расчетов. Разработанные еще в 80-х годах способы организации системы освоения (СО) не позволяют рационально организовать функционирование данной системы освоения [8 - 14].

Главная особенность состоит в том, что между человеком-оператором, находящимся на пункте дистанционного управления, существует связь (постоянная или периодическая), позволяющая по мере необходимости производить обмен

информацией в реальном времени. Оператор получает информацию с борта роботизированной сложной технической системы, которую он оценивает, и принимает решение об изменении маршрута или режиме работы, указывая соответствующую команду по линии связи. Возможен автономный режим (без связи с пунктом управления).

Проблемы организации взаимодействия «человек – роботизированный комплекс» связаны с согласованием технологических и психологических исследований, а также с аспектами взаимодействия командиров, операторов, технического персонала с и психологов. Таким образом, специалист должен обладать рядом психофизических и профессиональных компетенций [15 - 17].

В работе предложено рассматривать профессиональную компетентность как функционально связанные между собой компоненты: мотивационную, операционную, когнитивную, личностную и рефлексивную.

Под компетентностью будем понимать — способность успешно действовать на основе практического опыта, умения и знаний при решении профессиональных задач.

Требования к качеству подготовки операторов, обусловленные государственными образовательными стандартами, предопределили необходимость перехода к компетентностному подходу.

Для достоверного объективного определения качества подготовки специалистов предлагается использовать комплексный показатель, включающий в себя индивидуальные показатели [18 - 21].

Комплексный показатель качества (КПК) подготовки специалистов представить как сумму индивидуальных показателей, умноженных на соответствующие весовые коэффициенты для каждого направления подготовки согласно занимаемой должности (1):

$$\text{КПК} = \sum_{i=1}^n \text{ПФПК}_i \text{ ВК}_i, \quad (1)$$

где психофизические персональные качества (ПФПК) - являются индивидуальным показателем качества освоения по i-му свойству;

Таблица 1 - Психофизический (КПК(λ))

№п/сп	Группы ПФПК	Перечень ПФПК	Применяемые методы и методики
1.	ПФПК 1 - уровень мотивации к получению профессиональных навыков	Профессиональная направленность, осознанная и устойчивая мотивация к освоению	Методы наблюдения, беседы, анкетирование «Биографическая анкета», опросник профессиональной мотивации, методика «Уровни мотивационной детерминации», методика самооценки оператора профессиональной направленности
2.	ПФПК 2 - уровень культурного, этического и нравственного	Социально значимые ценностные ориентации и идеалы, моральная нормативность	Анализ документов (личных дел, сочинения «Моя профессия», беседа, методика «Личностный адаптационный потенциал» (ЛАП), методика

	воспитания		«Направленность личности», МЛО «Адаптивность»
		Морально-волевые качества (честность, принципиальность, целеустремленность, ответственность, настойчивость, решительность, смелость)	Методы наблюдения, беседы, методика групповой оценки личности (ГОЛ), социометрическое измерение, опрос экспертов
3.	ПФПК 3 - уровень дисциплинированности	Самореализация, самоконтроль, способность к самостоятельной работе	Методика определения уровня самоконтроля, методы наблюдения, опрос экспертов, методика групповой оценки личности
4.	ПФПК 4 - уровень общих математических и естественно-научных, теоретических знаний	Познавательные способности, успешность обучаемости, уровень развития интеллекта	Анализ документов, экспертный опрос, общеобразовательные тесты достижений, тест структуры интеллекта, тест возрастающей трудности Равенна, методика «Умственная работоспособность по Крепелину», экспертный опрос, тест Айзенка
5.	ПФПК 5 – уровень командирских, организаторских и коммуникативных способностей	Организаторские способности, авторитетность и лидерство в коллективе	Методы анализа документов, беседа, наблюдение, методика оценки коммуникативных и организаторских склонностей (КОС), социометрия, методика диагностики межличностных отношений Т. Лири, МЛО «Адаптивность»
		Коммуникативные и педагогические способности, уровень конфликтности	Методы наблюдения, беседы, методика КОС, методика ГОЛ, методика диагностики межличностных отношений Т. Лири, методика определения типа личности в конфликтной ситуации К. Томаса
6.	ПФПК 6 – Уровень характеристик психических процессов	Нервно-психическая устойчивость	Экспресс-методика «Прогноз», многоуровневый личностный опросник «Адаптивность», методика изучения характерологических акцентуаций личности и нервно-психической

			неустойчивости
		Эмоционально-волевая устойчивость	Шкала эмоциональных состояний, тест на фрустрацию Р. Розенцвейга, методика мотивации и готовности к риску
		Устойчивость, концентрация, переключение и распределение внимания	Методика «Корректурная проба», методика «Сложение и вычитание с переключением», методика «Отыскивание чисел»
		Уровень развития долговременной, кратковременной и оперативной памяти	Методика «Структурно-логическая память», методика «Оперативная память»
		Быстрота мышления, скорость мыслительных процессов и точность переработки информации	Метод наблюдения, методика «Умственная работоспособность по Крепелину», методика «Вербальный интеллект», методика «Арифметический счет», методика «Шифровка»
		Умение быстро переключаться с одного вида деятельности на другой	Методика «Отыскивание чисел с переключением», методики «Черно-красная таблица», «Сложение чисел с переключением»
		Умение сохранять высокую эффективность деятельности в неблагоприятных условиях, стрессовых ситуациях	Психодигностический тест (ПДТ), методика «Нерешаемая задача», тест на фрустрацию Р. Розенцвейга
7.	ПФПК 7 - уровень сенсорно-гностического слухового восприятия и глазомера	Функциональное состояние организма при освоении	Методика оценки состояния слухового анализатора «Пороговая тональная аудиометрия», оценка состояния зрительной системы методом «Компьютерной компиметрии»

Учитывая значимость индивидуальных показателей, предлагается ввести следующие весовые коэффициенты для различных должностей:

1. Для руководителей:

Таблица 2

№ ПФПК	1	2	3	4	5	6	7
ВК	0,2	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2

2. Для операторов:

Таблица 3

№ ПФПК	1	2	3	4	5	6	7
ВК	0,3	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2

3. Для технического персонала:

Таблица 4

№ ПФПК	1	2	3	4	5	6	7
ВК	0,2	0,2	0,5	0,3	0,4	0,2	0,4

Принимая, что максимальное значение комплексного показателя качества подготовки специалистов равно 100, производим замену пятибалльных оценок на соответствующие им индивидуальные показатели.

Качество подготовки специалистов рассчитывается по выражению (2):

$$КПК_{\lambda} \sum_{i=1}^n КПК, \quad (2)$$

где n – количество специалистов в подразделении.

1. Профессионально-должностные (КПК (P_0)):

Учитывая значимость индивидуальных показателей, предлагается ввести следующие весовые коэффициенты (ВК) для различных штатных должностей:

1. Руководитель (начальник):

Таблица 5

№ ИПК	1	2	3	4
ВК	0,5	0,2	0,4	0,2

2. Для операторов:

Таблица 6

№ ИПК	1	2	3	4
ВК	0,5	0,3	0,3	0,2

3. Для технического персонала:

Таблица 7

№ ИПК	1	2	3	4
ВК	0,3	0,5	0,4	0,5

Если норматив отрабатывается в процессе освоения несколько раз, то оценка за выполнение норматива определяется по последнему показанному результату или по результату контрольного занятия [22 - 24].

1. Оценка за выполнение норматива определяется:

«отлично», если выполнил норматив правильно, в полном объёме и уложился по времени (скорости) на оценку «отлично»;

«хорошо», если выполнил норматив и уложился по времени (скорости) на оценку «хорошо» или на оценку «отлично», но допустил одну ошибку;

«удовлетворительно», если выполнил норматив и уложился по времени (скорости) на оценку «удовлетворительно» или уложился на оценку «отлично» или «хорошо», но допустил соответственно две или одну ошибку;

«неудовлетворительно», если не выполнил норматив, не уложился по времени (скорости) на положительную оценку или допустил более двух ошибок или уложился по времени (скорости) на «удовлетворительно», но допустил одну ошибку.

2. Индивидуальная оценка за выполнение нескольких нормативов, и оценка за выполнение нормативов в составе команды по каждому предмету освоения определяется по оценкам, полученным за выполнение каждого норматива, и считается:

«отлично», если более половины проверенных нормативов выполнены с оценкой «отлично», а остальные – «хорошо»;

«хорошо», если более половины проверенных нормативов выполнены с оценкой не ниже «хорошо», а остальные – «удовлетворительно»;

«удовлетворительно», если не менее 70% нормативов выполнены с положительной оценкой, а при оценке по трём нормативам выполнены два, при этом один из них с оценкой не ниже «хорошо»;

«неудовлетворительно», если менее 70% нормативов выполнены с положительной оценкой, а при оценке по трём нормативам не выполнены два.

3. Оценка за выполнение индивидуальных нормативов команде выводится по индивидуальным оценкам обучаемых и определяется:

«отлично», если не менее 90% обучаемых получили положительные оценки, при этом более 50% обучаемых получили оценку «отлично»;

«хорошо», если не менее 80% обучаемых получили положительные оценки, при этом более 50% обучаемых получили оценку не ниже «хорошо»;

«удовлетворительно», если не менее 70% обучаемых получили положительные оценки;

«неудовлетворительно», если менее 70% обучаемых получили положительные оценки.

4. При проверке нормативов в составе группы общая оценка за выполнение нормативов определяется:

«отлично», если первая оценка отлично, а вторая - не ниже «хорошо»;

«хорошо», если первая оценка «отлично» или «хорошо», а вторая – не ниже «удовлетворительно»;

«удовлетворительно», если обе оценки не ниже «удовлетворительно»;

«неудовлетворительно», если не выполнено требование на оценку «удовлетворительно».

ВК и индивидуального показателя качества (i-го).

Для расчета весовых коэффициентов необходимо использовать метод экспертных оценок.

Экспериментально установлены диапазоны, характеризующие качество подготовки специалистов:

- при $75 \leq \text{КПК} \leq 80$ - отличное качество подготовки специалистов;

- при $70 \leq \text{КПК} \leq 75$ - хорошее качество подготовки специалистов;

- при $50 \leq \text{КПК} \leq 70$ - удовлетворительное качество подготовки специалистов;
- при $\text{КПК} \leq 50$ - неудовлетворительное качество подготовки специалистов.

Уровень освоения – это степень профессионального мастерства в рамках конкретной ступени освоения. Уровень освоения зависит от обученности конкретного человека и характеризуется такими параметрами, как объем, диапазон и качество знаний и умений.

Заключение

Человек является целостным субъектом, и поэтому указанные компетенции и качества также составляют единую систему. В данной системе каждый элемент может оказать как положительное, так и отрицательное влияние на эффективность других элементов. Например, четкое проявление профессиональной направленности окажет сильное воздействие на развитие большинства личностных компетенций, но, в то же время отсутствие достаточного интереса к профессии не позволит человеку обладать важными профессиональными навыками. Благодаря взаимосвязи персональных качеств человека в ходе подготовки возможен эффект компенсации, и в таком случае относительно низкое развитие одного из навыков может уравновешиваться высоким развитием другого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Е.Г., Селиванов А.А., Ковальчук А.М., Чварков С.В. Концептуальный подход к построению эмпирических основ формирования системы робототехнических комплексов военного назначения // Вестник Академии военных наук. 2022. № 1 (78). С. 110-119.
2. Мегера, Ю.А., Гасюк, Д.П., Бурлаков, А.А. Анализ взаимодействия системы технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники с оборонно-промышленным комплексом // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. – 2017. – С. 314–317.
3. Анисимов В.Г., Ковальчук А.М., Романюта А.Е. Методологический подход к развитию системы робототехнических комплексов военного назначения // Вестник Академии военных наук. 2022. № 1 (78). С. 120-125.
4. Анисимов В.Г., Ковальчук А.М., Сазыкин А.М., Сысуев С.Ю. Оптимизационная модель формирования решений по развитию системы робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 9-10 (171-172). С. 13-19.
5. Suprun A., Anisimov V., Anisimov E., Saurenko T., Manciu I. Models and method of decision support for the formation of cybersecurity systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 387. С. 357-367.
6. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Богоева Е.М., Веселко А.А., Сысуев С.Ю. Модель и метод комплексной стандартизации сложных технических систем // Журнал технических исследований. 2022. Т. 8. № 2. С. 20-29.
7. Патент на изобретение 2728514 С1, 30.07.2020. Способ обоснования уровня надежности программных средств вооружения, военной и специальной техники / Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гречишников Е.В., Гасюк Д.П., Белов А.С., Назаров Е.А., Турковский А.С., Хрулев В.Л., Мельников Е.А., Трахинин Е.Л., Давлятова М.А. Заявка № 2019103742 от 11.02.2019.

8. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу о современном состоянии и перспективах развития системы освоения ракетного вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2017. № 1 (96). С. 34-40.

9. Гасюк Д.П., Ларькин В.В. К вопросу расчета времени освоения образца ракетного вооружения // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды II межвузовской научно-практической конференции. 2017. С. 228-232.

10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017613824, 03.04.2017. Программа поддержки принятия решения выбора рационального варианта освоения личным составом образца сложной технической системы (СТС) / Ларькин В.В., Вырвич А.А., Гасюк Д.П., Мысяков К.А., Дубков Я.В., Мьялькин В.А., Козлова И.В., Хрулев В.Л., Ерюшев А.С. Заявка № 2016662950 от 29.11.2016.

11. Патент на полезную модель RU 167999 U1, 16.01.2017. Устройство для расчета времени освоения образца сложной технической системы / Ларькин В.В., Вырвич А.А., Гасюк Д.П., Ерюшев А.С., Залозний Д.А., Мысяков К.А., Козлова И.В. Заявка № 2016135175 от 29.08.2016.

12. Патент на полезную модель RU 167657 U1, 10.01.2017. Устройство для расчета среднегодовых экономических затрат на эксплуатацию комплекса тренажерных средств в ходе освоения образца сложной технической системы / Ларькин В.В., Вырвич А.А., Гасюк Д.П., Ерюшев А.С., Залозний Д.А., Мысяков К.А., Козлова И.В. Заявка № 2016135176 от 29.08.2016.

13. Гасюк Д.П. Особенности и направления развития системы подготовки специалистов в области машиностроения в условиях импортозамещения и цифровизации экономики России // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, - Санкт-Петербург, 2022. С. 4-12.

14. Anisimov, V.G., Zegzhda, P.D., Anisimov, E.G., Bazhin, D.A. A risk-oriented approach to the control arrangement of security protection subsystems of information systems // Automatic Control and Computer Sciences. – 2016. – V. 50(8). – P. 717–721. DOI: 10.3103 / S0146411616080289.

15. Анисимов В.Г., Буг С.В., Коритчук В.В., Анисимов Е.Г. Модель и методика обоснования выбора видов учебных занятий при формировании военно-профессиональных компетенций слушателей (курсантов) в вузе Министерства Обороны Российской Федерации // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. 2021. № 1 (19). С. 16-29.

16. Анисимов В.Г., Буг С.В., Коритчук В.В., Сауренко Т.Н. Модель обоснования программы инновационного развития системы тренажерных комплексов Министерства Обороны Российской Федерации // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. 2021. № 1 (19). С. 30-42.

17. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Самоленков В.А. Введение в теорию эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии. - Москва: Военная академия генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. 2008. -180 с.

18. Ефимова А.Б., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Методика оценки качества образовательного процесса // Современные проблемы науки и образования во внутренних войсках МВД России: сборник научных трудов научно-педагогического состава Санкт-Петербургского военного института внутренних войск МВД России. С. 98-101.

19. Николаев Г.А., Осипенков М.Н., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Методический подход к оцениванию влияния распределения ресурсов на качество образовательного процесса // В сборнике: Перспективные информационные технологии в системе подготовки должностных лиц органов исполнительной власти, участвующих в решении задач обеспечения безопасности и обороны Российской Федерации: Сборник материалов научного семинара. 2019. С. 21-29.

20. Анисимов В.Г., Лихачева О.А., Сергеев И.В. Оценка качества образовательного процесса с использованием математической модели // Вестник университета. 2012. № 18. С. 152-155.

21. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. – 2020. № 3 (53). С. 59–65.

22. Гасюк Д.П., Косова В.А. Проведение занятий в активной форме при изучении специальных дисциплин студентами машиностроительных направлений // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 18-28.

23. Мегера Ю.А., Гасюк Д.П., Меженев А.В. Адаптация системы технического обслуживания и ремонта к системе комплексного сервисного обслуживания // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. – 2017. – С. 318–322.

24. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством. – Санкт-Петербург, 2013. – 399 с.

L.V. Loginov, V.V. Larkin, A.S. Yeryushev, A.A. Virvich, Y.A. Melnikov
Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Saint Petersburg, Russia,
mvaa@mail.ru

METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATION REQUIREMENTS TO THE SYSTEM OF DEVELOPMENT OF ROBOTIC COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS.

Abstract

The subject of the study is the process of mastering remote controlled robotic complex technical systems (RCST). The relevance of the study is due to the fact that the increasing level of automation and robotizing of such complexes does not lead to the exclusion of a person from the control system, but to the complication of his functions, and technical improvement only increases the requirements for the level of professional training of operators. This requires justification of the classification qualification requirements for the selection, level of training and terms of training of RCTS operators. The research methodology is based on systematic approach using mathematical modeling methods, the provisions of probability theory and reliability theory, methods of scientific forecasting and military economic analysis, as well as modern methods of statistical information processing.

Keywords: Mastering systems, level of training, operator, classification and qualification, robotic complex technical system, reliability theory, quality.

С.Г. Мельник
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, melnik.sg@gmail.com

ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА Fe - C - РАСПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНО - ДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация

В статье рассматривается разработанный ООО «Новые технологии и инвестиции» новый способ внепечной обработки металла, альтернативный другим известным методам внепечной обработки металла. Впервые был предложен способ обработки жидкого металла в ковше при помощи импульсно - динамического устройства (ИДУ), представляющего картридж (кассету), закрепленный на металлическом стержне и разделенный на сегменты и сектора, ограниченные плавящимися металлическими перегородками. В сегментах и секторах размещаются материалы, которые, вступая в реакции с жидким металлом при погружении ИДУ в ковш, участвуют в физико-химических процессах полиреагентной внепечной обработки. Осуществляемая таким образом технология внепечной обработки с помощью ИДУ обеспечивает усреднение химического состава и температуры металла без традиционной продувки нейтральным газом, раскисление, легирование, рафинирование, модифицирование и другие методы ковшевой обработки металлических расплавов. Технологические процессы внепечной обработки и различные варианты конструкций ИДУ опробованы на ряде металлургических предприятий полного цикла. Результаты опытных плавов подтвердили принципиальную возможность применения технологии полиреагентной внепечной обработки с помощью ИДУ для получения качественных сталей без использования традиционных методов внепечной обработки жидкого металла. Новизна и полезность конструкции ИДУ и технологий внепечной обработки подтверждены патентами Российской Федерации.

Ключевые слова: расплавы Fe-C; импульсно-динамическое устройство; альтернативная полиреагентная внепечная обработка; легирование; раскисление; модифицирование; рафинирование; неметаллические включения, качество металла.

Введение

Внепечная обработка металла, методы которой интенсивно развивались в последнее время, стала неотъемлемой частью технологических процессов производства чугуна и стали в мире. Сегодня на металлургических предприятиях для повышения качества металлопродукции применяются различные способы внепечной обработки жидкого металла: рафинирование, микролегирование, модифицирование, продувка нейтральными газами и др. [1-5]. Для повышения эффективности внепечной обработки используются сложные дорогостоящие энергоёмкие устройства: установки ковш-печь, агрегаты внепечной обработки стали, трайбаппараты, пневмокамерные питатели и другое специальное оборудование.

Вместе с тем, на ряде предприятий, к которым можно отнести и некоторые машиностроительные заводы, по объективным и субъективным причинам не используются перспективные инновационные разработки по совершенствованию

технологии производства металлов с применением внепечной обработки. Поэтому была поставлена задача разработки новых способов внепечной обработки металла, которые могли бы позволить улучшить качество металлопродукции. Появилась идея предложенного метода внепечной обработки металла, улучшающего его качество, обладающего новизной и полезностью, что было подтверждено в последующем получении патентов на изобретения. Предложение было связано с разработкой конструкции нового импульсно-динамического устройства.

Методы

Для решения поставленной задачи было проведено физическое и математическое моделирование работы отдельных элементов конструкции импульсно-динамического устройства (ИДУ). Расчётным путём с применением методов термодинамики и кинетики определяли особенности физико-химических процессов, реализуемых при обработке жидкого металла в ковше струйно-вихревыми смесителями, выполняли тепловые расчёты экранов картриджей, крутящие моменты при срабатывании активных наполнителей кассет, выталкивающую силу жидкого металла, предполагаемое расширение паров магния и другие параметры процессов полиреагентной обработки жидкого металла в ковше.

Уточнение размеров и параметров струйно-вихревых смесителей, выбор оптимальных режимов обработки металла производили по результатам моделирования, расчётов, лабораторных и производственных экспериментов. Итоговые результаты применения импульсно-динамического устройства проверялись проведением опытно-промышленных плавов на действующем оборудовании металлургических предприятий.

При выполнении расчётов по определению технологических параметров выплавки стали с применением ИДУ особое внимание уделялось расчётам геометрии и логистики устройства, количества присаживаемых в расплав необходимых материалов, в том числе активного магния, последовательности их размещения в струйно-вихревом смесителе.

Работу паров магния A_{Mg} определяли по формуле:

$$A_{Mg} = m_{Mg} \left(\frac{R(t+273)}{M.в.} - \frac{\rho_{Fe} \cdot g \cdot h}{\rho_{Mg}} \right), \quad (1)$$

где m_{Mg} – масса магния, кг; ρ_{Mg} – плотность магния, кг/м³; ρ_{Fe} – плотность жидкого железа, кг/м³; $M.в.$ – молекулярный вес магния, кг/моль; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – глубина погружения ИДУ в жидкий металл, м; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К; t – температура жидкой стали, °С.

Для рассматриваемых условий эксперимента работа паров магния составляет

$$A_{Mg} = 0,13 \cdot 10^7 \text{ Дж}. \quad (2)$$

Основная идея предложенного нового метода внепечной обработки металла заключалась в возможности получения металлопродукции с заданными свойствами без применения основного оборудования внепечной обработки металла. Было предложено устройство для его осуществления, возможности которого в первом приближении были подтверждены моделированием (рис. 1, рис. 2).

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования и термодинамических расчётов физико-химических процессов раскисления, микролегирования, рафинирования и модифицирования

расплавов на основе Fe - С были приняты за основу проектирования и создания импульсно – динамического устройства (ИДУ), представляющего собой картридж, или кассету, закреплённый на стальном футерованном стержне, и разделенный на отдельные сегменты и сектора. Эти «скворечники» разделены плавящимися металлическими перегородками и предназначены для размещения в них в определённом порядке материалов, необходимых для получения стали с заданными свойствами.



Рисунок 1 – Моделирование перемешивания жидкой фазы при помощи вихревого смесителя

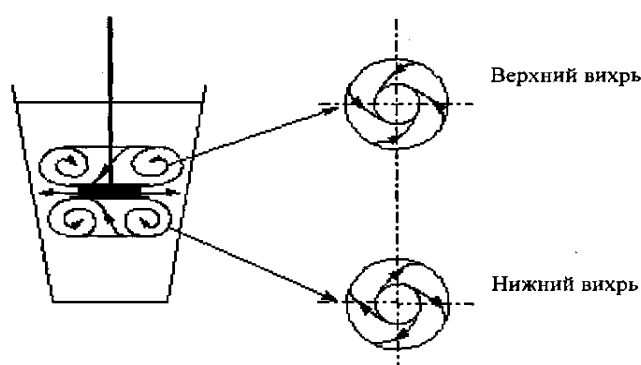


Рисунок 2 – Схема спирально-тороидальных вихрей, генерируемых струйным генератором неподвижного смесителя

Конструкция ИДУ (рис.3) учитывает возможность осуществления полиреагентной внепечной обработки металла в печи или ковше, включающей усреднение химического состава и температуры металла, раскисление, легирование и микролегирование, рафинирование, дегазацию, модифицирование, удаление шлака и неметаллических включений. Особенностью предложенной технологии является возможность внесения раскислителя и ферросплавов, легирующих и рафинирующих химически активных элементов, влияющих на механические свойства металлопродукции, с повышенной степенью их усвоения. Достигнутая благодаря этой технологии оптимизация процессов внепечной обработки расплавов сокращает время на усреднение массы металла в ковше по температуре и химическому составу, а это в свою очередь содействует ускорению процессов дальнейшей обработки металла в машинах непрерывной разливки стали. Металл в ковше перемешивается за счёт использования реактивной энергии струйных течений, формируемых при помощи

струйно-вихревых смесителей ИДУ, работающих по принципу реактивного двигателя в результате испарения активной составляющей (Mg) [6].

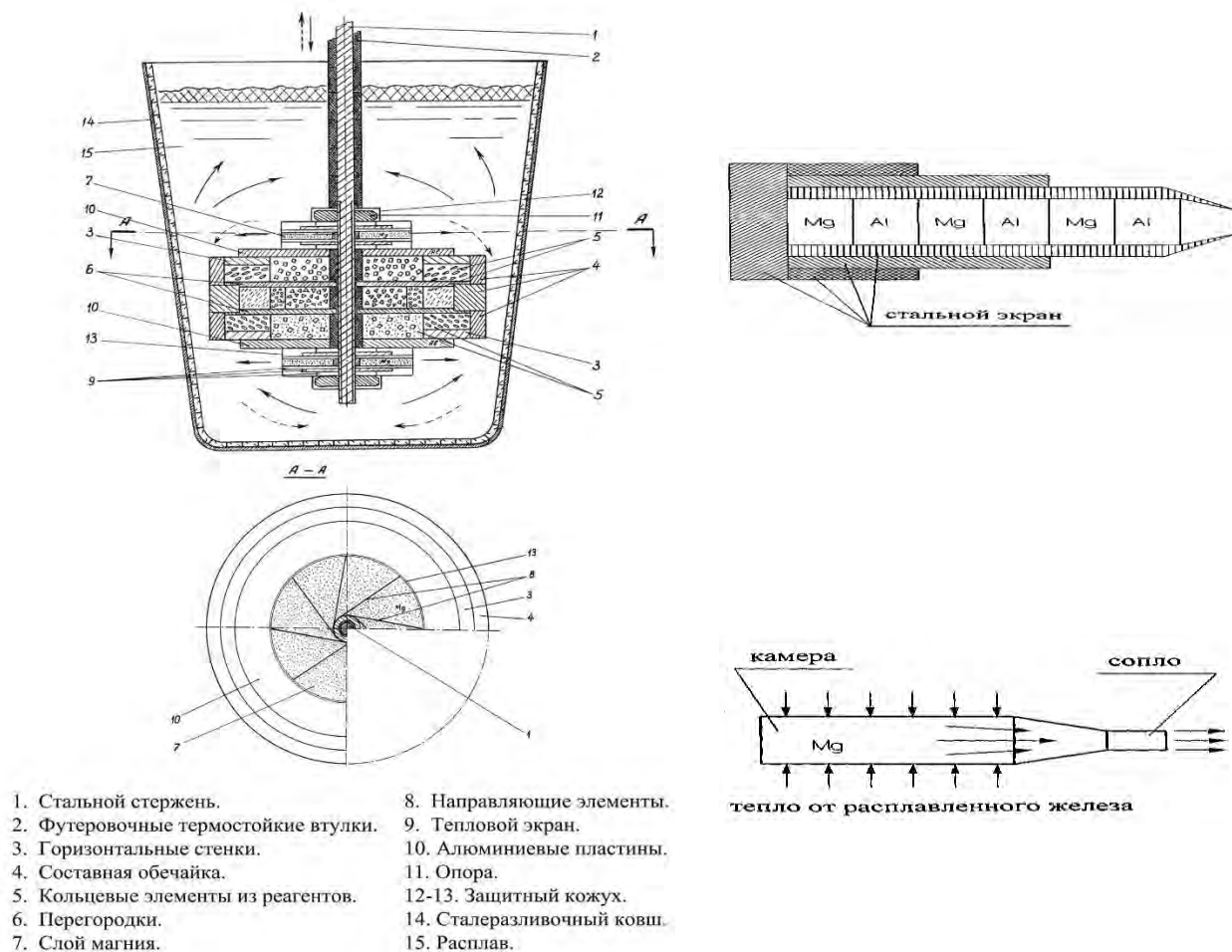


Рисунок 3 - Схемы расположения элементов импульсно - динамического устройства

Испытание ИДУ в промышленных условиях провели в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог» при выплавке стали марки Св08Г2С в 150-тонном конвертере с разливкой в изложницы для прокатки на квадрат и последующего переката на сварочную проволоку диаметром 5,5 мм. Соотношение количества передельного чугуна и металлического лома составило 128т/22т. Продувку осуществляли технически чистым кислородом с содержанием кислорода 99,4 %. На выпуске углеродистого полупродукта из конвертера в сталеразливочный ковш производили отсечку конвертерного шлака в начале и в конце выпуска. После выпуска металл в ковше обработали с помощью ИДУ. Для этого струйно-вихревой смеситель ИДУ краном опустили в ковш с металлом и в течение общего времени обработки, составившего 6 минут, визуально отмечали срабатывание ступеней струйно-вихревого смесителя, сопровождавшееся повышенным свечением и бурлением расплава в ковше. Было отмечено полное растворение всех присаживаемых материалов. Содержание серы в металле по среднековшевой пробе составило 0,009 %.

Картридж ИДУ содержал ферросплавы, легирующие, модифицирующие элементы и рафинировочные смеси в необходимых количествах. Обработка стали

Св08Г2С в сталеразливочном ковше проводилась без продувки нейтральным газом - аргоном, которая по обычной технологии применяется с целью перемешивания металла для усреднения его по температуре и химическому составу. После обработки стали с помощью ИДУ её разлили в 15 изложниц С-9. Общая масса полученной стали соответствовала расчётной и составила около 130 т.

Полученная сталь марки Св08Г2С, выплавленная с применением полиреагентной внепечной обработки ИДУ, имела улучшенные характеристики механических свойств и была назначена в соответствии с требованиями ГОСТ 2246 (табл.1,2).

Таблица 1 - Химический анализ опытной стали Св08Г2С

Содержание элементов, %																
С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	N ₂	Ti	As	B	Al	Mo	V	W	Co
0,11	1,69	0,82	0,009	0,019	0,031	0,010	0,018	0,0061	<0,005	<0,005	<0,005	0,022	<0,010	<0,005	<0,040	<0,010

Таблица 2 - Химический состав стали Св08Г2С по ГОСТ 2246, (%)

С	Mn	Si	Cr, н.б.	Ni, н.б.	S, н.б.	P, н.б.
0,05-0,11	1,80-2,10	0,70-0,95	0,20	0,25	0,025	0,030

Готовая сталь по действующей технологии была прокатана на квадратную заготовку и перекатана на проволоку диаметром 5,5 мм.

Новизна и полезность конструкции ИДУ и технологий внепечной обработки с применением ИДУ подтверждаются патентами на изобретения [7 - 10].

Заключение

1. Показана принципиальная возможность применения конструкции импульсно - динамического устройства (ИДУ) для реализации комплексной полиреагентной внепечной обработки жидких металлических расплавов, альтернативной применяемым способам внепечной обработки.

2. Результаты физического и математического моделирования подтверждены промышленными экспериментами в условиях действующих металлургических предприятий. Полученная сталь марки Св08Г2С (ГОСТ 2246), выплавленная с внепечной обработкой ИДУ, соответствовала действующим требованиям и отправлена по назначению.

3. При производстве конвертерной стали Св08Г2С с внепечной обработкой в 150-тонных сталеразливочных ковшах применение ИДУ позволило обеспечить раскисление, легирование, рафинирование и модифицирование стали, а также перемешивание металла в ковше, без использования традиционного оборудования для внепечной обработки металла.

4. Полезность и новизна технологии внепечной обработки с помощью ИДУ и конструктивных особенностей ИДУ подтверждены рядом патентов на изобретения.

5. Технология полиреагентной внепечной обработки жидкого металла с помощью ИДУ может быть рекомендована для улучшения качества металла на

металлургических и машиностроительных предприятиях, на которых ограничена возможность использования известных способов внепечной обработки металла.

Благодарности

Автор благодарит за активное участие в разработке технологии полиреагентной внепечной обработки металлов с помощью импульсно - динамического устройства Чепеля С.Н., Звездина А.А., Найдека В.Л., Тарасевича Н.И. и других специалистов, спонсоров работы, технический персонал научных организаций и предприятий, без которых результаты работы вряд ли были бы достигнуты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасевич, Н.И. Технология производства конвертерной стали с полиреагентным рафинированием / Н.И. Тарасевич, С.Г. Мельник, Р.Я. Якобше и др. - Киев.: Информлитъе, 2010. – 262 с: ил. - Текст: непосредственный.

2. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали. М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с: ил. - Текст: непосредственный.

3. Экхардт, Г. Механизм очистки стали от неметаллических включений в раскисленных алюминием сталях. / Г. Экхардт. [Электронный ресурс]. - Новые огнеупоры, 2013, (4): С. 16–23. URL: <https://doi.org/10/17073/1683-4518-2013-4-16-23>

4. Еланский, Г.Н. Роль ковшевой обработки стали в формировании свойств и структуры металлического расплава / Г.Н. Еланский - Текст: непосредственный. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т.15, №3. – С. 20–23: ил.

5. Скляр, В.О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии / В.О. Скляр // Учебное пособие. - Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с: ил. - Текст: непосредственный.

6. Найдек, В.Л., Производство стали с применением внепечной обработки импульсно-динамическим устройством / В.Л. Найдек, М.А. Поживанов, Н.И. Тарасевич и др. - Текст: непосредственный // Бюл. н. - т. информации. Черная металлургия, 2011. – Вып. 3 (1335). - С. 48–50.

7. Патент № 2370547 Российская Федерация, МПК С21С 7/00 (2006.01), В22D 1/00 (2006.01). Передвижной модуль для комплексной обработки металла в ковше: № 2003125801/02: заявл. 10.03.2005, опубл. 20.10.2009 / С.Н. Чепель, А.А. Звездин, В.В. Найденко, С.Г. Мельник, Н.И. Тарасевич – 17 с.: ил. – Текст: непосредственный.

8. Патент № 2398891 Российская Федерация, МПК С21С 7/04 (2006.01). Способ ввода реагентов в расплав, перемешивания расплава металла и устройство для его осуществления: № 2003125800/02: заявл. 10.03.2005, опубл. 10.09.2010 / С.Н. Чепель, А.А. Звездин, В.В. Найденко, С.Г. Мельник, Н.И. Тарасевич – 15 с.: ил. – Текст: непосредственный.

9. Патент № 2247156 Российская Федерация, МПК С21С 7/00 (2006.01), F27D 23/04 (2006.01). Способ обработки расплава металла в ковше и устройство для его осуществления: № 2002110405/02: заявл. 10.11.2003, опубл. 01.12.2017 / С.Н. Чепель, А.А. Звездин, В.В. Найденко, В.Л. Найдек – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

10. Патент № 2247157 Российская Федерация, МПК С21С 7/00 (2000.01), F27D 23/04 (2000.01). Способ ввода реагентов в расплав, перемешивания расплава металла и устройство для его осуществления: 2002120582/02: заявл. 20.02.2004, опубл. 27.02.2005 / С.Н. Чепель, А.А. Звездин, В.В. Найденко, В.Л. Найдек, Ю.Н. Савченко – 14 с.: ил. – Текст: непосредственный.

OUT - OF - FURNACE PROCESSING OF Fe - C - MELTS WITH THE APPLICATION OF A PULSE-DYNAMIC DEVICE

Abstract

The article considers a new method of out-of-furnace metal processing developed by New Technologies and Investments LLC, which is an alternative to other well-known methods of out-of-furnace metal processing. For the first time, a method was proposed for processing liquid metal in a ladle using a pulse-dynamic device, representing a cartridge (cassette) fixed on a metal rod and divided into segments and sectors separated by melting metal partitions. Segments and sectors contain materials that, reacting with liquid metal when pulsed dynamic device is immersed in a ladle, carry out polyreagent out-of-furnace processing. The technology of out-of-furnace processing with the help of pulsed dynamic device ensures the averaging of the chemical composition and temperature of the metal without traditional blowing with neutral gas, deoxidation, alloying, refining, modification, etc. Out-of-furnace processing technologies and pulsed dynamic device designs have been tested at a number of full-cycle metallurgical enterprises. The results of the pilot melts confirmed the fundamental possibility of using the technology of polyreagent out-of-furnace processing and PDD to obtain high-quality steels without using traditional methods of out-of-furnace processing of liquid metal. The novelty and usefulness of the pulsed dynamic device design and out-of-furnace processing technologies are confirmed by patents.

Keywords: Fe-C alloys; pulsed dynamic device; alternative polyreagent out-of-furnace processing; alloying; deoxidation; modification; refining; non-metallic inclusions.

С.Ю. Прилипко, Д.С. Линник, Ю.А. Кудрявцев, Д.Р. Беличко,
Г.К. Волкова, В.А. Глазунова, В.В. Бурховецкий
Государственное бюджетное учреждение «Донецкий физико-технический
институт им. А.А. Галкина», Донецк, Россия, suprilipko@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА С ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ НА ИЗГИБ

Аннотация

Исследовано влияние морфологии нанопорошков Al_2O_3 на структуру и прочность пористой керамики из них и установлена возможность повышения удельной прочности путем заполнения открытых пор эпоксидными смолами. Разработан способ получения композитных материалов низким удельным весом (2–2,5 г/см³). Получены образцы полимер-керамических композитов с матрицей из Al_2O_3 , сочетающие в себе достоинства обоих материалов.

Ключевые слова: полимер-керамический композит, оксид алюминия, эпоксидные смолы, прочность, плотность.

Введение

Снижение удельного веса конструкционных материалов является одной из неизменных задач человеческой деятельности. Особенно важным этот параметр является для снижения энергозатрат и при эксплуатации подвижных частей механизмов.

Важным структурной особенностью, определяющей свойства композиционных материалов, является наличие непрерывной матрицы и распределенных в ней наполнителей. Как правило, керамико-органические композиты состоят из органической матрицы с керамическими частицами в качестве наполнителей [1, 2]. Целью данной работы было получение композита, в котором каждый компонент был бы представлен в виде непрерывной подструктуры с их взаимным проникновением. Такое строение материала способно была бы при его разрушении замедлять движение трещины из-за её разветвления при прохождении границ керамика-полимер и, как следствие, рассеивания её энергии.

Методы

Для получения нанодисперсного оксида алюминия применялся способ химического осаждения раствором аммиака из раствора сульфата алюминия, либо нитрата алюминия с последующим прокаливанием. В зависимости от температуры прокаливании получались порошки различной дисперсности и фазового состава. Дисперсный состав частиц определялся с использованием просвечивающей (трансмиссионной) электронной микроскопии на микроскопе JEM-200A при ускоряющем напряжении 200 кV и сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-6490LV.

Прочность на четырехточечный изгиб измерялась на установке Tinius Olsen H50kt. Твёрдость по Виккерсу и трещиностойкость определялись с использованием твердомера ТП-7Р-1.

Результаты и обсуждение

Пористые образцы, различающиеся величиной пористости и внутренней структурой, были получены твердофазным спеканием из порошков Al_2O_3 различной морфологии (рисунок 1). Порошки различались формой частиц, их размерами, а также типом кристаллической решетки. Средний размер кристаллитов варьировался от 10 нм (рисунок 1в) до 2000 нм (рисунок 1ж). Также для повышения плотности компакта применялись полидисперсная смесь порошков (рисунок 1а). Форма частиц была как правильной многоугольной (рисунок 1б) сферической (рисунок 1г, 1е, 1и), так и нитевидной (рисунок 1д), столбчатой (рисунок 1з). Химический состав всех порошков был одинаковый, добавки не применялись. Давление холодного изостатического прессования составляло от 200 до 1000 МПа. Температура спекания составляла $1450^\circ C$. В результате спекания были получены образцы с пористостью от 25 до 55% при теоретической плотности $3,99 \text{ г/см}^3$.

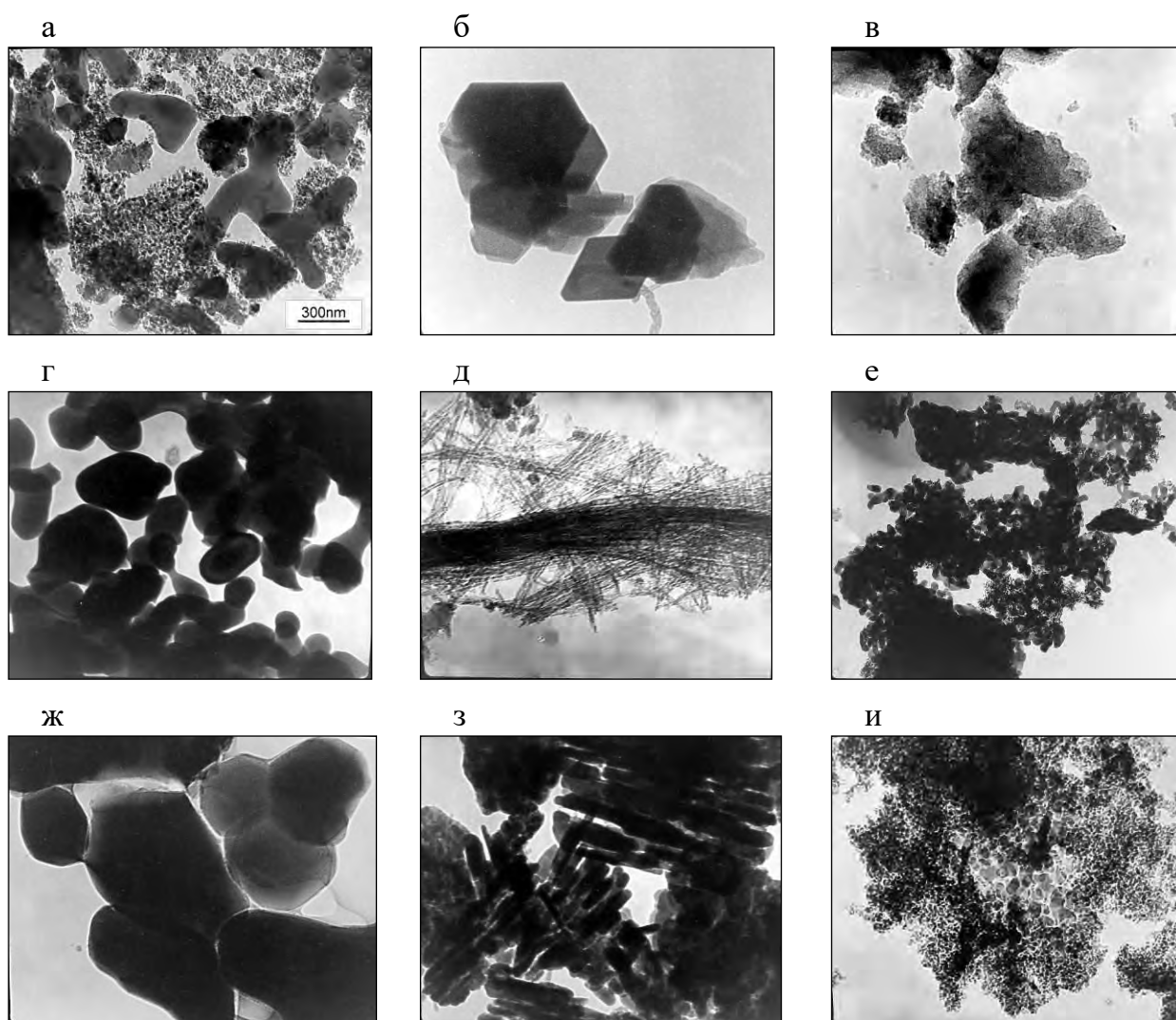


Рисунок 1 – Исходные порошки Al_2O_3 . Масштаб для всех фотографий одинаковый.

Испытания на четырехточечный изгиб (рисунок 2) продемонстрировали большое влияние на прочность не только плотности образцов и давления их предварительного прессования, но и морфологии исходных порошков и, как следствие, полученной микроструктуры керамики (рисунок 3).

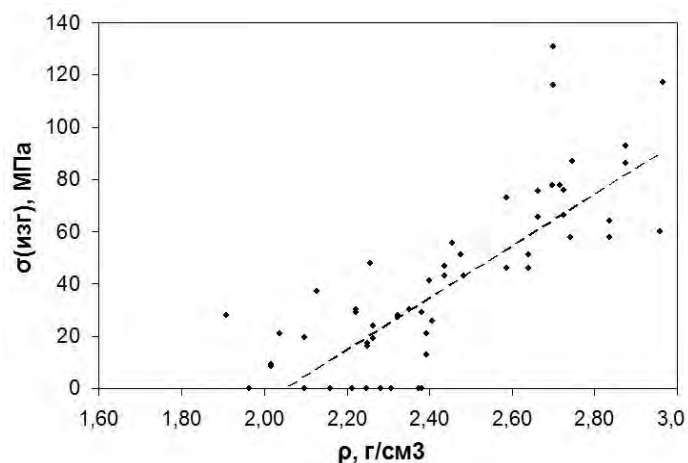


Рисунок 2 – Прочность пористой керамики Al_2O_3 при испытаниях на четырехточечный изгиб

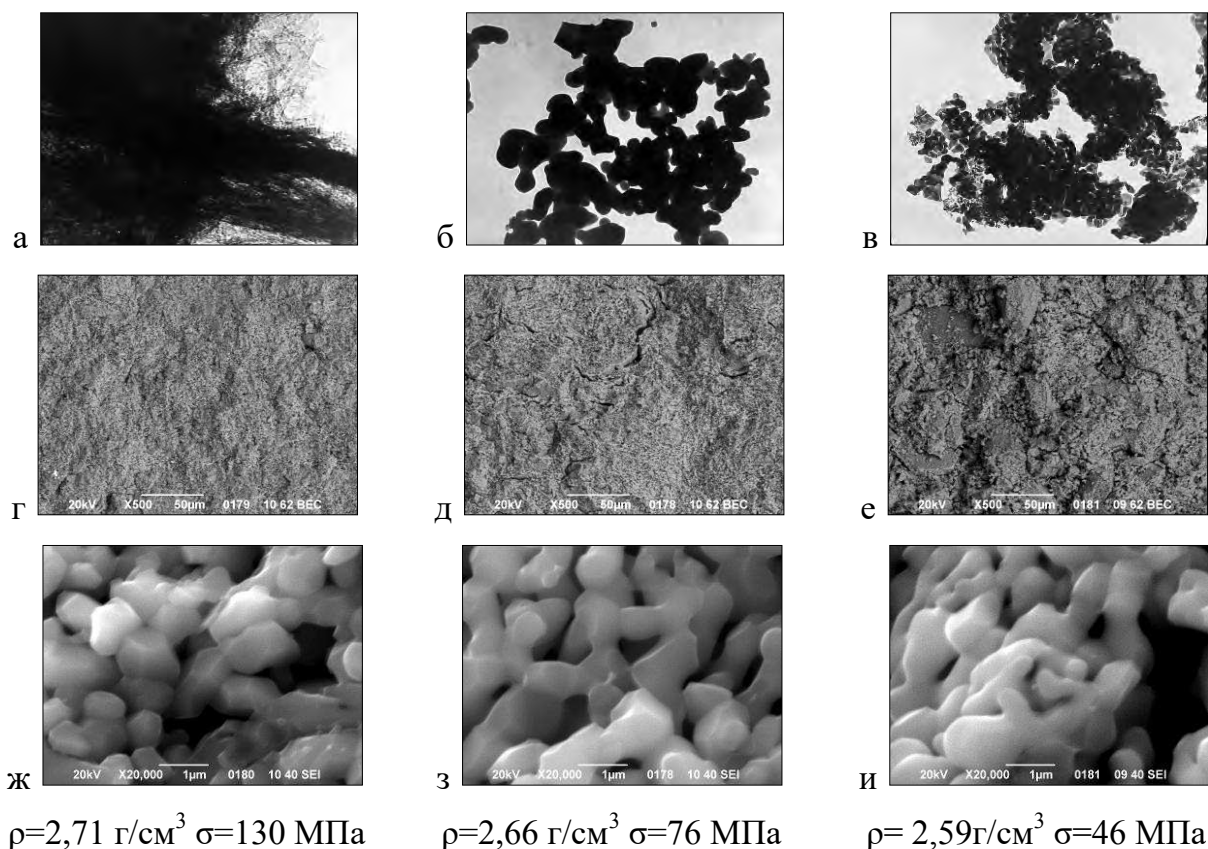


Рисунок 3 – Зависимость микроструктуры и прочности образцов от морфологии исходного порошка

Как видно из рисунка 2, максимальная прочность пористых образцов, достигнутая в ходе экспериментов, составила 130 МПа. Результаты исследований микроструктуры образцов выявили определенные закономерности, влияющие на их прочность. Ключевым фактором, определяющим прочность образцов, оказалось наличие крупных пор (рисунок 3д, 3е), появление которых, по-видимому, обусловлено морфологией исходного порошка и в некоторой степени нивелируется повышением давления холодного изостатического прессования. Отметим, что из

частиц нитевидной формы получены более прочные образцы (рисунок 3а) чем из сферических частиц (рисунок 3б, 3в).

На следующем этапе изучалось изменение прочности образцов при заполнении пор полимерными составами. Задача эксперимента заключалась в получении композита, в котором каждый компонент имел бы непрерывную структуру. Основываясь на ранее полученных результатах, для получения композита были выбраны исходные порошки, наиболее перспективные с точки зрения удельной прочности. В качестве полимерных наполнителей использовались I – коммерческая эпоксидная смола Master Teks и II – эпоксидный полимер катионной полимеризации УП-650Т. Основные требования, предъявлявшиеся к полимерам, заключались в длительном отверждении с минимальными изменениями размеров при этом, а также высокой степени адгезии с керамикой. Нужно отметить, что выбранные полимеры демонстрировали эластичность при отсутствии керамического каркаса. Тем не менее, заполнение пустот в пористых керамических образцах привело к существенному росту их прочности, а в случае с полимером (II), то и к росту удельной прочности (рисунок 4). Также отмечался значительный рост трещиностойкости.

По данным электронной микроскопии (рисунок 5) установлена возможность заполнения как крупных пор, так и мелких капилляров, однако предельно возможную глубину проникновения различных полимеров еще предстоит выяснить.

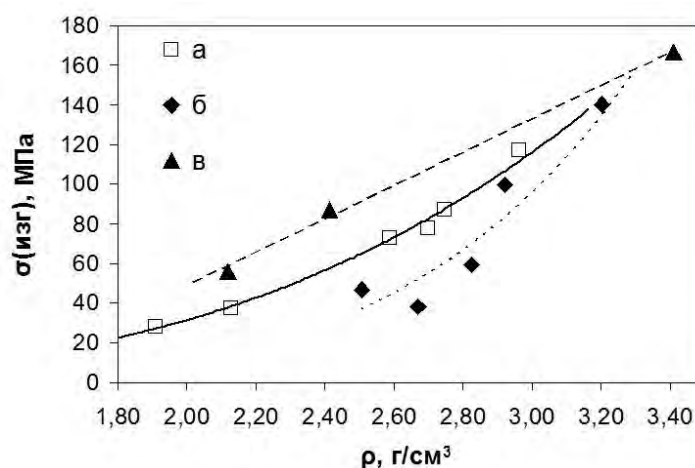


Рисунок 4 – Зависимость прочности образцов от их плотности: а) исходной корундовой матрицы; б) корундовая матрица, заполненная полимером I; в) корундовая матрица, заполненная полимером II.

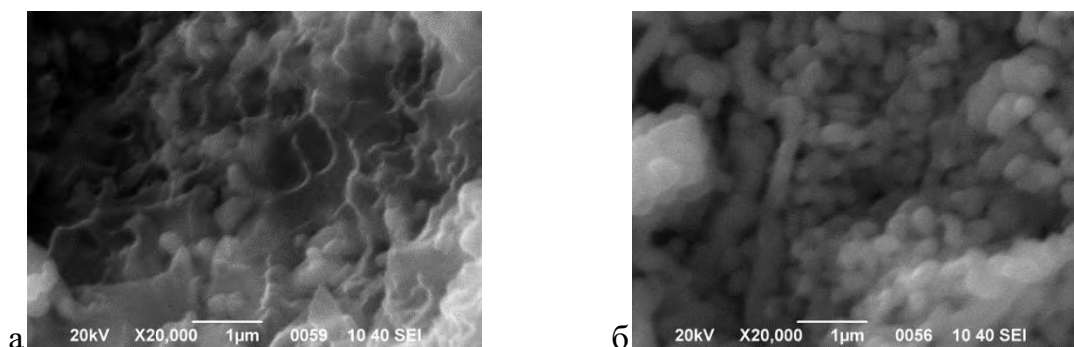


Рисунок 5 – Внутренняя структура образцов Al_2O_3 с заполненными полимером порами (а) и исходная структура (б)

Заклучение

Из приведенных результатов можно сделать вывод о перспективности применения эпоксидных смол для получения полимер-керамических композитов. Предложенные композиты с керамической матрицей способны соединять в себе достоинства обоих компонентов: высокую прочность и износостойкость при низком удельном весе и устойчивости к коррозии. Решена задача получения керамической структуры с открытой пористостью, которая обеспечивала бы полное заполнение пор керамической матрицы упрочняющими полимерными составами. Получены композитные образцы с удельной прочностью на изгиб выше, чем у исходной пористой керамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охлопкова, А.А. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями / А.А. Охлопкова, О.А. Адрианова, С.Н. Попов. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. – 222 с.
2. Кропотин, О.В. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена / О.В. Кропотин, Ю.К. Машков, В.А. Егорова, О.А. Кургузова // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – № 5. – С. 66–70.

S.Yu. Prilipko, D.S. Linnik, Yu.A. Kudryavtsev, D.R. Belichko,
G.K. Volkova, V.A. Glazunova, V.V. Burkhovetsky
State budgetary institution "Donetsk Institute of Physics and Technology
named after A.A. Galkin, Donetsk, Russia, suprilipko@mail.ru

FORMATION OF THE STRUCTURE OF A POLYMER-CERAMIC COMPOSITE WITH INCREASED SPECIFIC BENDING STRENGTH

Abstract

The influence of the morphology of Al_2O_3 nanopowders on the structure and strength of porous ceramics from them has been studied, and the possibility of increasing the specific strength by filling open pores with epoxy resins has been established. A method for obtaining composite materials with a low specific gravity ($2-2.5 \text{ g/cm}^3$) has been developed. Samples of polymer-ceramic composites with an Al_2O_3 matrix have been obtained, which combine the advantages of both materials.

Keywords: polymer-ceramic composite, aluminum oxide, epoxy resins, strength, density.

С.В. Васильев^{1,2}, А.И. Лимановский¹, В.М. Ткаченко¹, Т.В. Цветков¹,
Е.А. Свиридова^{1,2}, В.В. Бурховецкий¹, В.Н. Саяпин¹, В.И. Ткач¹

¹ГБУ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, ДНР

²ГО ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Макеевка, ДНР

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ БЫСТРООХЛАЖДЁННЫХ ЛЕНТ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация

Методами рентгенографии, сканирующей электронной микроскопии, измерения микротвердости и испытаний на трехточечный изгиб исследованы структура и механические свойства двух- и трехслойных образцов, консолидированных методом кручения под высоким давлением быстроохлажденных лент сплавов на основе алюминия с аморфной и кристаллической структурами. Установлено, что образцы с нанокompозитной структурой, сформированной в процессе интенсивной пластической деформации, обладают высокой твердостью в сочетании с относительно высокой пластичностью.

Ключевые слова: аморфные и кристаллические алюминиевые ленты, кручение под высоким давлением, слоистые нанокompозиты, твёрдость, пластичность.

Введение

Темпы научно-технического прогресса во многом определяются разработкой новых материалов с повышенными уровнями физико-механических свойств или уникальными их сочетаниями. В настоящее время основные исследования сконцентрированы на создании материалов с неравновесными, композитными и гибридными структурными состояниями. Для формирования метастабильных структур в металлических сплавах наиболее эффективными являются методы закалки из жидкого и парообразного состояния, а также интенсивной пластической деформации. С помощью этих методов металлические сплавы были получены в нанокристаллическом и аморфном состояниях, которые характеризуются исключительно высокими уровнями ряда физических свойств и уникальными их сочетаниями [1-3]. Однако до настоящего времени в промышленном масштабе используются преимущественно магнитные свойства сплавов с аморфной и нанокристаллической структурой [3], в то время как высокий уровень прочностных свойств, характерный для этих материалов, остаётся практически нереализованным. Основными ограничениями для использования аморфных и нанокристаллических сплавов в качестве конструкционных материалов являются относительно низкие пластичность и склонность к аморфизации, особенно сплавов на основе Al, которые могут быть получены в некристаллическом состоянии в форме порошков, чешуек и лент с размерами в одном измерении, не превышающими 100 мкм.

В последние годы для формирования неравновесных структурных состояний все более широко стали использоваться методы интенсивной пластической деформации (ИПД), сочетающие комбинированное воздействие высокого давления и пластическое течение [4]. Первоначально методы ИПД использовались для получения

мелкозернистых структур с повышенным уровнем механических свойств. Однако, последующие исследования показали возможность использования ИПД для консолидации дисперсных материалов [5], а также для формирования одновременно с консолидацией неравновесных структурных состояний, включающих аморфные [6].

Следует отметить, что использование для консолидации материалов с аморфными структурами методом ИПД показало их более высокую эффективность для сохранения неравновесных состояний по сравнению с традиционными методиками порошковой металлургии. В частности, при консолидации аморфных лент $Al_{86}Ni_6Co_2Gd_6$ методом винтовой экструзии в объёмных образцах была зафиксирована нанокompозитная (нанокристаллы Al + аморфная матрица) структура [5], а аморфная структура порошка $Al_{90}Fe_5Nd_5$ сохранялась в дисках, полученных консолидацией методом кручения под высоким давлением (КВД) [7]. Более того, как установлено в ряде работ (напр., [7,8]), деформации, создаваемые в методе КВД, оказываются достаточными для формирования в аморфной матрице при комнатной температуре нанокристаллов Al с размерами ≤ 20 нм, т. е. высокопрочной нанокompозитной структуры, которая в условиях нагрева стекол на основе Al формируется при температурах выше 423 К.

Исходя сказанного, представлялось интересным использовать метод КВД для консолидации пакетов, составленных из слоёв материалов с аморфной и кристаллической структурами. В качестве объектов исследования были выбраны сплавы с номинальными составами (в at. %) $Al_{86}Ni_8Gd_6$ (AlNiGd) и $Al_{95,3}Cr_{2,7}Zr_{0,7}Mo_{1,3}$ (AlCrZrMo). Первый из этих сплавов относительно легко аморфизуется при закалке из расплава [9], в то время как второй является основой для разработки жаропрочных сплавов, склонных к дисперсионному твердению после закалки из жидкого состояния [10].

Методы

Быстроохлаждённые ленты сплавов AlNiGd и AlCrZrMo в форме лент шириной 10 мм и толщиной 66 ± 8 мкм и 45 ± 2 мкм соответственно получали методом спиннингования расплава в защитной атмосфере и на воздухе. Эксперименты по консолидации лент проводили методом КВД, схема которого показана на рис. 1. Образцы (3) в виде пакета из кусочков двух или трех лент с размерами 5×5 мм располагались между двумя наковальнями (1 и 2) с плоскими поверхностями диаметром 5 мм. Обработка производилась при комнатной температуре при приложенных давлениях 2 и 4 ГПа, а степень деформации регулировалась числом оборотов (от 1 до 4-х) нижнего подвижного пуансона со скоростью 1 об/мин.

Структура образцов исследовалась методами рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-3М, излучение $CoK\alpha$) и сканирующей электронной микроскопии (JEM-100CX). Механические свойства образцов изучались методами испытаний на трёхточечный изгиб и измерения микротвёрдости. Испытания дисков на трёхточечный изгиб проводились на специально изготовленной установке с пролётом между опорами (L) 2 мм. Нагрузка к образцу прикладывалась в ступенчатом режиме с шагом 10 мкм со скоростью 0,1 мм/мин. По результатам испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ Р56810–2015 определялись значения модуля упругости (E_b) и прочности при изгибе (σ_b), а также деформации на внешней поверхности образцов (ε_{max}) по соотношениям: $E_b = mL^3 / (4bh^3)$, $\sigma_b = 3F_{max}L / (2bh^2)$ и $\varepsilon_{max} = 6\delta h / L^2$, где m – тангенс угла наклона касательной первоначального линейного участка диаграммы

деформирования к оси деформации, b – ширина образца, h – толщина образца, F_{\max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, δ – прогиб центральной части образца. Микротвёрдость образцов измерялась на приборе ПМТ-3 под нагрузкой 0,27 Н и временем экспозиции 10 с.

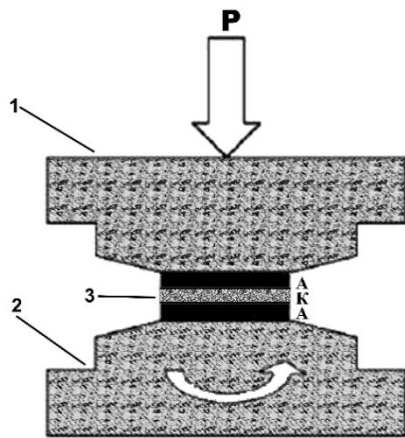


Рисунок 1 – Схема процесса консолидации методом КВД.

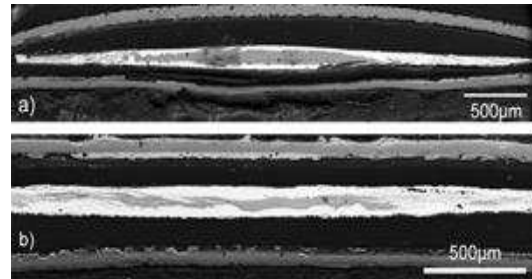


Рисунок 2 – Структура поперечного сечения трехслойных дисков из аморфной (светлой) и кристаллической (темной) лент, подвергнутых деформации в 4 оборота под давлением 2 (а) и 4 ГПа (b).

Результаты и обсуждение

Полученные методом КВД консолидированные образцы диаметром 5 мм имели форму выпуклых линз (рис. 2), средние толщины которых снижались от центральной части к краям от 90–120 мкм до 60–100 мкм трехслойных и от 90–110 мкм до 78–92 мкм двухслойных дисков соответственно. Электронно-микроскопические исследования внутренней структуры трёхслойных образцов показали, что 4-х оборотная деформация приводит к полной консолидации лент: в центральной части диска с минимальной степенью деформации формируется чёткая без несплошностей граница между лентами, а по мере удаления от центра диска и повышения давления границы между лентами размываются и происходит смешивание материалов лент (рис. 2).

Рентгенографические исследования двухслойных образцов из аморфных лент показали, что деформация приводит к появлению в аморфной структуре нанокристаллов чистого Al (рис. 3a), средний размер которых составляет $10 \pm 1,5$ нм, а объемная доля – 21%. Поскольку такого рода частично-кристаллические нанокомпозитные структуры формируются в процессе нагрева аморфных сплавов на основе Al, результаты, приведенные на рис. 3a, свидетельствуют о том, что интенсивная пластическая деформация инициирует процесс кристаллизации стекла AlNiGd уже при комнатной температуре.

В отличие от сплава AlNiGd быстроохлажденные ленты сплава AlCrZrMo имели кристаллическую структуру (рис. 3b), состоящую преимущественно из твердого раствора на основе Al (линии (111) и (200)) и некоторого количества интерметаллических соединений Al с переходными металлами. Деформация лент сплава AlCrZrMo приводит к относительно слабым изменениям дифракционных картин: увеличению ширины рефлексов Al и снижению относительной

интенсивности линий интерметаллидов (рис. 3б). Наблюдаемые изменения дифракционной картины обусловлены увеличением степени насыщенности Al твердого раствора переходными элементами, возрастанием уровня микронапряжений и измельчением его структуры.

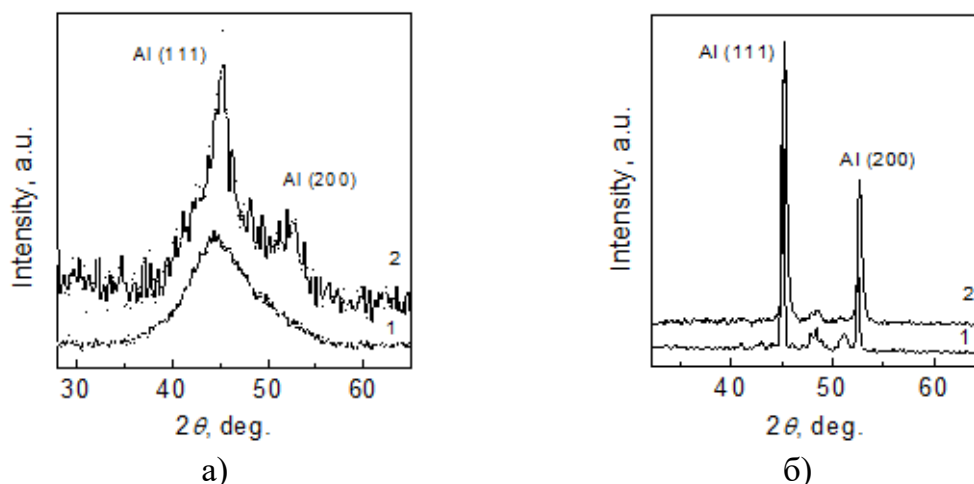


Рисунок 3 – Дифрактограммы быстроохлажденных лент сплавов AlNiGd (а) и чешуек сплава AlCrZrMo (б) в исходном состоянии (1) и консолидированных дисков после деформации (1 оборот под давлением 2 ГПа) (2)

Рентгенографические исследования консолидированных трехслойных образцов показали, что их дифракционные картины имели вид, аналогичный дифрактограмме деформированной аморфной ленты, приведенной на рис. 3а, что неудивительно, поскольку кристаллическая лента находится внутри оболочки из аморфных лент (рис. 2). Анализ влияния степени деформации на параметры нанокompозитных структур, образующихся в процессе консолидации двухслойных образцов из аморфных лент, показал [13], что увеличение числа оборотов до 4-х не приводит к существенным изменениям средних размеров нанокристаллов (10–12 нм) и их доли (19–21%) по сравнению с приведенными выше параметрами. Напротив, усредненные значения размеров нанокристаллов Al в трехслойных образцах непрерывно снижаются от 40 до 18 нм при увеличении степени числа оборотов от 1 до 4-х, а доля кристаллической фазы растет от 17 до 37%. Более высокие значения средних размеров нанокристаллов и их доли в трехслойных образцах и характер их изменений обусловлены наличием ленты с кристаллической структурой, а также изменениями соотношения кристаллической и аморфной фаз в поверхностных слоях вследствие их перемешивания на периферии дисков (рис. 2).

Ввиду того, что сплавы на основе Al используются преимущественно в качестве конструкционных материалов, то наибольший интерес с практической точки зрения представляют их механические свойства. Учитывая малые размеры консолидированных образцов, в качестве характеристики их прочностных свойств использовались значения микротвердости. Измерения, проведенные на свободных сторонах лент AlNiGd и AlCrZrMo, дали значения $2,6 \pm 0,2$ ГПа и $1,5 \pm 0,1$ ГПа соответственно. Отметим, что первое из этих значений характерно для металлических стекол на основе Al с аналогичным уровнем легирования [9], а второе практически

совпадает с твердостью гранул промышленного сплава 01419 на основе системы Al-Cr-Zr, закристаллизованных при скорости охлаждения порядка 10^5 К/с [10].

Измерения, проведенные на поверхностях дисков, показали, что деформация приводит к возрастанию микротвердости, причём более существенный прирост твердости наблюдался на периферии дисков, что связано с характерным для метода КВД неоднородным распределением деформации [12]. Например, твердость в центре и на периферии трехслойного диска, подвергнутого 4-х оборотной деформации под давлением 2 ГПа, составляла $3,71 \pm 0,4$ и $5,62 \pm 0,8$ ГПа. Однако, учитывая большой разброс результатов измерений, обусловленный шероховатой поверхностью дисков и наличием локальных участков с отличающейся твердостью, твердость консолидированных дисков характеризовалась средними значениями результатов не менее 10 измерений, проведенных вдоль диаметров дисков.

Измерения показали (рис. 4), что с увеличением степени деформации средняя микротвердость консолидированных трехслойных дисков непрерывно возрастает от 2,3 ГПа (средневзвешенное значение твердости двух аморфных и кристаллической ленты) до 4,7 ГПа. Значения твердости двухслойных консолидированных дисков из сплава AlNiGd также растут от 2,6 до 4,1 ГПа, но по кривой с насыщением. Аналогичный характер изменения твердости аморфной ленты сплава $Al_{87}Ni_8Gd_5$ от степени деформации методом КВД наблюдали авторы работы [11], что коррелирует с описанным выше характером прироста доли закристаллизованного объема в деформированных образцах с аморфной структурой.

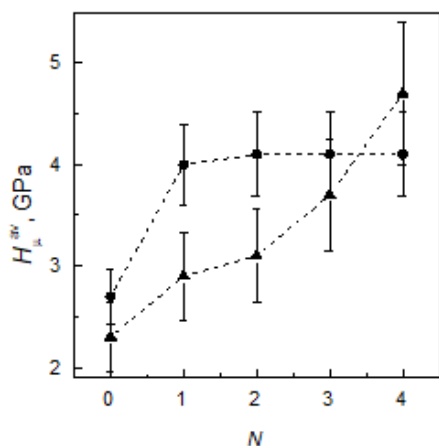


Рисунок 4 – Средние значения микротвердости поверхности консолидированных двухслойных дисков из сплава AlNiGd (●) и трехслойных аморфно-кристаллических дисков (▲) в зависимости от числа оборотов.

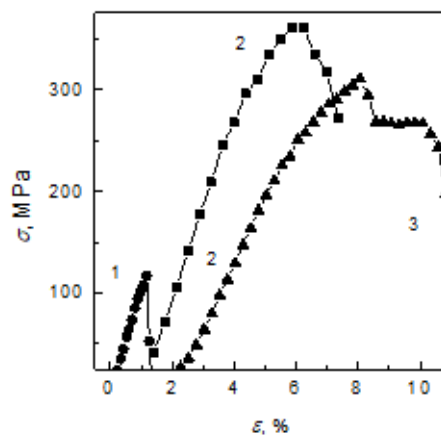


Рисунок 5 – Кривые «напряжение-деформация» испытаний на трехточечный изгиб: (1) аморфная лента после нагрева до 473 К (2) двухслойный образец, консолидированный из аморфных лент под давлением 4 ГПа; (3) трехслойный образец, консолидированный под давлением 4 ГПа.

Как отмечалось, высокопрочные нанокompозитные структурные состояния, которые формируются в аморфных сплавах на основе Al в процессе термической обработки, обладают исключительно низкой пластичностью [3,9]. Как показано выше, обработка аморфных сплавов на основе Al методом КВД может рассматриваться как альтернативный метод формирования нанофазных композитов с исключительно высоким уровнем прочностных свойств. В связи с этим

представлялось интересным оценить уровень пластичности слоистых дисков, полученных консолидацией аморфных лент. Для этой цели в работе был использован метод испытаний плоских образцов на трехточечный изгиб с помощью специально изготовленной установки. Для сравнения были проведены испытания ленты сплава AlNiGd с нанокompозитной структурой, сформированной в процессе нагрева со скоростью 10 К/мин до 473 К. Согласно результатам рентгенографических исследований, выбранный режим термической обработки приводит к образованию нанокompозитной структуры, со структурными параметрами, близкими к параметрам нанокompозитов в консолидированных дисках.

Испытания, результаты которых приведены на рис. 5, показали, что нанокompозитные структуры, формирующиеся в аморфных лентах в процессе консолидации методом КВД, характеризуются более высокой пластичностью (4,9%), пределом прочности на изгиб (332 МПа) (кривая 2 на рис. 5) и микротвердостью (4,1 МПа) по сравнению с нанокompозитной структурой, сформированной в процессе термической обработки аморфной ленты (1,2% и 117 МПа соответственно) (кривая 1). Еще более высокий уровень пластичности (до 6,4%) был достигнут в трехслойных консолидированных композитных образцах, состоящих из кристаллической ленты, помещенной между двумя аморфными лентами, (кривая 3) с еще более высоким уровнем микротвердости (4,7 ГПа).

Экспериментально обнаруженный повышенный уровень пластичности нанокompозитов, сформированных в процессе интенсивной пластической деформации, что, вероятнее всего, обусловлено увеличением концентрации избыточного свободного объема, имеет важное значение для разработки новых материалов с высокими уровнями механических свойств.

Заключение

В заключение отметим, что алюминиевые сплавы с аморфной структурой в процессе консолидации методом кручения под высоким давлением, формируют нанокompозитные структуры, характеризующиеся повышенными уровнями пластичности, прочности и микротвердости по сравнению с нанокompозитной структурой с аналогичными структурными параметрами, которая формируется в процессе стандартной термической обработки аморфной ленты. Еще более высокий уровень пластичности в сочетании с рекордной твердостью был достигнут в трехслойных консолидированных гибридных образцах, состоящих из кристаллической ленты, помещенной между двумя аморфными лентами. Учитывая, что одновременно со структурными изменениями методы ИПД позволяют получать объемные образцы, полученные в работе результаты свидетельствует о перспективности использованного подхода, а также о необходимости дальнейших работ по выбору комбинаций деформируемых материалов и по усовершенствованию методики деформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глезер А.М., Пермякова И.Е. Нанокристаллы, закаленные из расплава. – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
2. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Progr. Mater. Sci.* – 2000. – Vol. 45. – pp. 103–189.
3. Warlimont H. Amorphous metals driving materials and process innovations // *Mater. Sci. Eng. A* – 2001. – Vols. 304–306. – pp. 61–67.

4. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // *Acta Mater.* – 2013. – Vol. 61. – pp. 782–817.
5. Shpak A.P., Varyukhin V.N., Tkatch V.I., Maslov V.V., Beygelzimer Y.Y., Synkov S.G., Nosenko V.K., Rassolov S.G. Nanostructured Al₈₆Gd₆Ni₆Co₂ bulk alloy produced by twist extrusion of amorphous melt-spun ribbons // *Mater. Sci. Eng. A* – 2006. – Vol. 425. – pp. 172–177.
6. Bachmaier A., Pippan R. High-pressure torsion deformation induced phase transformations and formations: New material combinations and advanced properties // *Mater. Trans.* – 2019. – Vol. 60, No. 7. – pp. 1256–1269.
7. Yavari A.R., Botta Fihlo W.J., Rodrigues C.A.D., Cardoso C., Valiev R.Z. Nanostructured bulk Al₉₀Fe₅Nd₅ prepared by cold consolidation of gas atomized powder using severe plastic deformation // *Scripta Mater.* – 2002. – Vol. 46. – pp. 711–716.
8. Aronin A., Budchenko A., Matveev D., Pershina E., Tkatch V., Abrosimova G. Nanocrystal formation in light metallic glasses at heating and deformation // *Rev. Adv. Mater.* – 2016. – Vol. 46. – pp. 53–69.
9. Свиридова Е.А., Максимов В.В., Рассолов С.Г., Носенко В.К., Ткач В.И. Влияние химического состава аморфных сплавов на основе Al на термически индуцированное охрупчивание // *ФТТ* – 2014. – т. 56, вып. 7. – С. 1304–1311.
10. Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы – М.: ВИЛС, 1995. – 341 с.
11. Vasiliev S.V., Limanovskii A.I., Tkachenko V.M., Tsvetkov T.V., Svyrydova K.A., Burkhovetskii V.V., Sayapin V.N., Terekhov S.V., Tkatch V.I. Fabrication of consolidated layered samples by high-pressure torsion processing of rapidly solidified Al-based ribbons with amorphous and crystalline structures // *Mater. Today Commun.* – 2020. – vol. 24. – art. 101080.
12. Zhilyaev A.P., Nurislamova G.V., Kim B.-K., Baro M.D., Szpunar J.A., Langdon T.G. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion // *Acta Mater.* – 2003. – Vol. 51. – pp. 753–765.

S.V. Vasiliev^{1,2}, A.I. Limanovskii¹, V.M. Tkachenko¹, T.V. Tsvetkov¹,
E.A. Sviridova^{1,2}, V.V. Burkhovetskii¹, V.N. Sayapin¹, V.I. Tkatch¹

¹A.A. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Donetsk, DPR

²Donbas National Academy of Engineering and Architecture, Makeyevka, DPR

MECHANICAL PROPERTIES OF LAMELLAR COMPOSITES PRODUCED BY HIGH PRESSURE TORSION OF RAPIDLY COOLED RIBBONS OF Al-BASED ALLOYS

Abstract

Structure and mechanical properties of bi- and three-layer samples consolidated by high pressure torsion of rapidly quenched ribbons of amorphous and crystalline Al-based alloys were studied by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, three-point bend testing and microhardness measurements. It was established that the samples with nanocomposite structure formed in the course of the severe plastic deformation have high hardness combined with relatively enhanced ductility.

Keywords: Al-based amorphous and crystalline ribbons, high pressure torsion, lamellar nanocomposites, hardness, plasticity.

М.В. Семенченко
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Республика Беларусь, m.semenchenko@psu.by

ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПУТЕМ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРОПУСКАНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ ИЗДЕЛИЕ В РЕЖИМЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

Аннотация

Отмечена перспективность создания экономнолегированного проволочного материала определенного химического состава для формирования защитных покрытий. Предложена установка для диффузионного насыщения проволочного материала путем непосредственного пропускания электрического тока через изделие в режиме термоциклирования по маятниковой схеме. Предложен способ диффузионного насыщения стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования, осуществляемого по маятниковой схеме, позволяющий повысить производительность процесса по сравнению с традиционной обработкой в печи.

Ключевые слова: Диффузионное насыщение, проволока, термоциклирование, пропускание электрического тока, установка.

Введение

Защитные покрытия позволяют продлить срок службы детали. Для этого выбирают проволочный материал, состав которого коррелирует с условиями ее эксплуатации. При наличии широкой номенклатуры материалов для формирования защитных покрытий не всегда получается подобрать подходящий вариант. Из-за высокой стоимости использование высоколегированных материалов для восстановления или упрочнения малоресурсных деталей экономически невыгодно. Кроме того, одновременную закупку различных марок проволочного материала большинство руководителей рассматривают как нерациональное расходование средств.

В качестве альтернативного варианта представляется диффузионное насыщение дешевой углеродистой проволоки подходящими химическими элементами. Для этого подбирается состав насыщающей смеси, режим обработки в условиях печного нагрева [1]. Это позволяет изготовить ограниченную партию с нужным составом для формирования защитного покрытия на различной по площади поверхности.

Использование печного нагрева трудоемко и неэффективно. Для равномерного распределения легирующего элемента в поверхностном слое в продольном и поперечном направлении разрабатываются специальные контейнеры [2], конструктивное исполнение которых ограничивает длину обрабатываемого отрезка проволочного материала. Кроме того, для снижения вероятности скалывания сформированного слоя требуется последующая термическая обработка, позволяющая перераспределить легирующие элементы по объему.

Диффузионное насыщение путем непосредственного пропускания тока через изделие представляется альтернативным вариантом [3-4]. При реализации данного

технологического процесса обеспечивается сквозной нагрев проволочного материала за счет тепловой энергии протекающего по металлу электрического тока [5]. Для нагрева до требуемых температур требуется меньше времени по сравнению с обработкой в печи, так как отсутствует необходимость в предварительном прогреве используемого оборудования до температуры обработки. Это повышает производительность процесса диффузионного насыщения.

Методы

Для реализации способа диффузионного насыщения проволочного материала [6] нами была предложена установка [7], состоящая из трансформатора 1, устройства контроля физических параметров 2, соединенного с блоком управления, выполненного в виде твердотельного реле 3, соединенного с контроллером 4, подключенным к источнику питания 5 на 12 В, контейнера с насыщающей смесью 6, на противоположных концах которого расположены токоподводящие попарно сопрягаемые ролики 7, катушки с обрабатываемой стальной проволокой 8, барабана для обработанной проволоки 9, схема которой представлена на рисунке 1.

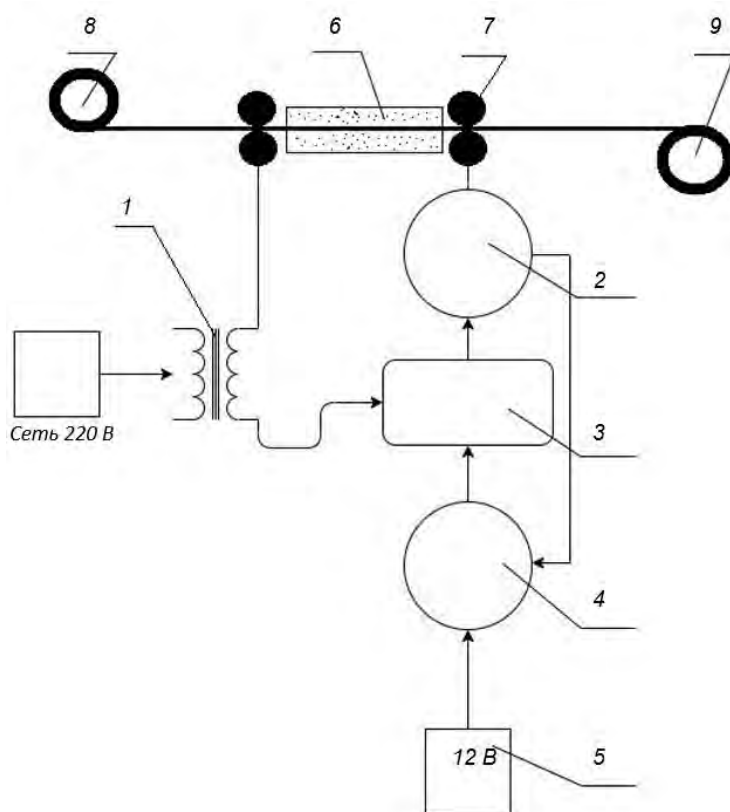


Рисунок 1 – Схема установки для диффузионного насыщения проволочного материала

Такое исполнение позволяет проконтролировать физические параметры процесса диффузионного насыщения проволочного материала и существенно расширяет возможности оборудования. Становится возможной реализация диффузионного насыщения стальной проволоки в режиме термоциклирования со ступенчатым изменением режима термического воздействия.

Порядок работы установки следующий: от размоточного механизма (на схеме не показан), включающего катушку с обрабатываемой стальной проволокой 8

необработанная стальная проволока проходит контейнер 6 с насыщающей смесью с заданной постоянной скоростью или подается ступенчато с заданным шагом в зону обработки. Трансформатор 1, работающий от сети 220 В, обеспечивает подачу тока на токоподводящие ролики 7. Контроллер 4, соединенный с твердотельным реле 3, работает от источника питания 5. Сила электрического тока, проходящего через опытный образец, и температура стальной проволоки контролируются с помощью устройства контроля физических параметров 2.

Термоциклирование обеспечивается парой твердотельное реле 3 – контроллер 4. Контроллер 4, работающий от источника питания 5, позволяет задать время нагрева и охлаждения образца во время обработки. При поступлении управляющего сигнала от контроллера 4 твердотельное реле 3 разрывает цепь. Испытуемый образец охлаждается. После завершения заданного времени охлаждения контроллер 4 отправляет сигнал на твердотельное реле 3. Цепь замыкается. Испытуемый образец начинает нагреваться. Цикл обработки повторяется. Опытный образец заявляемой установки изготовлен и опробован в научно-исследовательской лаборатории кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, внешний вид блока управления которой представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид блока управления установки для диффузионного насыщения проволоочного материала

Было проведено диффузионное насыщение проволоки СВ08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм бором, титаном и алюминием. Диффузионное насыщение проволоочного материала бором осуществляли в порошке ферробора ФБ 17 (FeB17) (17 % В) ГОСТ (14848-69) и смеси, состоящей из 99% В4С + 1% NaF, титаном – в порошке ферротитана ФТи 35 (35 % Ti) ГОСТ 4761-91, алюминием – в смеси, состоящей из оксида алюминия (Al₂O₃) и чистого алюминия (Al).

Металлографические исследования проволоочного материала проводили на шлифах, изготовленных в соответствии с ГОСТ 9.302. Использовали металлографический комплекс на базе микроскопа Nikon-Epiphot. Измерение микротвердости структурных составляющих проводили на микротвердомере IndentaMet 1106 (Викерс), с камерой UI-1540С, и управляющим компьютером в комплексе.

Результаты и обсуждение

Предложенная установка для диффузионного насыщения проволочного материала путем непосредственного пропускания электрического тока в режиме термоциклирования может использоваться для изготовления относительно недорогой проволоки по сравнению со сложнелегированным проволочным материалом и за значительно меньший период времени по сравнению с традиционным насыщением в печи (время нахождения каждого микрообъема металла проволоки в зоне диффузионного насыщения составляет 2...4 минуты вместо нескольких часов). Лабораторная установка не ограничивает длину обрабатываемого проволочного материала. Позволяет производить диффузионное насыщение проволочного материала путем ступенчатой и непрерывной подачи проволоки в зону обработки. Становится возможным непосредственное насыщение поверхностного слоя из порошковой среды и отжиг проволочного материала, подвергнутого диффузионному насыщению в специальном контейнере в условиях печного нагрева.

Твердотельное реле обеспечивает достаточную точность оказываемого температурного воздействия за счет высокой скорости переключения между режимами нагрева и охлаждения. Таким образом реализуется маятниковая схема нагрева/охлаждения без выдержки при максимальной и минимальной температуре. Устройство контроля физических параметров позволяет контролировать силу тока, проходящего через обрабатываемый проволочный материал.

Заключение

Применение сложнелегированной проволоки для формирования восстановительных и защитных покрытий не всегда экономически оправдано. Представляется актуальной замена дорогостоящего материала на более доступный проволочный материал, подвергнутый диффузионному насыщению путем непосредственного пропускания тока через изделие, при восстановлении или упрочнении дешевых малоресурсных деталей. Данная технология повышает производительность процесса. Позволяет получить проволочный материал с подходящим химическим составом. Такой проволочный материал может использоваться не только как присадочный материал при формировании защитного покрытия, но и как готовое изделие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boride hard-facing: United States Patent 4172162, C23F 7/00 – Ronald H. Smith; заявитель: Materials Development Corporation Заявл. Jun. 25, 1976, Оpubл. Oct. 23, 1979
2. Контейнер для химико-термической обработки проволоки: Патент на полезную модель РБ № 695В 21F 21/00 – В.М. Константинов, А.С. Губанов, Ф.И. Пантелеенко, М.В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № u20010301; Заявл. 19.12.01. Оpubл. 30.12.02.
3. Семенченко, М.В. Диффузионное насыщение стальной проволоки в условиях электроконтактного нагрева в режиме термоциклирования / М.В. Семенченко // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 32–4. С. 60–61.
4. Семенченко, М.В. Электроконтактный нагрев в режиме термоциклирования - перспективный способ получения экономно-легированной проволоки // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении Электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию

Полоцкого государственного университета. Полоцкий государственный университет; под. ред. В.К. Шелега; Н.Н. Попок . 2018. – С. 121–124.

5. Романов, Д.И. Электроконтактный нагрев металлов/ Д.И.Романов // 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1981. 168 с.

6. Способ диффузионного насыщения стальной проволоки: Патент на изобретения № 13370 МПК (2009) С 23С 8/00, С 23С 10/00, С 23D 1/34 – В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № а 20080742 заявл. 05.06.08., Опубл. 30.06.2010.

7. Установка для диффузионного насыщения стальной проволоки: заявка ВУ а 20220105 / М.В.Семенченко.

M.V. Semenchenko
Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,
Novopolotsk, m.semenchenko@psu.by

TECHNOLOGY OF DIFFUSION SATURATION OF WIRE MATERIAL BY DIRECT PASSING OF CURRENT THROUGH THE PRODUCT IN THE THERMAL CYCLING MODE

Abstract

The prospects of creating economically alloyed wire material of a certain chemical composition for the formation of protective coatings are noted. An installation for diffusion saturation of wire material by direct transmission of electric current through the product in the thermal cycling mode according to a pendulum scheme is proposed. A method of diffusion saturation of steel wire under conditions of electric contact heating in the mode of thermal cycling carried out according to a pendulum scheme is proposed, which allows to increase the productivity of the process compared with traditional processing in a furnace.

Keywords: Diffusion saturation, wire, thermal cycling, electric current transmission, installation.

Н.А. Феоктистов¹, В.М. Голод², Л.Ю. Добош², А.М. Барышникова¹

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия, fna87@mail.ru;

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ДЕНДРИТНО-ЗЕРНОВОЙ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТАЛИ 110Г13Л В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация

В работе рассмотрен процесс формирования литой структуры стали 110Г13Л. С использованием методов математической статистики проанализирована дендритно-зерновая структурная неоднородность, которая формируется в литых изделиях при различных скоростях охлаждения расплава в температурном интервале кристаллизации. На основе компьютерного анализа собранного массива микроструктурных данных проанализированы сопряжённые процессы формирования мезомасштабной дендритной и зерновой структур, для которых обосновано использование математического аппарата логнормального распределения для свертки экспериментальной информации с целью прогнозирования структурной эволюции в неравновесных условиях формирования литой структуры и оценки количественного соотношения размерных характеристик дендритных ветвей и зёрен аустенита.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, кристаллизация, скорость охлаждения, дендритная структура, аустенитные зёрна.

Введение

Сталь Гадфильда используется в качестве материала для производства деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания. Из неё изготавливают такие детали, как зуб ковша экскаватора, сменные части дробильно-размольного оборудования, крестовины железнодорожных переездов и многие другие. Широкое применение этой стали обусловлено повышенной износостойкостью под действием нагрузок ударного характера. Комплекс механических и эксплуатационных свойств определяется параметрами микроструктуры: размером зерна аустенита и его химическим составом. В процессе первичной кристаллизации происходит формирование дендритно-зерновой структуры отливки, количественные характеристики и неоднородность которой зависят как от температурно-временных условий процесса кристаллизации, так и от введения в расплав легирующих / модифицирующих добавок.

В настоящее время недостаточно изучены процессы совокупного формирования дендритной и зерновой структуры в условиях равновесной и неравновесной кристаллизации [1], понимание которых необходимо для прогнозирования параметров микроструктуры и их влияния на эксплуатационные свойства литых изделий. В работах [2-4] приведены результаты экспериментов, отражающих влияние скорости охлаждения расплава в литейной форме на размер зерна аустенита. Отмечено, что увеличение скорости охлаждения расплава в

интервале кристаллизации с 1,9 до 4,5 К/с приводит к сокращению среднего размера зерна аустенита в 2,0–2,5 раза.

Целью работы является изучение процесса мезомасштабной разветвленной дендритной кристаллизации, сопровождаемой формированием макроскопической зерновой структуры в течение всего периода выделения твердой фазы. Ключевой задачей работы является определение количественных характеристик неоднородности дендритно-зерновой структуры стали 110Г13Л, формирующейся при различных скоростях охлаждения.

Материалы и методика проведения экспериментов

В качестве объекта исследований была выбрана сталь марки 110Г13Л, химический состав которой регламентирован ГОСТ 977–88 (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемой стали

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Al
1,2	0,9	12,3	0,024	0,033	0,8	0,03	0,06

Для оценки влияния скорости охлаждения выбранного сплава на процессы структурообразования высокомарганцевую сталь заливали в различные по массе и габаритам формы с разными теплоаккумулирующими характеристиками при температуре 1490–1500 °С, что позволило получить образцы в широком диапазоне скоростей охлаждения (табл. 2). Регистрацию изменения температуры металла осуществляли с помощью заформованной вольфрам-ренийевой термопары, запись результатов проводили с использованием прибора LA-50USB с частотой 50 Гц на каждый канал с возможностью одновременной записи по 4 каналам.

Таблица 2 – Характеристики литейной формы и скорости охлаждения сплава в температурных интервалах кристаллизации и охлаждения

№ п/п	Тип формы / температура формы при заливке	Габариты отливки, мм	Скорость охлаждения (К/с) в температурном интервале	
			кристаллизации	выделения избыточных фаз
1	сухая ПГФ / 300°С	50×50×50	1,9	0,35
2	сухая ПГФ / 25°С	35×35×25	4,5	1,0
3	сухая ПГФ с холодильником / 25°С	35×35×25	8,9	1,8
4	сухая ПГФ с холодильником / 25°С	35×35×10	13,6	3,27
5	сырая ПГФ / 25°С	35×35×10	17,9	4,25
6	кокиль / 150°С	35×35×10	25,0	5,45

Исследование микроструктуры опытных сплавов

Определение размеров дендритно-зерновых структур и их количественный анализ выполнены на оптическом микроскопе Meiji с помощью программы ThixometStandartPro. Приготовление шлифа с запрессовкой образцов в смолу «Transoptic» проводили на автоматическом прессе Simplimet 1000 линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления дендритной структуры поверхность

шлифов подвергали травлению в реактиве Марбле (4 г CuSO_4 , 20 мл HCl , 20 мл H_2O). Для выявления зерновой структуры экспериментальные образцы травили в 4 % растворе азотной кислоты в этиловом спирте. После проведения лабораторных экспериментов была получена серия образцов, кристаллизация которых происходила при различных скоростях (от 1,9 до 25,0 К/с). Типичные примеры дендритной и зерновой структуры представлены на рис. 1.

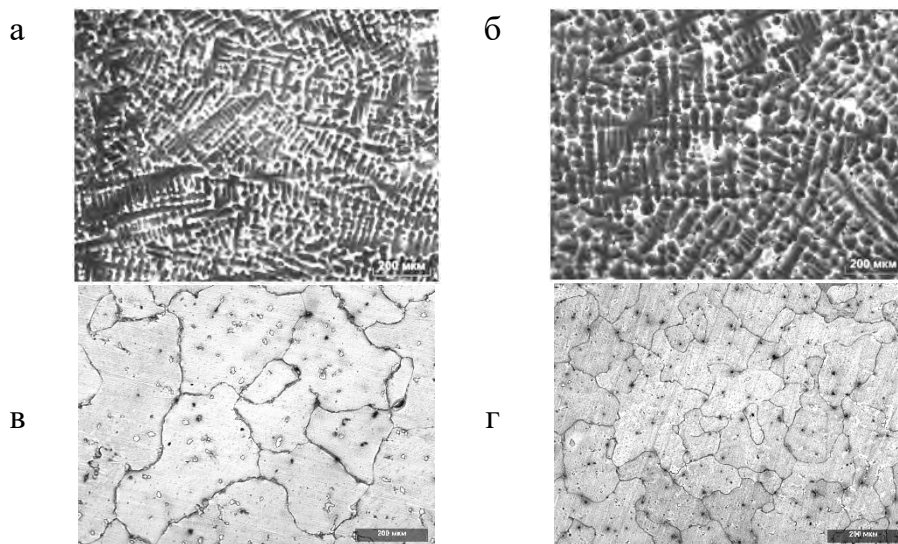


Рисунок 1 – Дендритная (а,б) и зерновая (в,г) структура при различных скоростях охлаждения стали 110Г13Л в температурном интервале кристаллизации
а, в – 1,9 К/с; б,г – 8,9 К/с

Методика статистического исследования и компьютерного моделирования дендритно-зерновой структуры

Исходная дендритная структура образцов, полученная в различных условиях затвердевания (табл. 2) и зафиксированная экспериментально на травленых шлифах, представлена совокупностью массивов, содержащих данные по величине λ_D вторичных междоузельных промежутков и размеров зерен λ_Z (около 300 измерений для каждого исследуемого образца). Они преобразованы программными средствами Excel в совокупность ячеек с возрастающим аргументом $X_{D,Z}$ (X_{min} , X_{cp} , X_{max}) и фиксированной относительной частотой $p(X)$. Для получения репрезентативной статистической информации на основе этих массивов сформирован раздел дендритных (X_D , Y_D , Z_D) и зерновых параметров (X_Z , Y_Z , Z_Z) и соответствующих точечных гистограмм (табл. 3, рис. 2), позволяющий наглядно оценить их взаимное различие.

Для подтверждения гипотезы о логнормальном характере исследуемых распределений $Z_D = \ln [(\lambda_2 / (\lambda_2)_{cp})_D]$ и $Z_Z = \ln [(\lambda_2 / (\lambda_2)_{cp})_Z]$ согласно критерию Хи-квадрат была выполнена оценка критического неравенства $\chi^2_{в} \leq (\chi^2)_{кр}$, которая для всех представленных массивов подтвердила справедливость выдвинутых требований (с доверительной вероятностью 0,95), что согласуется с данными табл. 3, а также сводными гистограммами на рис. 2, в и 2, е в пределах их пограничных эмпирических значений – для дендритной структуры $[-0,8 \leq Z_D \leq +0,8]_D$ и для зерновой структуры $[-2,0 \leq Z_Z \leq +2,0]_Z$.

Таблица 3 – Сводные экспериментальные параметры исследованных дендритных (D) и зерновых (Z) образцов

Дендритные образцы (D)									
Номер образца	$X_{D,Z}(\lambda, \text{мкм})$			$Y_{D,Z} = X_{D,Z} / \lambda^*_{\text{ср}}$			$Z_{D,Z} = \ln Y_{D,Z}$		
	λ_{\min}	$\lambda_{\text{ср}}$	λ_{\max}	Y_{\min}	$Y_{\text{ср}}$	Y_{\max}	Z_{\min}	$Z_{\text{ср}}$	Z_{\max}
1D(1,9)	23,9	68,1	121	0,64	1,81	3,22	-0,45	0,59	1,17
2D(4,5)	15,3	36,1	66,3	0,41	0,96	1,76	-0,90	-0,04	0,57
3D(8,9)	15,1	30,1	62,1	0,40	0,80	1,65	-0,92	-0,22	0,50
4D(13,6)	14,0	33,4	74,7	0,37	0,88	1,98	-0,99	-0,12	0,68
5D(17,9)	13,2	31,9	75,0	0,35	0,85	1,99	-1,05	-0,17	0,69
6D(25,0)	14,6	26,6	45,2	0,39	0,70	1,20	-0,95	-0,35	0,18
Среднее (λ^*)	16,0	37,7	74,2	0,42	1,00	1,97	-0,85	0,00	0,68
Зерновые образцы (Z)									
1Z(1,9)	26,8	231	1089	0,14	1,27	5,97	-1,92	0,24	1,79
2Z(4,5)	19,7	169	676	0,11	0,93	3,71	-2,22	-0,07	1,31
3Z(8,9)	20,6	158	919	0,11	0,87	5,04	-2,18	-0,14	1,62
4Z(13,6)	20,3	201	811	0,11	1,10	4,45	-2,20	0,09	1,49
5Z(17,9)	21,4	203	842	0,12	1,11	4,62	-2,14	0,11	1,53
6Z(25,0)	24,6	131	658	0,13	0,72	3,61	-2,01	-0,33	1,28
Среднее (λ^*)	22,2	182	832	0,12	1,00	4,56	-2,11	0,00	1,52

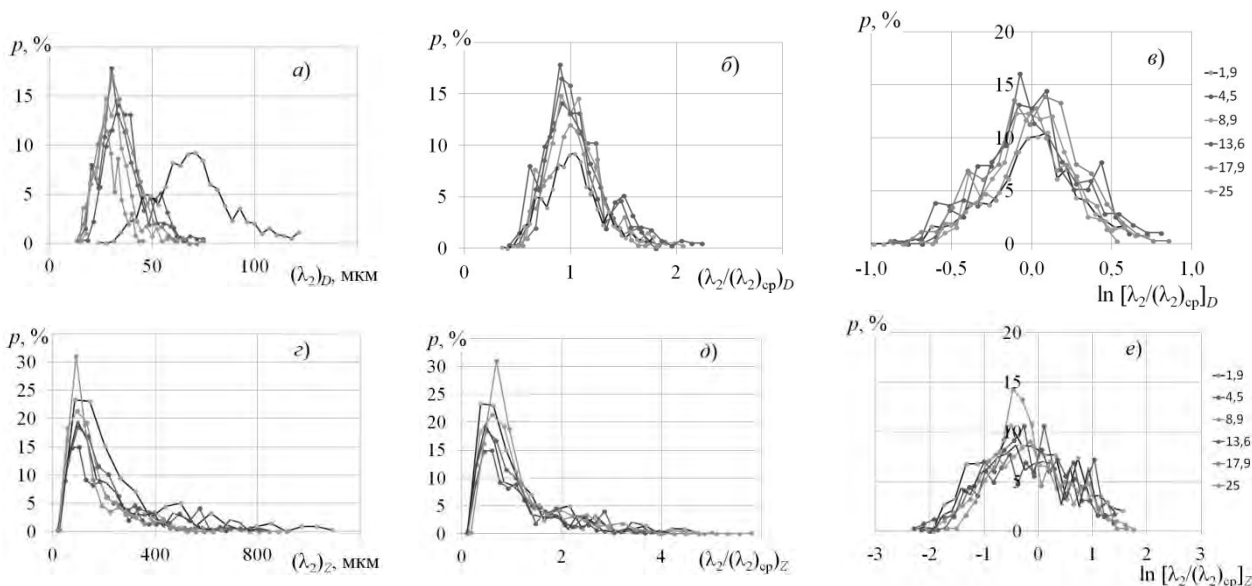


Рисунок 2 – Гистограммы частоты междуосных промежутков дендритов (a - $в$) и размеров зерен (z - $е$) сплава 110Г13Л в зависимости от скорости охлаждения при кристаллизации: (a , z) – для исходных значений $X_{D,Z}(\lambda_2)$; ($б$, $д$) – для относительных значений $Y_{D,Z}[(\lambda_2/(\lambda_2)_{\text{ср}})]_{D,Z}$; ($в$, $е$) – для логнормальных значений $Z_{D,Z} = \ln [(\lambda_2/(\lambda_2)_{\text{ср}})]_{D,Z}$

Это позволяет для количественной оценки плотности распределения дендритных и зерновых структурных параметров использовать ранее обоснованное на примере серии литейных сталей [5] трехпараметрическое уравнение:

$$f[z, \mu, \sigma] = \frac{1}{z\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где $z_i = \ln[\lambda\lambda_{cp}]$; μ, σ – среднее значение z_i и стандартное отклонение от среднего. Его результат дает расчетную величину P мезомасштабной частоты исследуемых параметров $f[z_i]$ в заданном интервале [$a=z_{min}$; $b=z_{max}$] на основе табличных значений интегральной функции $F(z)$ для нормального распределения:

$$P \{ a \leq z_i; z_i \leq b \} = F\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - F\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right), \quad (2)$$

а также при оценке доли исследуемых параметров, значения которых находятся в заданном интервале $\Delta X[\Delta\lambda]$, с целью количественной характеристики мезомасштабной структурной неоднородности при интегрировании уравнения (2) в интервале выборочных (экспериментальных) характеристик.

В процессе неравновесной кристаллизации сплава в объеме мезоэчейки сопряженно протекает ряд физико-химических процессов, ход которых системно определяется непрерывным изменением температуры, доли образующейся твердой фазы, состава жидкой фазы и увеличением размеров междоусных промежутков с учетом температурно-зависимых термодинамических параметров [6]. Эта эволюция дендритного мезомасштабного ансамбля в ходе коалесценции вторичных дендритных ветвей обобщенно отражается в изменении среднего размера междоусных промежутков, а также – сопутствующих размеров зерен:

$$\frac{d}{d\tau} [(\lambda_2)_{cp}]_D = \frac{1}{\varphi \sum_n \frac{p_i(C_L)_i(1-k_i)}{\Gamma_i(D_L)_i}}, \quad (3)$$

где τ – продолжительность кристаллизации; $(C_L)_i$ – концентрация i -го компонента в жидкой фазе n -компонентного сплава; Γ – коэффициент Гиббса-Томсона; k_i, p_i – коэффициент распределения и тангенс наклона ликвидуса i -го компонента; $(D_L)_i, (D_S)_i$ – коэффициенты диффузии компонентов в жидкой и твердой фазе; $\sigma_i = 2\alpha/(1+2\alpha)$ при $\alpha = 8(D_S)_i\tau_{LS}\lambda_2^2$ – параметр обратной диффузии, определяющий степень подавления диффузии в твердой фазе; τ_{LS} – время затвердевания сплава; φ – принятая для расчета модель коалесценции вторичных ветвей дендритов.

Полученная на основе уравнения (3) расчетная зависимость $[(\lambda_2)_{cp}](\tau)$ используется для вычисления безразмерных значений относительных $Y_{D,Z}$ и логнормальных $Z_{D,Z}$ параметров в сводных характеристиках гистограмм (рис. 2), а также при расчете согласно соотношению (2) мезомасштабной частоты P исследуемых параметров $f[z_i]$ с целью оценки неоднородности дендритной и зерновой структуры. Для расчета размаха минимальных $(\lambda_{D,Z})_{min}(m)$ и максимальных $(\lambda_{D,Z})_{max}(m)$ структурных параметров на основе полученных пограничных эмпирических значений $(Z_{D,Z})_{min}$ и $(Z_{D,Z})_{max}$ решаются системы уравнений:

$$(\lambda_{D,Z})_{min}(m) = \exp(-Z_{D,Z})_{min} * [(\lambda_2)_{cp}](m); \quad (4)$$

$$(\lambda_{D,Z})_{max}(m) = \exp(Z_{D,Z})_{max} * [(\lambda_2)_{cp}](m), \quad (5)$$

результаты которых непосредственно демонстрируют на рис. 3 асимметричный ход зависимостей максимального $(\lambda_{D,Z})_{max}(m)$ и минимального характера $(\lambda_{D,Z})_{min}(m)$ относительно средних значений $(\lambda_D)_{cp}$ и $(\lambda_Z)_{cp}$.

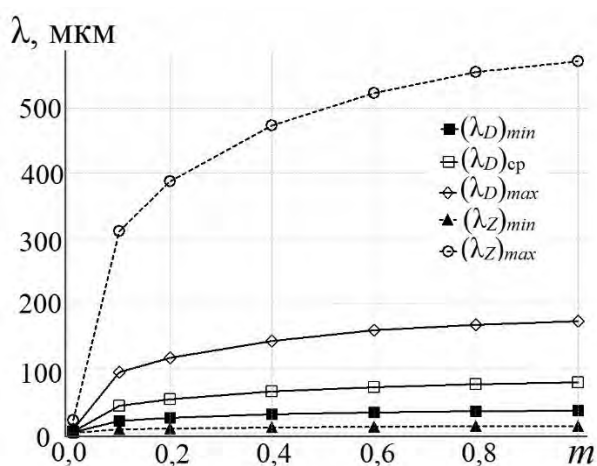


Рисунок 3 – Кинетика изменения минимальных $(\lambda_2)_{min}$, средних $(\lambda_2)_{cp}$ и максимальных $(\lambda_2)_{max}$ -параметров дендритной (λ_D) и зерновой (λ_Z) структуры в результате непрерывной коалесценции твердой фазы при кристаллизации сплава 110Г13Л

Системный анализ дендритно-зерновой структуры стали 110Г13Л в литом состоянии

Материалы проведенного исследования эволюции дендритно-зерновой структуры стали 110Г13Л при изменении условий кристаллизации, характеризующихся средней скоростью охлаждения исследованных образцов в песчано-глинистой, комбинированной и металлической форме в пределах от 1.9 до 25 К/с, содержат значительный объем информации, которая представляет мезомасштабные процессы формирования дендритной и зерновой структуры, практически не затронутые публикациями современной теории кристаллизации. В этой связи в работе реализовано комплексное исследование, объединяющее микроструктурную оценку регистрируемой дендритной и зерновой структуры с многоплановым компьютерным анализом полученных статистических данных и разработкой математических моделей, позволяющих дать количественную характеристику мезомасштабных (дендритных) и мезомасштабных (зерновых) условий для дендритно-зерновой структуры и последующего прогнозирования твердофазной структуры, от которой зависит качество получаемой отливки.

В результате проведенного исследования, включающего микроструктурную оценку ряда образцов различного вида, характеристика которых получена с использованием не менее 300 локальных измерений, реализована радикальная свертка экспериментальной информации на основе концепции логнормального характера взаимодействия компонентов дисперсной кристаллизующейся системы в ходе моделирования капиллярно-диффузионной коалесценции вторичных ветвей дендритов и зерновых образований. Адекватность полученных результатов моделирования взаимосвязанных этапов дендритно-зернового фазового превращения обеспечивается средствами разработанного программного и информационного обеспечения на основе осредненных неравновесных условий мезомасштабной системы кристаллизующегося сплава 110Г13Л в зависимости от интенсивности его охлаждения.

Впервые выполненное компьютерное моделирование формирования статистических дендритно-зерновых гистограмм, приведенных на рис. 2, непосредственно демонстрирует физико-химическое подобие сопряженных

процессов выделения твердой фазы, разделенных промежуточной микроскопической прослойкой жидкой фазы (толщиной 0,3–1,0 мкм [3]). Характеристики дендритно-зерновых агрегатов, эволюция которых выявлена с помощью микроскопического анализа (табл. 3, рис. 2) и его моделирования (рис. 3), подтверждают интенсивную зависимость их параметров от средней скорости охлаждения в пределах от 1,9 до 25,0 К/с: сокращение X_D и X_Z в 2,5 и 1,8 раза соответственно при значительном различии средних размеров образующейся твердой фазы (68-27 мкм и 230-130 мкм), а также коэффициентов асимметрии ($A_D \approx 0,69$ и $A_Z \approx 1,62$).

Логнормальное преобразование экспериментальных данных (рис. 2) позволяет условно (с отклонением среднего на 22-33%) подтвердить адекватность симметричного характера мезомасштабной дендритно-зерновой структуры [в пределах от (-0,85) до (+0,68) для дендритных и в пределах от (-2,11) до (+1,52) для зерновых параметров], что обусловлено использованием малого количества массивов контрольных данных. Эмпирический характер выбора пограничных значений $[-0,8 \leq Z_D \leq +0,8]_D$ и $[-2,0 \leq Z_Z \leq +2,0]_Z$, в пределах которых адекватны разработанные компьютерные модели (1) - (2) для дендритной и зерновой структуры, позволяет оценить расчетную вероятность интервального значения каждого логнормального массива $Z(\lambda_2)_{D,Z} = \ln[(\lambda_2/(\lambda_2)_{cp})]_{D,Z}$, являющегося индикатором дендритно-зерновой структурной неоднородности, а также эволюцию размаха минимальных $(\lambda_{D,Z})_{min}(m)$ и максимальных $(\lambda_{D,Z})_{max}(m)$ структурных параметров на основе использования уравнения (3).

Инструментальные средства совместного компьютерного моделирования процесса дендритно-зернового выделения твердой фазы сплава 110Г13Л позволяют анализировать развитие неоднородности структуры в ходе неравновесной мезомасштабной кристаллизации для заданных условий локальной интенсивности охлаждения и прогнозировать последующие твердофазные превращения с целью оптимизации получаемых деформационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurz, W. Progress in modeling solidification microstructure in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018 / W. Kurz, M. Rappaz, R. Trivedy // International Materials Reviews. [†] 2020. [‡] P. 30[†] 76.
2. Вдовин, К.Н. Влияние первичной структуры литой высокомарганцевой стали на ее свойства / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко // Материаловедение. – 2016. – Т. 870. – С. 339–344.
3. Вдовин, К.Н. Исследование закономерности формирования, морфологии и химического состава избыточной фазы в литой высокомарганцевистой стали / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, Н.А. Феоктистов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 7. – С. 491–497.
4. Вдовин, К.Н. Изучение влияния скорости охлаждения на механические и эксплуатационные свойства стали 110Г13Л / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, И.Б. Хренов и др. // Литейщик России. – 2015. – № 12. – С. 23–24.
5. Голод, В.М. Обобщенное уравнение мезомасштабного распределения вторичных междоузельных промежутков дендритов для стального литья / В.М. Голод, Д.К. Ле // Материаловедение. Энергетика. [†] 2020. [‡] Т.26. [‡] № 3. [‡] С. 101–116.

Б. Голод, В.М. Компьютерное моделирование и системная диагностика дендритной структуры многокомпонентных алюминиевых сплавов / В.М. Голод, Л.Ю. Добош // Литейное производство. † 2020. † № 9. † С. 40–47.

N.A. Feoktistov¹, V.M. Golod², L.Yu. Dobosh², A.M. Baryshnikova¹
¹Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov,

Magnitogorsk, Russia, fna87@mail.ru,

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

COMPUTER ANALYSIS OF DENDRITIC-GRAIN STRUCTURAL INHOMOGENEITY OF 110G13L STEEL DEPENDING ON COOLING CONDITIONS

Abstract

The paper considers the process of forming a cast structure of steel 110G13L. Using the methods of mathematical statistics, the dendritic-grain structural inhomogeneity, which is formed in cast products at different melt cooling rates in the crystallization temperature range, is analyzed. On the basis of computer analysis of the collected array of microstructural data, the conjugated processes of the formation of mesoscale dendritic and grain structures are analyzed. The use of the mathematical apparatus of the log-normal distribution for convolution of experimental information is justified in order to predict the structural evolution under nonequilibrium conditions for the formation of a cast structure and to estimate the quantitative ratio of the dimensional characteristics of dendritic branches and austenite grains.

Keywords: Hadfield steel, crystallization, cooling rate, dendritic structure, austenite grains.

Е.А. Фетисова, А.О. Коротеев, Н.М. Шукан
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»,
г. Могилёв, Республика Беларусь, fetisova9891@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ СИНТЕЗОМ С ВВЕДЕНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Аннотация

В работе рассмотрена аддитивная дуговая технология получения материала на основе алюминия на основе применения известных сварочных плавящихся присадочных материалов. Проведены исследования влияния модифицирования защитной газовой среды гексафторидом серы на состав и структуру полученного наплавленного металла.

Ключевые слова: аддитивные дуговые технологии, модификация защитной газовой атмосферы, гексафторид серы.

Введение

Современные материалы, применяемые для металлоконструкций в сварочном производстве, обладают достаточно сложными системами легирования и упрочнения. Необходимый уровень прочности как правило обеспечивается формированием требуемой микроструктуры. В то же время воздействие термического цикла сварки оказывает прямое влияние на характер изменений, происходящих в микроструктурном состоянии материала что ограничивает применение традиционных подходов и ограничивает применение дуговых технологий, в том числе для целей аддитивного синтеза изделий.

Прямая адаптация дуговых сварочных технологий для послойного синтеза изделий методом наплавки в ряде случаев оказывается неэффективной. В первую очередь это связано с тем, что процессы сварки и аддитивной наплавки при внешней схожести преследуют разные цели. Например, при сварке преимущественным является повышенная глубина проплавления и минимальный расход присадочного материала в условиях достаточно свободного существования сварочной ванны расплавленного металла, в то время как для аддитивного синтеза такие условия не позволяют контролировать жидкий металл в стесненных условиях торца наплаваемой стенки заготовки изделия. Различны и подходы к формированию химического состава и микроструктуры материала.

Развитие цифровых технологий управления сварочными источниками питания открывает новые возможности получения материалов с уникальными свойствами и требуемыми характеристиками. Как правило это основано на высокочастотном управлении значениями электрических параметров с целью стабилизации дугового промежутка и перехода жидкого металла через него в сварочную ванну. При этом подход к таким технологиям является полностью электротехническим и зачастую не учитывает металлургических особенностей протекания процессов. Кроме этого, эффективность применения сварочных технологий с цифровыми решениями сильно зависит от возможностей оборудования, а также его стоимости.

Перспективным способом управления механизмом формирования микроструктуры материала и комплекса его эксплуатационных свойств является модификация защитной атмосферы специальными газовыми компонентами, изменяющими характер протекания физико-металлургических процессов в зоне горения дуги и плавления присадочного материала. Этот подход является металлургическим и дополняет существующие способы управления сварочными процессами.

Методы

Результаты исследований были получены с использованием современного роботизированного комплекса Fanuc со сварочной комплектацией Fronius. В качестве газового модификатора защитной среды использовали гексафторид серы (SF_6). После серии наплавов был проведен оптико-эмиссионный анализ на установке Solaris GNRSCP. Для проведения металлографических исследований образцы подвергались обработке и подготовке согласно известным методикам с подбором необходимого реактива для травления. Механические испытания сварных соединений были проведены с использованием разрывной гидравлической машины РГМ 1000 1М.

Результаты и обсуждение

В сварочной практике модифицирование нашло широкое применение, так как с его помощью можно достичь измельчения микро- и макроструктуры материала, фазовых составляющих эвтектик, а также изменения размера и формы неметаллических включений, что в итоге влияет на работоспособность сварных соединений при эксплуатации. Существует несколько способов реализации такого подхода: ввод элементов-модификаторов непосредственно в расплавленный металл, физическое воздействие на процессы (регулирование температуры, электромагнитное перемешивание и др.), комбинированные способы [1].

В настоящее время широко используются элементы-модификаторы в виде нанодисперсных металлических и неметаллических порошков, которые в свою очередь имеют ряд достоинств и недостатков. В сварочных технологиях частицы-модификаторы используются в покрытиях электродов, в сварочных флюсах, вводятся в состав защитной газовой атмосферы путем специально-разработанных для этого установок. В то же время такой подход сложен в реализации и на практике применяется ограниченно.

В работе рассмотрена модификация защитной смеси на основе аргона ($\text{Ar}+\text{CO}_2$) газообразным галогенидным фторсодержащим соединением (SF_6). Такой выбор элемента-модификатора обоснован доступностью и нетоксичностью гексафторида серы в нормальных условиях. Кроме этого, фтор позволит снизить в сварных соединениях образование дефектов, которые вызваны повышенным содержанием в металле диффузионного водорода. Достигается такой эффект путем связывания F и H в процессе диссоциации гексафторида серы при высокотемпературном воздействии в зоне горения дуги в химически стойкое нерастворимое и ограниченно растворимые в жидком металле ванны соединения фтористого водорода (HF) [2].

Содержание серы в газообразной добавке в данном случае рассматривается, как возможность модифицирования основного металла для придания жидкотекучести материалу, что немаловажно в литейном производстве. Однако стоит учитывать тот фактор, что сера является вредной примесью в составе металлических сплавов, которая при избыточном содержании приводит к охрупчиванию материала. В связи с

этим, стоит особое внимание уделять количеству вводимого модификатора в состав защитной среды.

Для реализации исследований была разработана установка, позволяющая получать защитный газ $Ar + CO_2$ с его модификацией гексафторидом серы. Установка уникальна тем, что позволяет получить не только трехкомпонентный газ путем последовательного смешивания Ar , CO_2 и SF_6 , но и газ, содержащий в своем составе более трех компонентов. Кроме того, имеется возможность точного дозирования газов и введения их в процентном соотношении 0,1% [3].

По результатам исследований нами разработана дуговая аддитивная технология получения изделий с использованием плавящихся присадочных материалов в условиях модификации защитной газовой среды. Аддитивные технологии получения заготовок традиционными методами, например, селективным лазерным спеканием специальных порошков, обладают рядом положительных и отрицательных недостатков, таких как дорогостоящее оборудование, точность позиционирования лазерного луча и др. В предлагаемой дуговой технологии используются доступные в использовании оборудование и сварочные материалы, не требующие больших финансовых расходов. В качестве присадочных материалов использовалась сварочная проволока на основе алюминия с добавлением кремния.

Металлографические исследования показали, что характерной особенностью микроструктуры наплавки, выполненной по предлагаемой технологии, имеет измельченную структуру, а эвтектики алюминий-кремний располагаются по всему телу зерна, в отличие от микроструктуры изделий, полученных традиционным методом литья, в котором местом положения указанных эвтектик является граница зерен [4].

Результаты механических испытаний на статическое растяжение и статический изгиб показали, что механические свойства материала полностью соответствуют требованиям для изделий из аналогичных материалов. Применение разработанной технологии позволяет повысить значения прочности материала благодаря фиксации кремния в зерне алюминия.

Заключение

После проведения ряда исследований образцов, полученных по предлагаемой технологии, было установлено, что благодаря минимальному разогреву основного металла и возможностью управления скоростью охлаждения наплавки можно получать новые материалы с контролируемым микроструктурным состоянием и требуемыми механическими свойствами с применением известных сварочных проволок, что является важным и перспективным направлением при создании изделий в различных отраслях промышленности и медицине требующих уникальных свойств при их эксплуатации. Применение разработанной установки для получения многокомпонентной защитной атмосферы позволит дозированно с высокой точностью вводить газообразные элементы-модификаторы в наплавляемый металл при использовании дуговых аддитивных технологий в нужном составе и процентном соотношении, что является немаловажным для получения материалов с требуемыми свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, М.А. К вопросу применения нанодисперсных модификаторов для управления кристаллизацией сварочной ванны / М.А. Кузнецов, Е.А. Зернин, А.В.

Игошев //Иновации в машиностроении: сборник трудов Международной молодежной конференции / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – с.249–251.

2. Фетисова, Е.А. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке с модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями / Е.А. Фетисова, А.О. Коротеев, А.А. Коротеева // Вестн. Белорус. –Рос. ун-та. – 2022. – № 1. – с. 87–96.

3. Фетисова, Е.А. Установка для смешивания трехкомпонентной защитной газовой среды при сварке / Е. А. Фетисова, Н. А. Шукан, А. А. Коротеева // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы межд. науч. техн. конф. Молодых ученых. / Могилев: «Белорусско-Российский университет». 2022. – с. 88.

4. Коротеев, А.О. Технология аддитивного синтеза изделий из алюминиевых сплавов с функциональным градиентом химического состава и механических свойств / А.О. Коротеев // Восьмой Белорусский космический конгресс: материалы конгресса в 2 т. / Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – с.111–115.

К.А. Fiatsisava, A.O. Karatseyeu, M.M. Shukan
Inter-State Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University»,
Mogilev, Republic of Belarus, fetisova9891@gmail.com

PRODUCTION OF MATERIALS BY ARC ADDITIVE SYNTHESIS WITH THE INTRODUCTION OF MODIFYING COMPONENTS

Abstract

The paper considers an additive arc technology for obtaining an aluminum-based material based on the use of known consumable welding filler materials. Studies of the effect of modification of the protective gaseous medium with sulfur hexafluoride on the composition and structure of the deposited metal obtained have been carried out.

Keywords: additive arc technologies, modification of protective gas atmosphere, sulfur hexafluoride.

О.В. Швецов¹, Т.А. Жужгина², Е.Э. Михайлова², С.А. Вологжанина²
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия,
²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
zhyzhginata@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Аннотация

Сварка ТВЧ в современных условиях является более выгодной, чем широко распространенная дуговая сварка под флюсом, поэтому была рассмотрена возможная замена этих видов сварки. В данной работе были исследованы образцы двутавровых балок из марки стали Ст3, сваренные методом ТВЧ. Изучили макро и микроструктуру образцов, полученных из различных зон сварного соединения, оценили наличие дефектов, измерили твердость, проанализировали результаты спектрального анализа дефектных зон. Цель работы заключается в оценке качества сварных соединений балок, изготовленных методом сварки ТВЧ.

Ключевые слова: сварка, микроструктуры, двутавровые балки, сталь Ст3, сварка токами высокой частоты.

Введение

Сварная двутавровая балка – один из наиболее распространённых видов продукции, используемых в строительстве.

По сравнению с обычными процессами высокочастотная сварка выполняется чрезвычайно быстро и не требует сварочных расходных материалов. Двутавровые профили могут быть изготовлены из трех пластин, сваренных вместе двумя швами. Используя обычный процесс сварки, три пластины соединяются четырьмя сварными швами с закруглением или частичным проникновением, по два на каждом пересечении полотна и фланца [1, 2].

Известно, что сварные швы ТВЧ имеют количество дефектов меньше, чем швы плавления, а также у первого типа ниже подвод тепла, что приводит к незначительному искажению заготовки и уменьшению зон теплового воздействия [3-5]. Стоит отметить, что скорость ТВЧ сварки на порядок превосходит обычные процессы.

В данном исследовании предлагается рассмотреть структуру и свойства сварных конструкций, выполненных сваркой ТВЧ.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются образцы из сварных двутавровых балок из стали Ст3, фотография которых представлена на рисунке 1:

- 1) Балка №1 сварка по методу ТВЧ толщина стойки 4 мм толщина полки 6 мм;
- 2) Балка №2 сварка по методу ТВЧ толщина стойки 6 мм толщина полки 9 мм.

После подготовки образцов к исследованию на микроскопе были рассмотрены зоны основного металла и термического влияния, а также сварной шов. Дефекты оценивали с учетом работы [6].

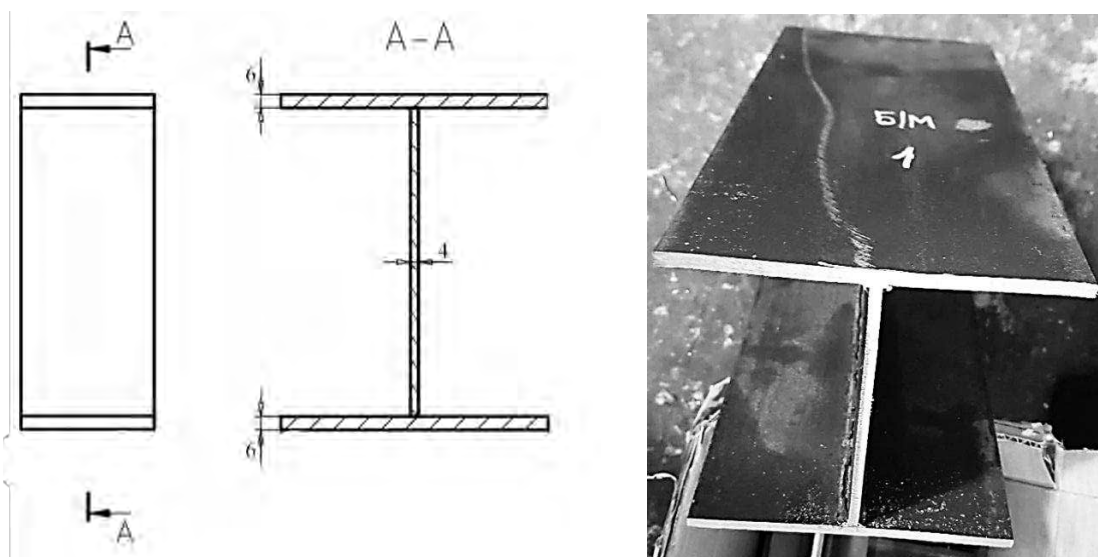


Рисунок 1 – Образец из стали Ст3

Химический состав марки стали Ст3 в соответствии с ГОСТ 380–2005 представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав в % материала Ст3

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	As
0,14 - 0,22	0,15 - 0,3	0,4 - 0,65	до 0,05	до 0,05	до 0,3	до 0,3	до 0,3	до 0,08

Исследование микроструктуры проводили методами оптической микроскопии. Для анализа макро и микроструктуры стали использовали микроскоп *Reichert Jung MeF-3A*. Микроскоп оснащен камерой *Leica DFC 450* и работает с программным обеспечением *Leica LEScore* версии 4. Используется для наблюдения за металлическими образцами и имеет максимальное 500-кратное увеличение.

Измерение микротвердости производилось вдоль одной прямой с шагом 1 мм по 8 – 10 измерений, а также в отдельных зонах, таких как: зона рекристаллизации, зона основного металла (стойка и полка), зона шва и другие.

Измерения проводили микротвердомером *Reichert Jung MICRO-DUROMAT 4000 E* с помощью четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием.

Результаты и обсуждение

Производилось двустороннее тавровое соединение балок. Такое соединение осуществляется между главной и второстепенной несущими двутавровыми балками каркасной конструкции, находящимися на одном уровне. В этом соединении главная балка служит опорой второстепенной.

Сварное соединение ТВЧ можно разделить на четыре зоны, которые показаны на рисунке 2.

При исследовании структуры основного металла были выделены две зоны: стойка и полка.

Структура полки образца № 1, изображенная на рисунке 3, представляет собой ферритно-перлитную смесь с равномерным соотношением зерен так же, как и структура стойки, но значение твердости у последней меньше в связи с различием в химическом составе.

Структура полки образца № 2 также содержит феррит и перлит, но по фотографиям видно явное преобладание феррита.

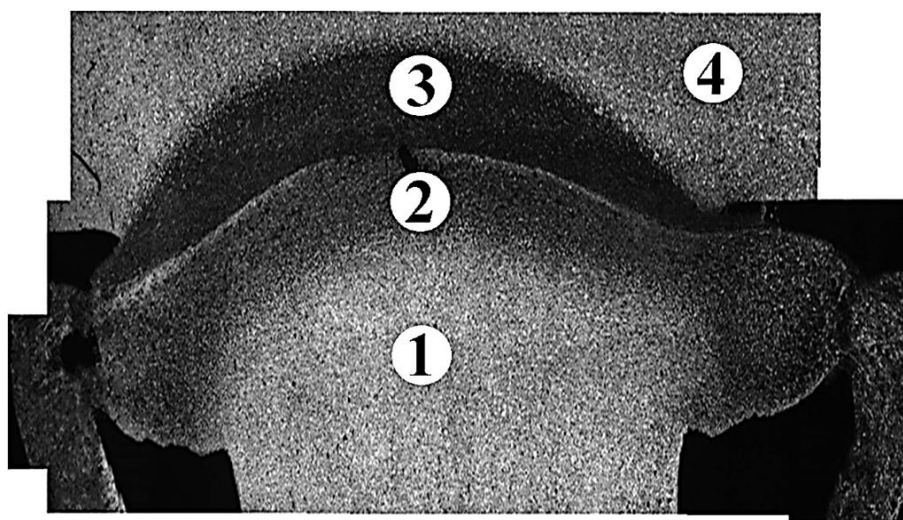


Рисунок 2 – Зоны исследования: 1 – основной металл стойки; 2 – светлая дуга, 3 – тёмная дуга; 4 – основной металл полки

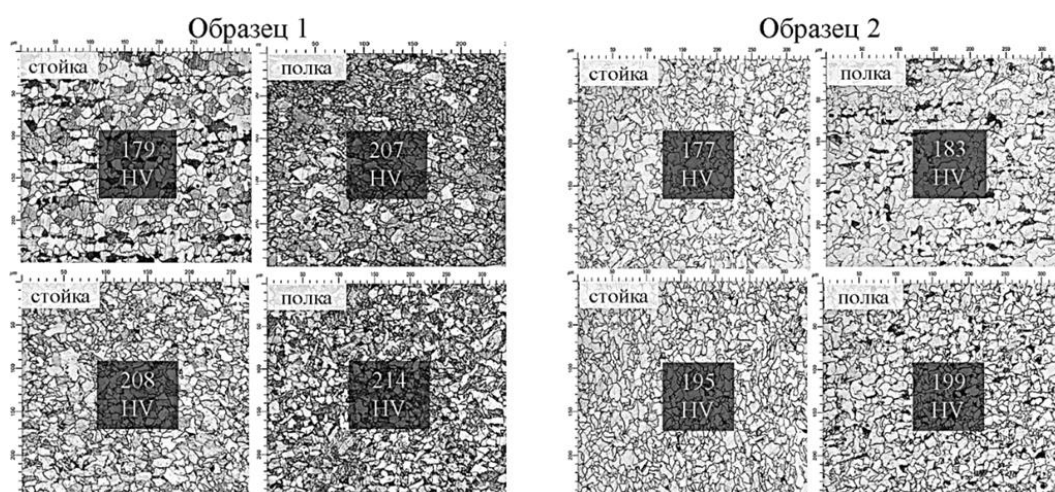


Рисунок 3 – Оценка микроструктуры основного металла и микротвердости стойки и полки образцов 1 и 2

Особенностью сварки ТВЧ является наличие двух зон: светлой и темной дуг, которые представлены на рисунке 4. Структура светлой дуги состоит из зоны перекристаллизации с мелким размером зерна. Темная дуга представляет из себя закалочную зону с высоким значением твердости.

При оценке твердости выявили, что твердость различных участков сварного шва колеблется от 198 *HV* до 485 *HV* (таблица 2). Такое неравномерное распределение твердости может оказывать негативное влияние на эксплуатационные свойства.

Многие дефекты, такие как оксидные включения, поры, микротрещины и ликвации, были обнаружены как в зоне основного металла, так и в сварном шве. Они показаны на рисунке 5.

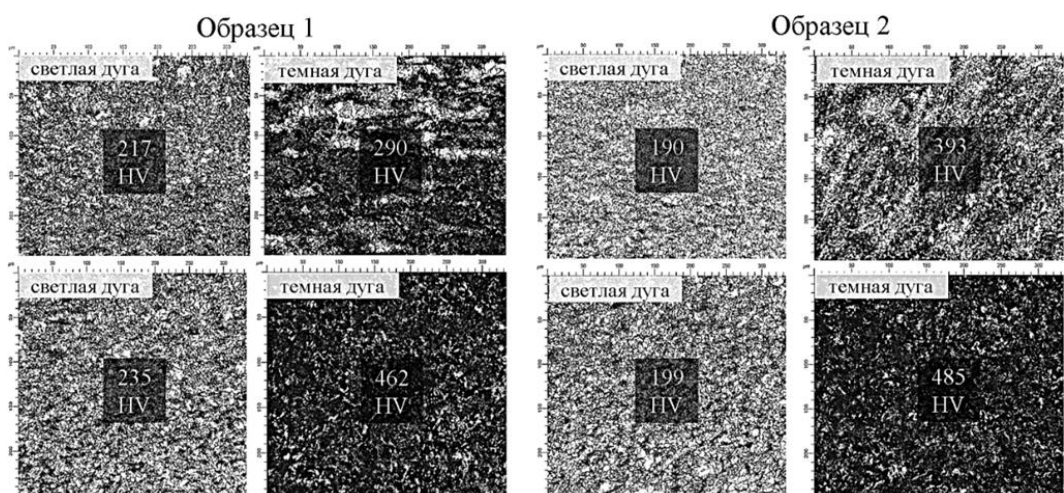


Рисунок 4 – Оценка микроструктуры и микротвердости светлой и темной дуги

Таблица 2 – Значения твердости по зонам исследования

	Твердость по Виккерсу, <i>HV</i>			
	Зона стойки	Зона полки	Светлая дуга	Темная дуга
Образец №1	179	207	217	290
	208	214	235	462
Образец №2	177	183	198	393
	195	199	199	485

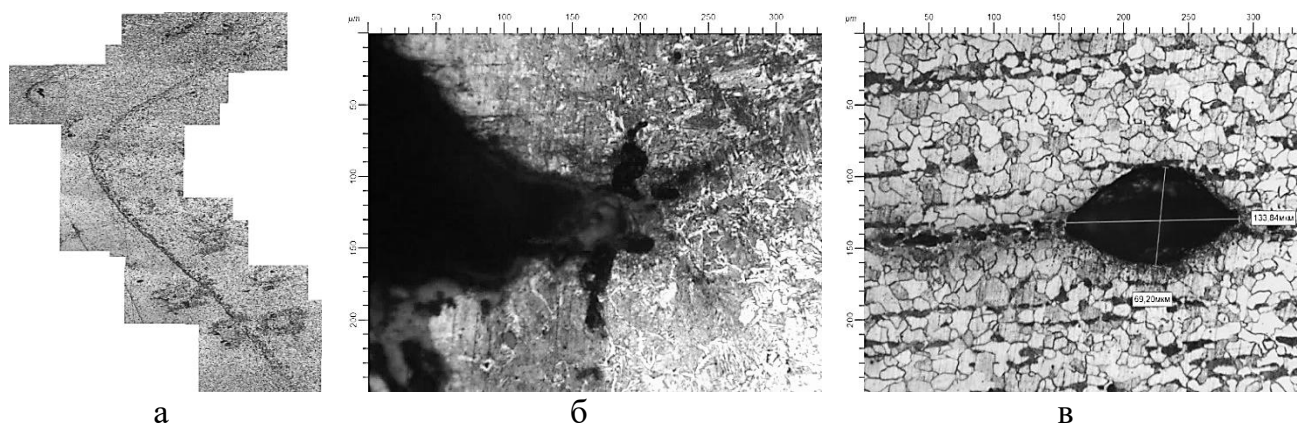


Рисунок 5 – Обнаруженные дефекты:
а) ликвация, б) дефект сварки, в) оксидные включения

Следует обратить внимание на тот факт, что дефекты типа пор были обнаружены не только в зоне сварного соединения, но и в основном металле балки, что указывает на низкое качество исходных заготовок.

Для определения химического состава дефектных зон применялся атомно-эмиссионный спектральный анализ.

В зоне «ушей» образца №1 были выбраны 3 спектра, которые показаны на рисунке 6, и исследованы их химические составы, представленные в таблице 3. Видно, что в отмеченных зонах содержится большое количество оксидов железа, которое в последствии может привести к протеканию коррозионных процессов и разрушению.

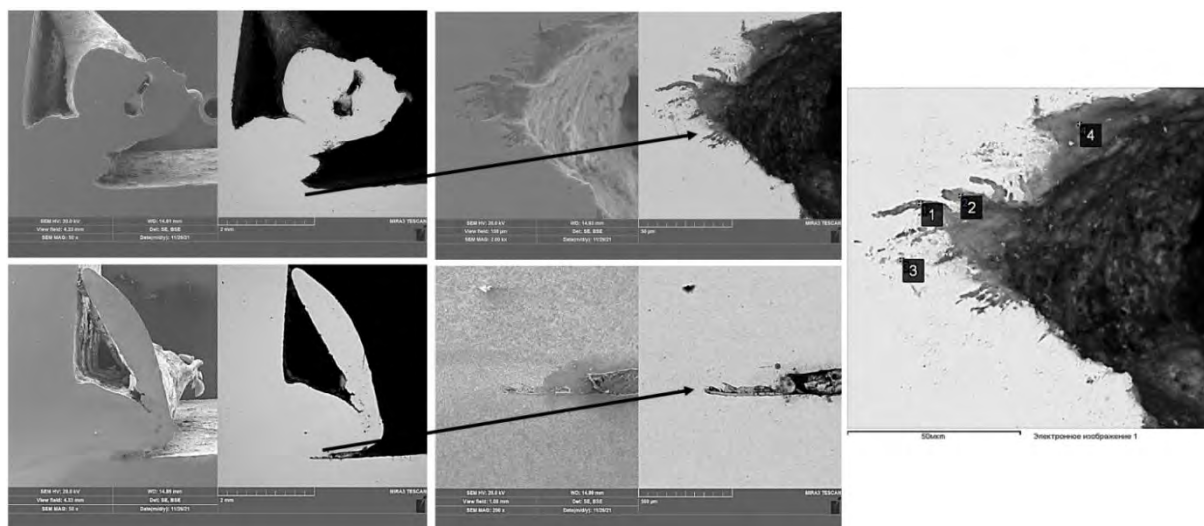


Рисунок 6 – Зоны исследований

Таблица 3 – Химический состав выбранных спектров

Спектр	O	Si	S	Ca	Mn	Fe	Итого
1	38,54	0,70		0,23	0,84	59,50	100,00
2	37,29		0,28		0,82	61,61	100,00
3	20,18	0,32	0,21		0,58	78,72	100,00
4	46,68	0,30	0,45	0,28	0,41	51,00	100,00
Макс.	46,68	0,70	0,45	0,28	0,84	78,72	

Заключение

1. В ходе визуально-измерительного контроля обнаружены дефекты сварных швов – микротрещины, поры, подрезы и несплавления;

2. При анализе микроструктуры балок ТВЧ установлено:

- Структура сварного соединения типична для сварки ТВЧ. В зоне термического влияния сварных швов обнаружены зоны повышенной твёрдости. Причем в образце №2 твердость закаленной зоны значительно превышает допустимый уровень.

- В зоне сварного шва обнаружены многочисленные дефекты, что указывает на недостаточно качественную подготовку свариваемых зон и обнаружено не соответствие технологии сварки;

- Также в основном металле балок обнаружены крупные неметаллические включения и поры, что указывает на низкое качество исходных металлических заготовок.

3. На основании проведенных исследований установлено, что для получения качественных сварных соединений обоих типов балок необходимо провести дополнительные исследования и на предприятии осуществить корректировку режимов сварки.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

1. Couchaux, M., Vyhlás, V., Kanyilmaz, A. Passing-through I-beam-to-CHS column joints made by laser cutting technology: Experimental tests and design model // Journal of Constructional Steel Research. – 2021. – V. 176. – P. 106298 DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106298

2. Jármai, K., Petrik, M. Optimization of asymmetric I-beams for minimum welding shrinkage // Pollack Periodica. – 2021. – V. 16. – I. 3. – P. 39–44.

DOI: 10.1556/606.2021.00363

3. Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Р.А. Соколов, В.Ф. Новиков, К.Р. Муратов, А.Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 93–110. – DOI: 10.17212/1994–6309-2021-23.4-93–110

4. Особенности формирования микроструктуры в сварных соединениях труб при высокочастотной сварке и последующей локальной термической обработке / О.А. Багмет, П.П. Степанов, О.С. Хлыбов, Л.И. Эфрон, С.В. Жарков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2022. – Т. 78, № 2. – С. 135–149. - DOI: 10.32339/0135-5910-2022-2-135-149

5. Иванов, В.Н., Гуревич, С.Г., Будкин, Г.В. / Исследование процесса высокочастотной сварки на численных моделях // Металлообработка – 2007. – № 2 (2). – С. 15–18. – ISSN: 2076–3840

6. Пашков, Ю.И., Lupin, В.А., Иванов, М.А. / Разработка классификатора дефектов для сварных труб // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия – 2012. – № 15 (274). – С. 37–40. – ISSN: 1990–8482

O.V. Shvetsov¹, T.A. Zhuzhgina², E.E. Mikhaylova², S.A. Vologzhanina²,
¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
²Sankt – St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia,
zhyzhginata@yandex.ru

INVESTIGATION OF ZONES OF WELDED JOINTS

Abstract

HDPE welding in modern conditions is more profitable than the widespread submerged arc welding, therefore, a possible replacement of these types of welding was considered. In this work, samples of I-beams made of steel grade St3, welded by the HDPE method, were studied. The macro and microstructure of samples obtained from various zones of the welded joint were studied, the presence of defects was assessed, hardness was measured, and the results of spectral analysis of defective zones were analyzed. The purpose of the work is to compare the quality of beams made by HDPE welding and argon arc submerged welding.

Keywords: welding, microstructures, I-beams, Ст3 steel, welding with high frequency currents.

Д.Н. Юманов, С.М. Фурманов
Межгосударственное образовательное учреждение
высшего образования «Белорусско-Российский университет»,
Могилев, Республика Беларусь, oitsp.dmitriy.u@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ Т-ОБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОЩНОСТЬЮ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ

Аннотация

На предприятиях машиностроительного комплекса Республики Беларусь сталкиваются с проблемой получения качественного Т-образного сварного соединения, получаемого контактной рельефной сваркой. В работе рассмотрена технология контактной рельефной сварки Т-образных сварных соединений из низкоуглеродистых конструкционных сталей с применением способа программного управления мощностью тепловложения в зону сварного соединения взамен серийно-выпускаемого оборудования для управления процессом контактной сварки. По результатам проведенных исследований удалось стабилизировать прочностные характеристики Т-образных сварных соединений путем использования разработанного оборудования для управления процессом контактной рельефной сварки.

Ключевые слова: контактная рельефная сварка, Т-образные соединения, оборудование для управления процессом сварки, перемещение подвижного электрода при сварке.

Введение

Обеспечение требуемого качества и механических свойств Т-образных сварных соединений, получаемых контактной рельефной сваркой, является актуальной задачей. Это связано с тем, что в нормативно-технической документации и справочниках отсутствует информация о рекомендуемых параметрах режима сварки Т-образных соединений в зависимости от геометрических особенностей рельефа. На производстве пользуются универсальными методиками определения и корректировке параметров режима контактной сварки, основанных на уравнении теплового баланса. Однако, применение этих методик не всегда позволяет обеспечить требуемый уровень прочностных характеристик сварного соединения, так как не берутся во внимание геометрические особенности привариваемых рельефных элементов, а пользуются стандартными формулами для определения областей нагрева. Как следствие, применение параметров режима по этим расчетным методикам приводит к низкому качеству Т-образных сварных соединений. На производстве нередко наблюдается замена способа контактной рельефной сварки на механизированную дуговую сварку в среде защитных газов для получения Т-образного соединения требуемого качества, что приводит к повышению себестоимости и трудоемкости и не всегда является рациональным. На основании проведенных исследований, авторами данной работы предлагается технология контактной рельефной сварки Т-образных соединений с программным управлением мощностью тепловложения, которая позволяет получать сварные соединения требуемого качества.

применением серийного оборудования для управления процессом сварки (регулятор сварочных процессов РКС-801) и с применением системы программного управления мощностью тепловложения (рисунок 2). При сварке на серийном оборудовании управления процессом сварки в 40...60% случаев наблюдается интенсивный выплеск расплавленного металла, что приводит к снижению механических свойств сварных соединений (рисунок 2, 1). Применение разработанной системы позволило стабилизировать процесс сварки и тем самым избежать появления интенсивных выплесков расплавленного металла. Сварные соединения были получены на тех же режимах сварки, что и образцы Т-образных соединений с использованием серийного оборудования для управления процессом. В этом случае требуемые механические свойства сварных соединений обеспечиваются в более 90% (рисунок 2, 2) [2].

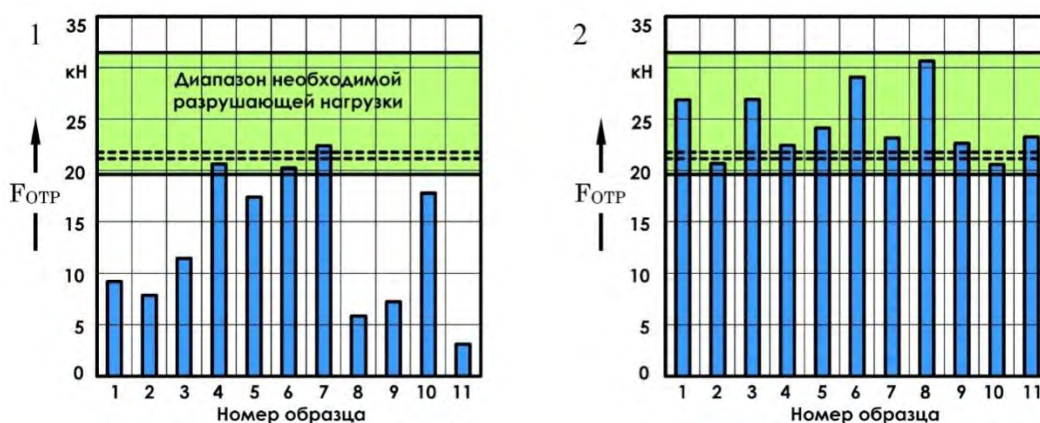


Рисунок 2 – Результаты механических испытаний Т-образных сварных соединений: 1 – с применением серийного оборудования управления процессом; 2 – с применением системы программного управления

На рисунке 3 показаны результаты металлографических исследований Т-образных сварных соединений, полученных при помощи серийного оборудования управления процессом (рисунок 3, 1), а также сварные соединения, полученные с использованием разработанной системы программного управления (рисунок 3, 2) [3].

При сварке на серийном оборудовании управления процессом, наблюдается отсутствие общей литой зоны соединения металла пластины и металла винта М8. Это связано с тем, что достаточно большой объем расплавленного металла удаляется из зоны соединения вместе с выплеском. По проведенному макроисследованию определено, что в большинстве случаев наблюдается дефект в виде несплавления по всему контакту сварного соединения. Повышение сварочного тока, или времени его протекания приводит к более интенсивному разогреву контакта, однако, дефект в сварном Т-образном соединении наблюдается.

Результатом применения системы программного управления, является стабилизация и плавность протекания процесса сварки. В этом случае весь расплавленный металл остается в зоне сварного соединения, что формирует благоприятную структуру общих зерен металла пластины и привариваемого винта М8. По результатам проведенных металлографических исследований установлено, что дефектов Т-образных сварных соединений возможно избежать путем применения плавного вложения энергии в зону соединения, тем самым обеспечить более мягкий разогрев металла.

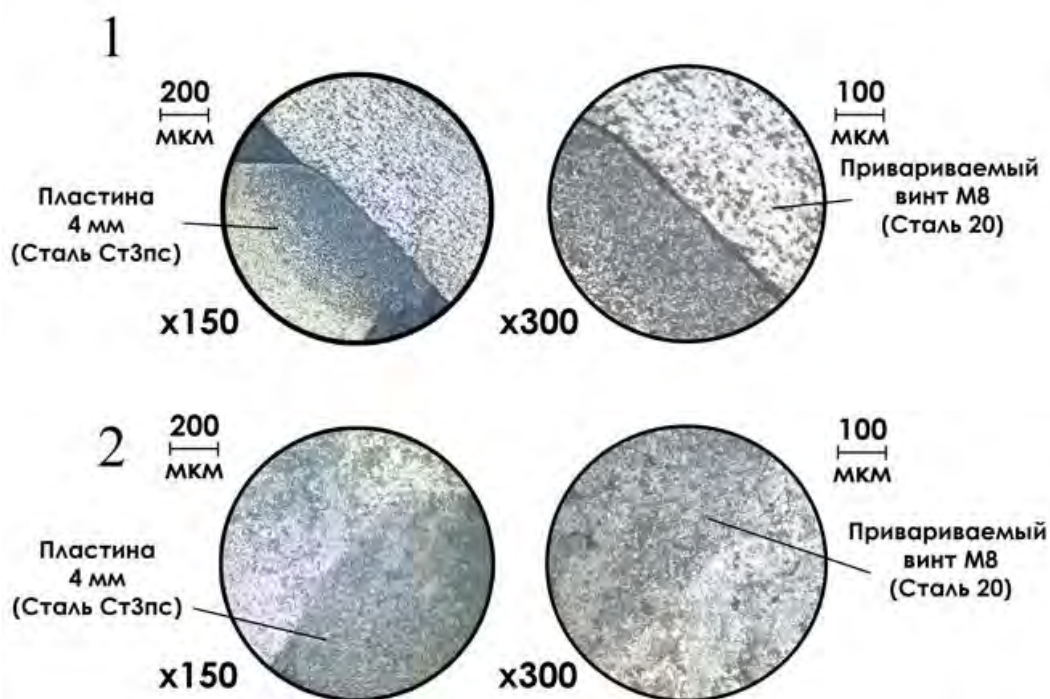


Рисунок 3 – Металлографические исследования сварных соединений, полученных контактной рельефной сваркой: 1 – дефект при сварке с серийным оборудованием управления процессом; 2 – структура металла сварного соединения при применении системы программного управления

Таким образом, подтверждено при помощи методов неразрушающего контроля, что разработанная система программного управления значительно повышает качество Т-образных сварных соединений, получаемых контактной рельефной сваркой.

Заключение

В ходе проведенных исследований разработана и экспериментально апробирована технология контактной рельефной сварки Т-образных соединений с применением системы программного управления мощностью тепловложения. Разработанная технология внедрена в промышленное производство при получении сварных Т-образных соединений, заменяя более дорогостоящий способ механизированной дуговой сварки в защитных газах. Как показали экспериментальные исследования, применение системы программного управления позволило избежать дефектов Т-образных сварных соединений, а также повысить их механические свойства. На основе проведенных экспериментальных исследований показано, что разработанную технологию сварки и оборудование для управления процессом эффективно применять.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурманов С. М. Компьютерное управление процессом контактной сварки с помощью среды графического программирования LabView / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, И. Д. Камчицкая, И. Н. Смоляр // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 54–62.

2. Юманов, Д. Н. О влиянии параметров режима контактной рельефной сварки с программным управлением мощностью тепловложения на стабильность

прочностных показателей соединений / Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов, И. Н. Смоляр, И. Д. Камчицкая, А. О. Коротеев // Вестник Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 3. – С. 118–128.

3. Фурманов, С. М. О влиянии энергии тепловложения на ширину линии сплавления Т-образных соединений при рельефной сварке с программным управлением / С. М. Фурманов, Д. И. Якубович, Д. Н. Юманов, Л. С. Малашенко, И. А. Наумовец // Вестник Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 4. – С. 88–95.

D.N. Yumanov, S.M. Furmanov
Inter-State Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University»,
Mogilev, Republic of Belarus, oitsp.dmitriy.y@gmail.com

TECHNOLOGY OF RESISTANCE PROJECTION WELDING OF T-JOINTS WITH HEAT INPUT PROGRAMMED CONTROL

Abstract

The companies of the machine-building complex of the Republic of Belarus face the problem of obtaining a high-quality T-joints produced by resistance projection welding. The paper considers the technology of resistance projection welding of T-joints made of low-carbon structural steels using a method of heat input software control into the welded joint zone instead of mass-produced equipment for controlling the process of resistance projection welding. According to the results of the conducted research, it was possible to stabilize the strength characteristics of T-joints by using the developed equipment for controlling the process of resistance projection welding.

Keywords: resistance projection welding, T-joints, equipment for controlling the resistance projection welding cycle, displacement of the movable electrode during the welding.

K. Hamouda¹, B. Boudali², M.A. Djema², D. Saidi³, S. Bouti²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,
hamoudakhaled_2000@yahoo.fr

²University of sciences and technology, Bab Ezzouar, Algeria

³polytechnic national schools, Algeria

PROCESS FOR SURFACE TREATMENT BY GRANULAR VIBRO-IMPACT

Abstract

Surface quality can be increased by the introduction of new technological processes, such as vibration surface finishing which causes surface plastic deformation of granular flexible particles. Recently, these procedures have become useful and reliable at various stages of production when high surface quality is needed. This work proposes an experimental model that can be used for hardening and surface finishing with granular flexible particles. This leads to increased quality of surface layers in tested samples. The model allows representing each factor as a function of initial data which are material properties and control parameters at processing. These relations give an initial guess for the optimal control parameters. During mass production, the process of surface finishing and hardening treatment of granular dough pieces is carried out. It should be noted that the processing is based on the plastic deformation of a thin surface.

Keywords: surface finishing, granular vibro-impact

Introduction

The main objective of this work is the reduction of friction and minimizing wear to avoid this loss of material by raising the properties of nanomaterial on the surface layer. One of the key elements that have a great impact on the reliability of a mechanical system is the quality of surface parts in contact, which are moving or stationary. Thus, the current state of production of machined parts requires improving the quality of their surface for optimal exploitation of their properties. This technique of vibro-impact is a method of chemical mechanical processing of gradual strengthening of the surface that uses the technology of low-frequency vibration [1]. The abrasive media and chemical additives are used and have a great influence on the mechanical and geometrical properties of treated surfaces.

Objective of the study

This study aims to improve the mechanical characteristics of surface state by the method of the Vibro-impact characterized by:

-The impact of the shock wave in the presence of abrasive media and chemical additives

-The mechanism of formation of surface layer during the vibro-impact treatment.

Thus the method of the physical phenomena of vibro-abrasion [2], are characterized by the set of Micro-impacts received by the parts from the media at different angles giving them a surface uniformity by eliminating the elementary particles from the surface (micromachining) causing plastic deformation. The movement of the assembly (parts-media-water-additives) in the working chamber creates the variable acceleration during the

process with the following parameters: a) The velocity and acceleration; b) the force of the impact; c) the contact pressure and stresses; d) temperature.

The impact of parts and media velocity in the chamber is determined by the empirical formula [3]:

$$V_p = V_{ch} \times K_v \quad (1)$$

Where $K_v = a^L \approx 0.9877^L$: the coefficient of the loss of speed depending on the distance L of the particles to the walls of the working chamber. According to the trajectory of the circular motion, the velocity of the particles of the working chamber is:

$$V_{ch} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, \text{ with } (V_x = A\omega \sin \omega t; V_y = A\omega \cos \omega t) \quad (2)$$

$$a = A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

and the acceleration of the impact of particles is determined by:

The impact strength of the particles depends on the oscillation system and the characteristics of the particles [4].

a) For treatment of fixed parts:

$$F_{pf} = 6 \sqrt{\frac{m \cup^2 \sigma_s k_m k_g}{k_2} \left(1 - \frac{3}{8} k^2\right)} \quad (4)$$

b) For treatment of free parts:

$$F_{pl} = 6 \sqrt{\frac{m \cup^2 \sigma_s R_b k_m k_g}{k_2} B} \quad (5)$$

Where m is the mass of the particles, R_b the radius of the ball, σ_s : The yield strength of the material of the work pieces. k_m , k_g , k_2 and k are the process parameters. B is the coefficient, which determines the amount of impact energy, and the displacement of parts freely loaded.

The contact pressure in the region of the impact is characterized by the equation (6):

$$P_{g_{max}} = \frac{3 F_{pl}}{2 \pi a b} \quad (6)$$

Where: a, b: dimensions of the half-axes of the contact surface. In general the impact surface is circular, in this case $a = b = 0.677(Fdb)^{1/3}$, with d_b the ball diameter.

The collision energy [4] could be determinate by the above equation (7):

$$E_y = \frac{HBd^4}{6d_b} = 1.25 \times 10^{-6} d^{*4} \quad (7)$$

The average temperature in the region of micro-impacts [5] is given by equation (8):

$$T = \frac{2m_1 \cdot V_p^2 R(1 - K^2)K_m \cdot K_g}{427 \cdot 24C_T \mu r} \quad (8)$$

Where C_T is the specific, heat capacity; γ the density; n the coefficient of performance; R and r the radii of the particles and indentations respectively.

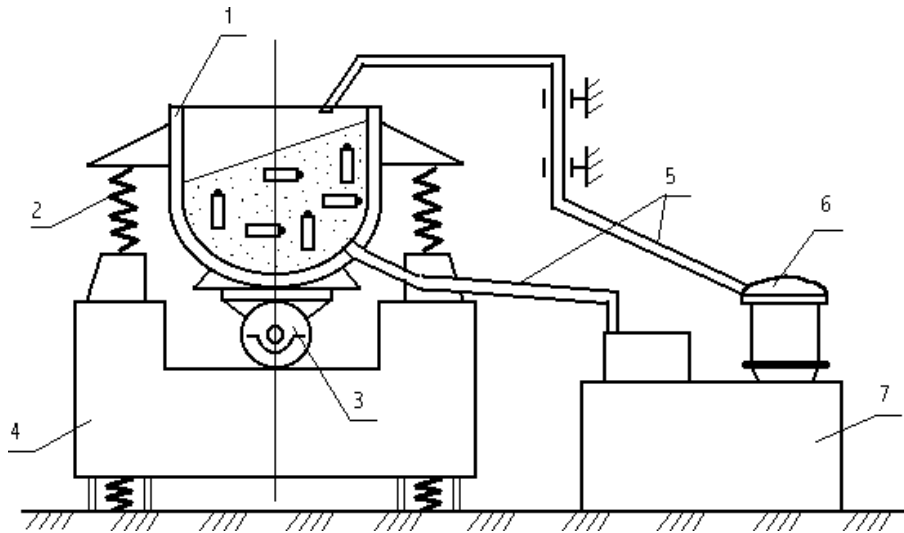


Figure 1 – the diagram of the machine tool for vsp
 1 - the working chamber, 2 – an elastic element, 3 - the vibrator, 4 - basis,
 5 - hoses for supply and plum of a technological liquid, 6 - a pump,
 7 - a tank a sediment bowl

Experiment Methods

The sample and the active medium are subjected to a vibratory motion and a slow rotation motion giving a constant acceleration [6]. Therefore, the samples take various positions in the active medium and thus receive many micro-impacts in all directions allowing a uniform treatment over its entire surface. The chemical additive is intended to improve the intensity of the treatment, the surface quality and also plays a role of lubricant [7].

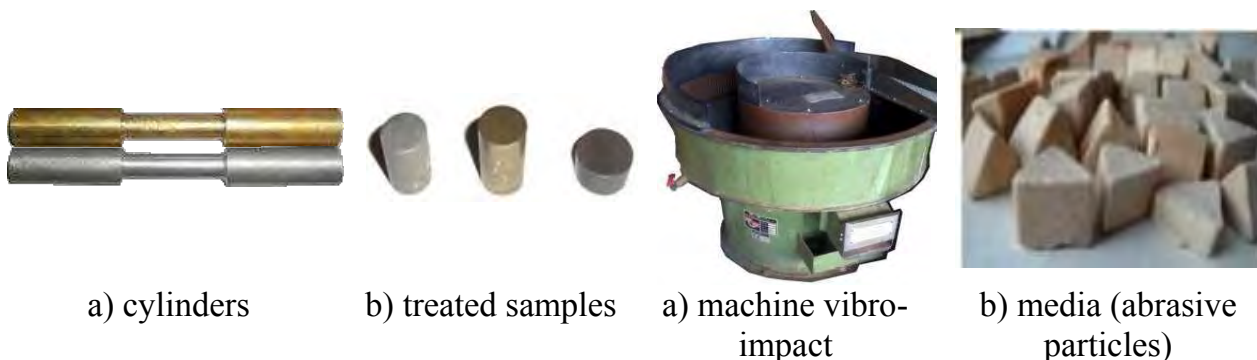


Figure 2

The materials used for the tests are samples from XC48 steel (C45), aluminum alloy AlCu4MgSi (AU4G) and copper alloy (bronze) UE7Z5Pb4. The working environment uses

a ceramic abrasive tool in form of the triangular shape, the amplitude and frequency of vibration are respectively $A = 5\text{mm}$ and $f = 50\text{Hz}$.

Results and Analysis

The tests are conducted over periods of 60, 120 and 180 minutes without chemical additives. Some of the samples underwent two additional tests during 30 minutes, one with chemical additive followed by another test on a spiral machine.

Figure 3 describes the variation of the roughness of the surface layer for different treated materials with and without chemical additives.

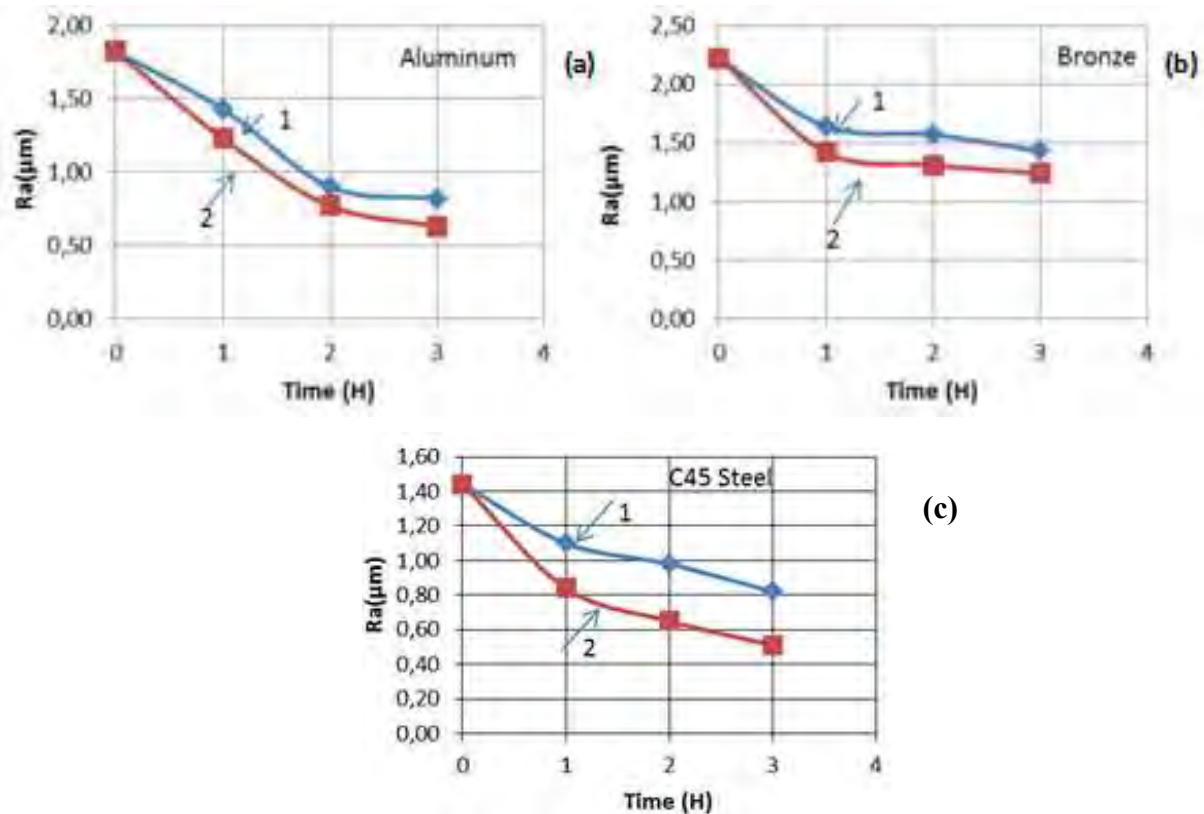


Figure 3 - Variation of the roughness of the surface layer for different treated materials with the processing time (1: without chemical additives, 2: with chemical additives); (a) Aluminum; (b) Bronze; (c) C45 steel

The abrasion removes the peaks due to the continuity of friction, which leads to an improvement of the surface of the treated parts reducing the micro cracks. These micro cracks can be the source of initiation of failure by fatigue (cyclic loads). It is noted that when the treatment duration increases during the vibro-impact process, the roughness is decreased, with and without chemical additives. The surface state of treated parts is more improved when using the chemical additives.

Figure 4 shows the variation of hardness as a function of processing time for each treated materials (Aluminum; Bronze; C45 steel) with and without chemical additives. During the impact of media, the surface layer undergoes the plastic deformation due to apparition and moving of dislocation. When the density of dislocation increases, the compact planes are blocked which cause a strain hardening. It is seen that the hardness of surface layer for each treated material increases with the processing time.

Figure 5 gives the evolution of tensile strength as a function of processing time with and without chemical additives for aluminum and copper alloys treated by vibro-impact process

The materials used for the tests are samples from XC48 steel (C45), aluminum alloy AlCu4MgSi (AU4G) and copper alloy (bronze) UE7Z5Pb4. The working environment uses a ceramic abrasive tool in form of the triangular shape, the amplitude and frequency of vibration are respectively $A = 5\text{mm}$ and $f = 50\text{Hz}$.

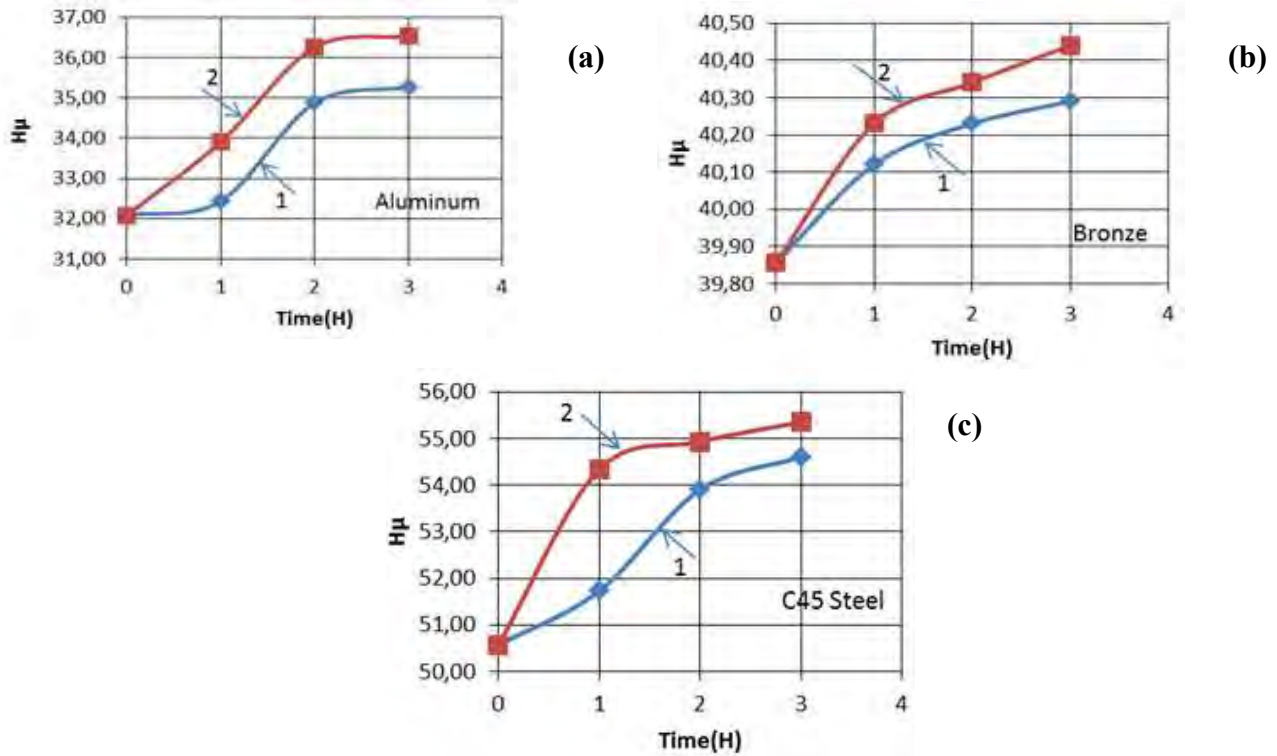


Figure 4 - Change in hardness of the surface layer of treated materials with processing time (1: without chemical additives, 2: with chemical additives).

(a) Aluminum; (b) Bronze; (c) C45 steel

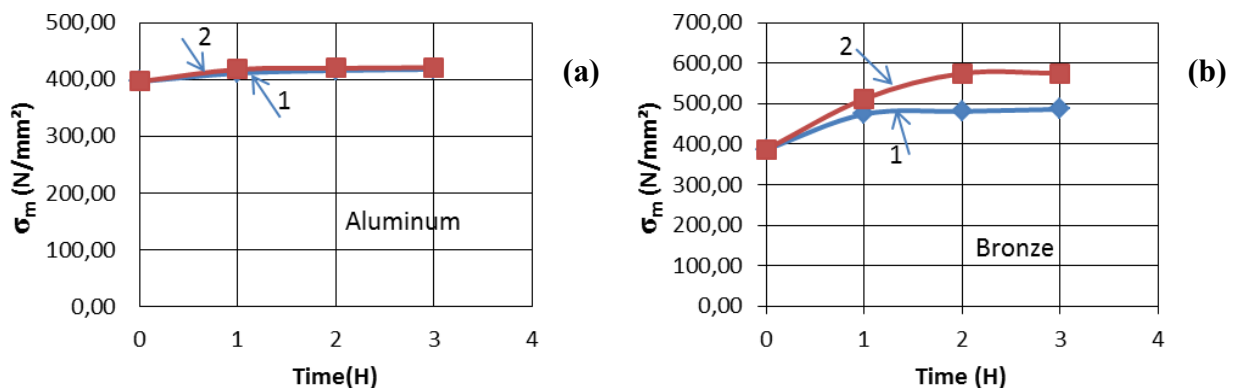


Figure 5 - Variation in tensile strength of the treated materials with the processing time (1: without chemical additives, 2: with chemical additives); (a) Aluminum; (b) Bronze.

The repeated shocks during the vibro-impact process lead to the plastic deformation-giving rise to the hardening phenomenon (also called consolidation phenomenon). This treatment improves the surface state of treated materials and their properties. From figure 5, it is noticed that the tensile strength increases up to about 2 hours of treatment the value of

tensile strength is almost constant. Figure 6 gives the optical micrographs of treated and no treated surfaces of different materials. From Figure 6, the microstructure of no treated C45 steel is a mixture of pearlite and ferritic before the vibro-impact process. After the treatment, we obtain the martensitic phase.

The microstructure of aluminum alloy after the vibro-impact process is modified. The grains are initially spherical and become elongated (lamellar).

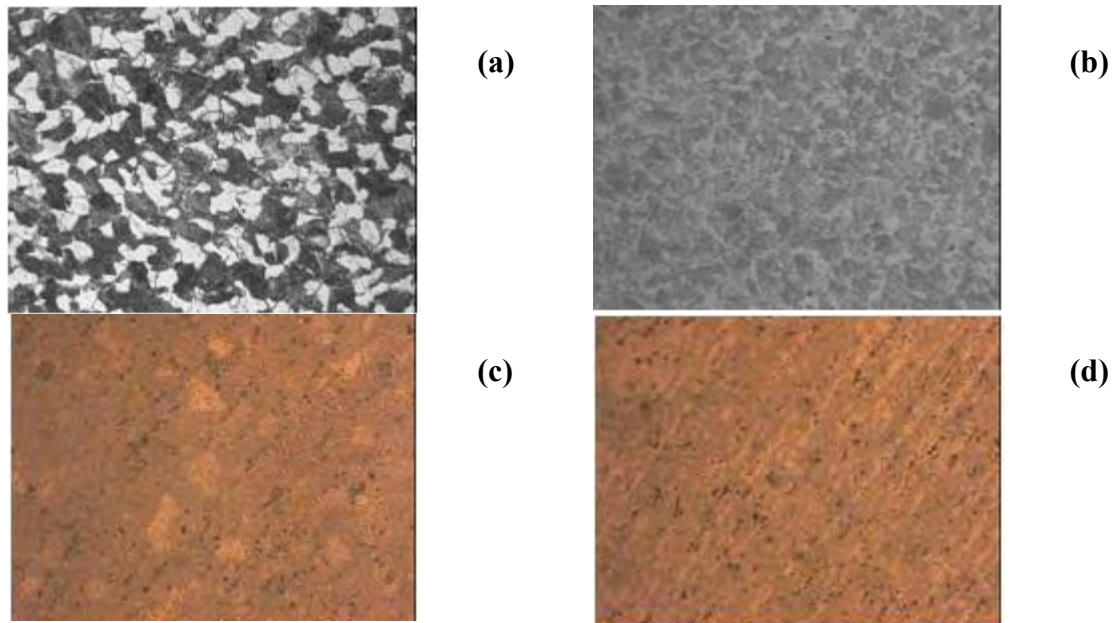


Figure 6 - Optical images of the treated surfaces of materials before and after the vibro-impact process: (a) C45 steel before vibro-impact process; (b) C45 steel after vibro-impact process; (c) Aluminum before vibro-impact process; (d) Aluminum after vibro-impact process

Conclusion

In the process of vibro-impact process in the surface layer formed by relieving the residual stresses with a maximum at the surface. This is explained by the nature of the contact and shears deformation of the surface layer and relatively low temperatures in the zone of collision did not cause relaxation of residual stresses. This distribution characteristic of residual stress enhances endurance limit of parts. The vibro-impact process has a significant impact on the quality of the surface layer and on the fatigue strength of surfaces parts. In this work, the vibro-impact process was used to improve the surface quality of treated materials (Al alloy, Cu alloy, and C45 steel). The concluding points can be drawn from this work as follows:

The roughness of treated surfaces of different materials varied with the processing time. It decreased with an increase in the processing time. It is noticed best surface state.

The hardness of treated surfaces increased with the processing time. It is due to the hardening phenomenon observed after the vibro-impact treatment.

The microstructures of treated surfaces were affected by the vibro-impact treatment.

The tensile strength also increased with the treatment time.

The vibro-impact treatment reduced the roughness and improved the surface quality of treated materials because the roughness contains the micro-cracks, which cause a failure initiation by fatigue due to the cyclic loads.

REFERENCES

1. A.P. Babichev, I.A. Babichev, Fundamentals of vibration technology: Rostov on Don: Publishing Center DGTU, 1999 – 621 p.
2. Y.R. Kopylov, Vibration impact hardening: Monograph - Voronezh: Voronezh Institute of Ministry of Internal Affairs of Russia, 1999 – 386 p.
3. V.O. Trilissky, The centrifugal rotary processing components / NII mash, M., 1983 – 53 p.
4. V.V. Panchurin, Strengthening process gear transport cars by centrifugal rotary manner, 1989.- 243 p.
5. A.P. Babichev, P.D. Matrenko et al.: Finishing-hardening treatment details by multi- vibro impact-tool, Rostov on Don, DSTU, 2003, p. 191.
6. A.P. Babichev, M.D.Motrenko, Operations of vibration technology to improve the surface quality and mechanical properties, Rostov on Don, Russia; ISBN 57890-0390-7; 2006.
7. V.V.Petrosov, Hardening of parts and tools. MA, Mechanical Engineering, 1977 – 166 p. A.P.
8. A.P.Babichev, I.A.Babichev; Principle of Vibration Technology; Rostov-sw-Don Russia; ISBN 978-5-7890-0472-2; 2008.
9. J.J.Milan; Tribology Science and technology of friction, wear and lubrication; 2004.

Х. Хамуда¹, Б. Будади², М.А. Джема², Д. Саиди³, С. Бути²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, hamoudakhaled_2000@yahoo.fr

²Университет наук и технологий, Баб-Эз-Зуар, Алжир

³Политехническая национальная школа, Алжир

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ С ПОМОЩЬЮ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ГИБКИХ ЧАСТИЦ

Аннотация

Улучшение качества продукции затруднено внедрением новых процессов, таких как обработка поверхности вибрацией, что приведет к поверхностной пластической деформации гранулированными гибкими частицами. В последнее время эти процедуры стали полезными и надежными на различных этапах производства, когда требуется высокое качество поверхности. Настоящая работа посвящена экспериментальной модели, которая может быть использована для упрочнения и обработки поверхности гранулированными гибкими частицами. Это приводит к повышению качества поверхностного слоя испытываемых образцов. Модель позволяет представить каждый показатель как функцию настройки исходных данных, которыми являются свойства материала и управляющие параметры процесса. Эти соотношения служат начальным шагом для определения оптимальных параметров процесса. Во время серийного производства выполняется процесс отделки поверхности и упрочняющей обработки гранулированных тестовых деталей. Следует отметить, что обработка основана на пластической деформации тонкой поверхности.

Ключевые слова: финишная обработка поверхностей, вибрационная установка, гранулированные гибкие частицы

Д.В. Амяга¹, С.А. Вологжанина², В.О. Волох²,
Р.М. Хузнахметов², А. Рамос Веласкес³, А.Ф. Иголкин³

¹ООО «Лазерный Центр», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫПУКЛОГО РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация

В работе рассмотрены методы лазерной обработки поверхности образца из стали Ст3 для получения выпуклой маркировки: за один проход для получения линейного рельефа, однопроводная для нанесения шрифта Брайля, а также лазерная накатка. Установлено влияние параметров лазерной обработки изменения в поверхностном слое металлического изделия.

Ключевые слова: лазерная обработка, маломощный лазер, выпуклый рельеф.

Введение

Использование лазерного излучения широко применяется в различных технологических процессах, в том числе при различных видах маркировки поверхности стальных изделий, в том числе для получения заданного вида рельефа [1-8]. Маркировка применяется на всех этапах жизненного цикла как изделия, так и отдельных его составляющих, позволяя, в частности, оценивать причины брака. Кроме того, маркировка позволяет идентифицировать оригинальность изделия.

Цель данной работы – рассмотрение видов обработки, позволяющих получить выпуклый рельеф на поверхности стальных изделий различного назначения с помощью маломощного лазера.

Материалы и методы

Для исследования выбраны стали марок Ст3сп и 12Х18Н10Т. Для получения рельефа на поверхности использовали маломощный лазер системы TurboMarker фирмы ООО «Лазерный Центр». Оценку полученного рельефа проводили методами оптической микроскопии. Изображения были получены применением цифровой камеры Mars1300-60gc, и с использованием шкалы микроскопа ЛОМО МСП-1. Погрешность измерения линейных размеров шкалы микроскопа составляла 10 мкм. Исследование макроструктуры и микроструктуры рельефа выполняли на шлифах без травления и после травления.

Результаты и обсуждение

Получение линейного рельефа на поверхности стали в рамках одного прохода

Установлено, что образование канавки и бокового валика, состоящего из переплавленного материала основы и грата, может быть получено при обеспечении движения лазерного луча по трохоиде [1]. Использование поперечных шлифов позволило произвести детальный анализ рельефа (рисунок 1), в результате чего полученный линейный профиль назвали N-форма. Последующие исследования были

направлены на оценку влияния параметров лазерной обработки на конфигурацию и стабильность получаемой N-структуры.

N-структуры дополнительно обрабатывались специальной очисткой до блеска на той же лазерной системе, а улучшения визуализации добивались применением бокового света. Оказалось, что получаемая в таком случае тень позволяет не только оценить глубину канавки и высоту валиков, но и их устойчивость. Чистящие режимы применяли для удаления оксидов после основной обработки и получения слегка оплавленной поверхности. На рисунке 2 источник света расположен слева.

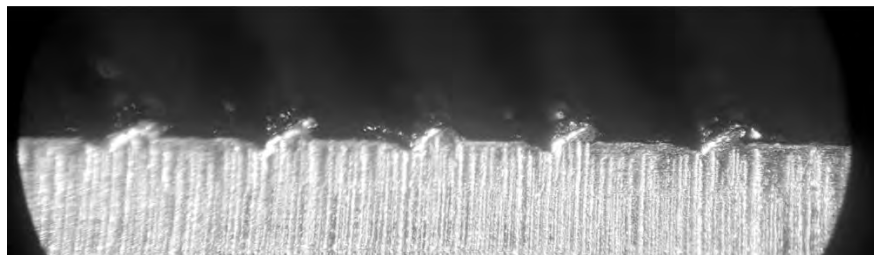


Рисунок 1 – N-образные канавки на поверхности стали.
Вид поперечного сечения [1]

Проведенные исследования показали, что увеличение глубины канавки и высоты валика, сопровождающиеся уменьшением ширины канавки, может быть обеспечено снижением скорости сканирования с 300 до 150 мм/с.

При скорости 100 мм/с канавка схлопывается из-за перемещения валика ближе к центру канавки, а высота валика снижается (рисунок 2, а). Кроме того, увеличение глубины канавки и высоты валика может быть достигнуто варьированием расстояния между петлями от 5 до 15 мкм. При дальнейшем увеличении расстояния между петлями от 15 до 25 мкм, наоборот, может приводить к уменьшению глубины канавки и ее схлопыванию (рисунок 2, б). При этом, если изменять ширину или высоту трохойды от 0,3 мм до 0,4 мм, возможно получение большей глубины канавки и высоты валика. Если же дальше увеличивать ширину трохойды в интервале от 0,4 мм до 0,5 мм, наблюдается уменьшение глубины канавки. При достижении ширина трохойды 0,5 мм наблюдается нестабильность валика и распад его на отдельные капли, в результате чего канавка схлопывается (рисунок 2, в).

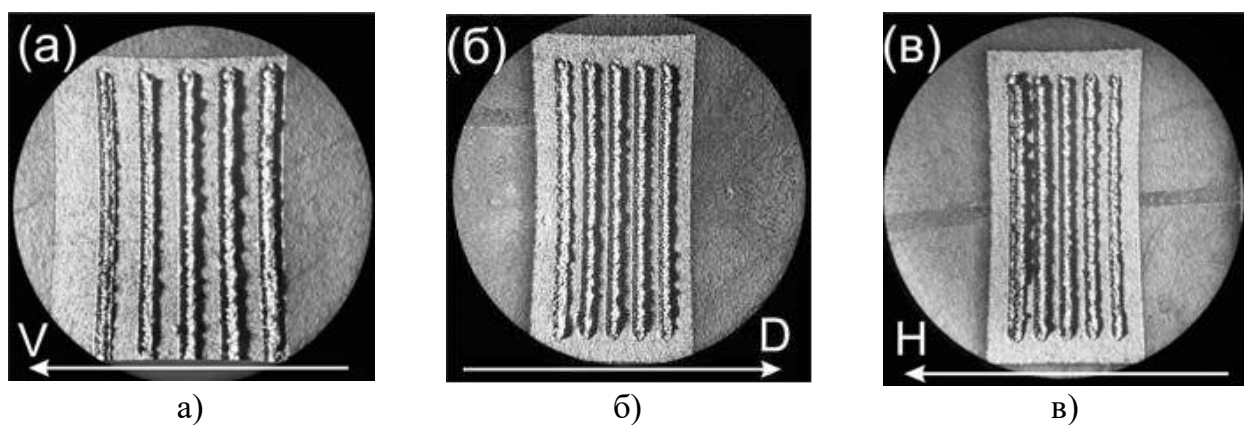


Рисунок 2 – Исследование влияния параметров на форму и стабильность N-образных канавок. (а) – скорость сканирования (V), (б) – расстояние между петлями трохойды (D), (в) – ширина трохойды (H). Освещение направлено слева направо [1]

Таким образом, для получения устойчивого линейного рельефа следует использовать следующие параметры: скорость сканирования 150 мм/с, расстояние между петлями трохойды 15 мкм, ширину трохойды 0,4 мм. Появляется возможность получения рельефов более сложного типа путем объединения полученных канавок. В этом случае следует учитывать расположение скапливающегося расплава относительно направляющей в процессе лазерной обработки. Рисунок 3 (а) иллюстрирует, в каком направлении происходит перемещения расплава относительно направляющей. При расположении N-образных канавок параллельно друг другу валики могут не пересечься или слипнуться, в ходе чего сформируется один большой валик с «Λ»-рельефом прямоугольного сечения типа «π»-рельефа. Конфигурация рельефа типа «М» в поперечном сечении может быть получена при расположении двух N-образных канавок на достаточном расстоянии друг от друга. Далее будем называть их М-рельеф. На рисунке 3, б показана схема различных комбинаций N-образных канавок для получения ранее рассмотренных видов рельефа.

Для получения выпуклой маркировки текста на стальной поверхности могут быть использованы все виды поперечных сечений Λ-, π- и М-рельефов (рисунок 4).

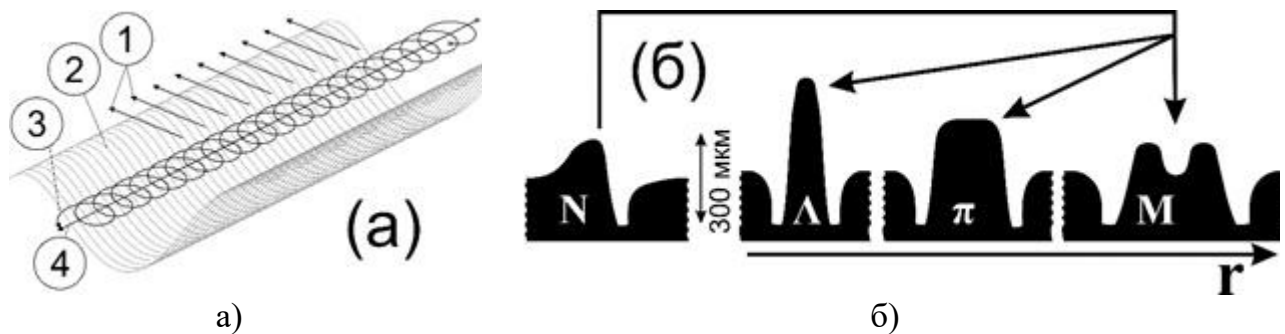


Рисунок 3 – (а) – схема движения луча и расплава, где (1) – направление движения расплава, (2) - канавка на стальной поверхности, (3) - траектория луча (трохойда), (4) – направляющая. (б) – схема получения различных одномерных структур, где r – расстояние между двумя N-образными канавками [1]

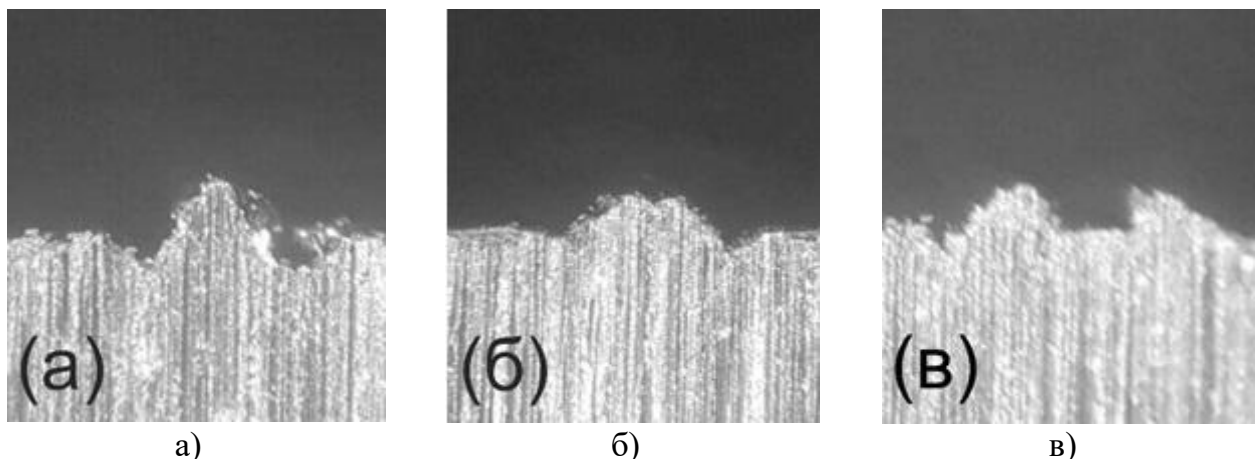


Рисунок 4 – Вид поперечного сечения различных типов одномерного рельефа: (а) – Λ-рельеф (б) – π-рельеф (в) – М-рельеф [1]

Получение точечного рельефа на поверхности в рамках одного прохода. Шрифт Брайля

Проведенные исследования позволили установить возможность использования в качестве направляющей спирали Архимеда вместо прямой линии. При таком воздействии на поверхности стали можно получить выпуклые точечные структуры [2]. Параметры обработки, полученные в предыдущей главе, применяли для получения точечного рельефа.

На рисунке 5 показана схема движения луча для получения точечного рельефа. Управляющая программа лазерного станка позволяет последовательно получать точечный рельеф на поверхности образца в различных точках поля обработки сканирующей системы.

На рисунке 6, а приведено изображение точечного рельефа. Такие точечные структуры можно осязать кончиками пальцев и, таким образом, появляется возможность использования их в качестве шрифта Брайля на стальной поверхности (см. рисунок 6, б, в). Высота точечных структур составляет 500 мкм. На формирование текстовой строки «HELLO WORLD» затрачено 4,5 минуты, а для текста Брайля - 5 минут. Для лучшей визуализации точечные структуры необходимо дополнительно обрабатывать специальным режимом очистки на той же лазерной системе. Линейные структуры до металлического блеска были обработаны при помощи механической шлифовки.

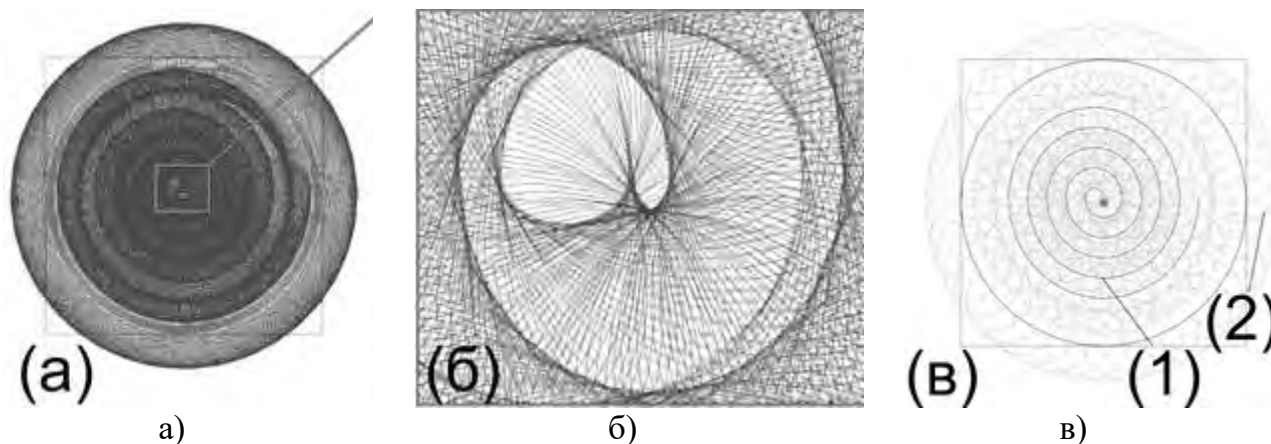


Рисунок 5 – Схема движения луча по поверхности стали для получения выпуклого точечного рельефа. (а) – реальная схема движения луча, (б) – увеличенная область, (в) – упрощенная схема движения, (1) – направляющая (спираль Архимеда), (2) – траектория движения луча [1]

Получение комбинированного рельефа на поверхности стали в рамках одного прохода. Лазерная накатка

Было установлено, что при обработке стали импульсным лазерным излучением наносекундной длительности формирование рельефа возможно не только по методу испарения, но и в режиме жидкой фазы. Причем выпуклый рельеф можно получить в рамках одного вектора. Для демонстрации эффекта перехода от испарения к жидкой фазе был проведен тест, в котором луч перемещался по параллельным векторам. Все параметры обработки были одинаковыми для каждого вектора за исключением скорости перемещения луча. Скорость изменялась линейно от 100 до 1000 мм/с. На рисунке 7 показан внешний вид пластины из нержавеющей стали, обработанной таким образом. Скорость возрастала слева направо. На трех полосах обработки разное

количество линий. Это означало, что шаг изменения скорости в каждой полосе различный, соответственно общее количество линий и расстояние между ними различно.

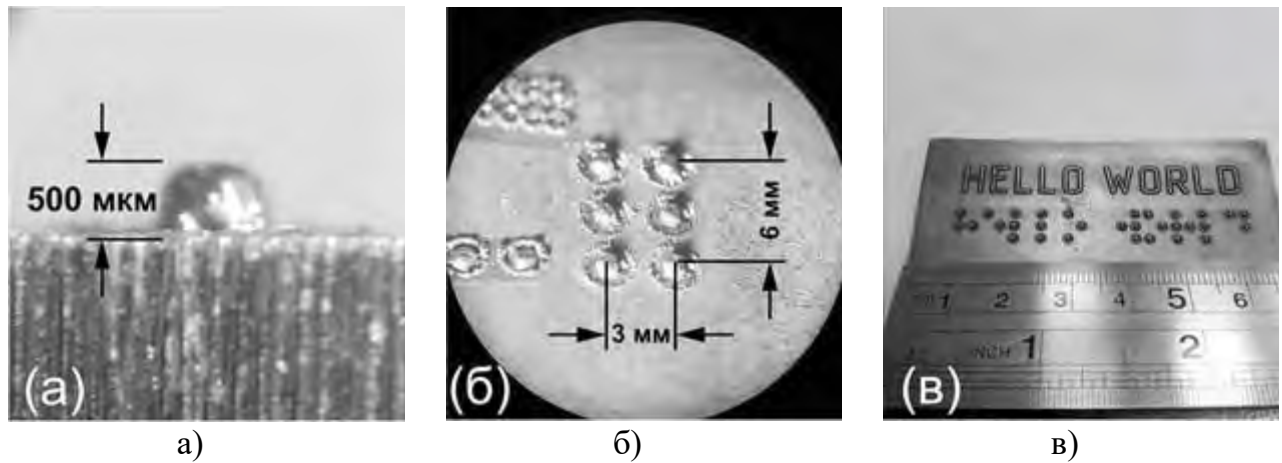


Рисунок 6 – Внешний вид точечных структур на поверхности стали. (а) – вид сбоку, (б) – вид сверху нескольких точечных структур, расположенных в виде одного символа шрифта Брайля, (в) – вид выпуклого текста и текста Брайля с одинаковыми символами [1]

При малых скоростях обработки происходит выплеск жидкой фазы без существенного испарения материала. При достижении порогового значения скорости потока энергии оказывается недостаточно для отрыва выплесков от поверхности стали, что видно на рисунке 7 (б). При боковом освещении рельеф становится лучше заметен, что видно из рисунка 7 (в). На рисунке 8 представлены кадры видеосъемки процесса обработки стальной пластины, изображенной на рисунке 7. Из рисунка 8 видно, что в начале процесса образуются искры вылетающего расплава по виду похожие на искры, образующиеся в результате механической обработки стали точильными камнями. При достижении порога вылета расплавленных частиц искры пропадают. На рисунке 8 это момент времени 3 секунды. Этому моменту времени соответствуют линии, показанные на рисунке 7 (в). После прохождения этого порога увеличивается интенсивность излучения плазмы что видно по голубому свечению на кадре. Это означает что при увеличении скорости все большую роль начинает играть удаление материала по испарительному механизму.

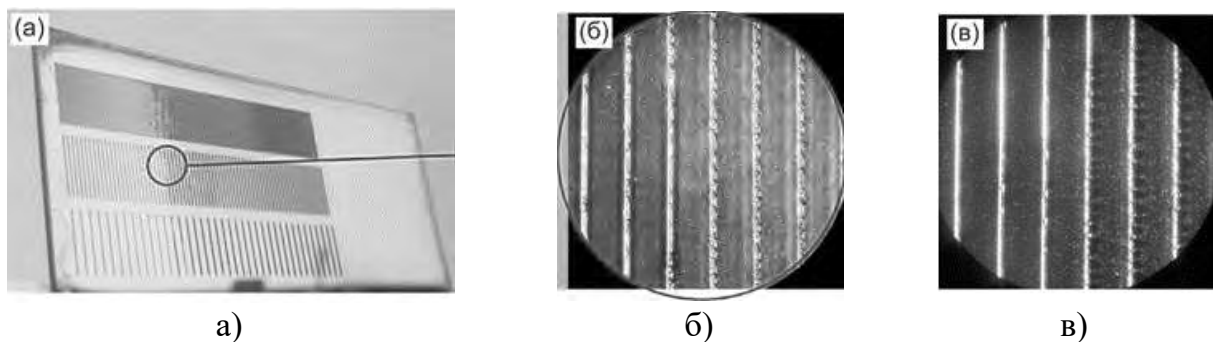


Рисунок 7 – Изменение внешнего вида результата лазерной обработки нержавеющей стали при изменении скорости перемещения луча по поверхности стали. (а) – внешний вид, (б) – вид увеличенного фрагмента в микроскоп, (в) – вид увеличенного фрагмента с боковым освещением [1]

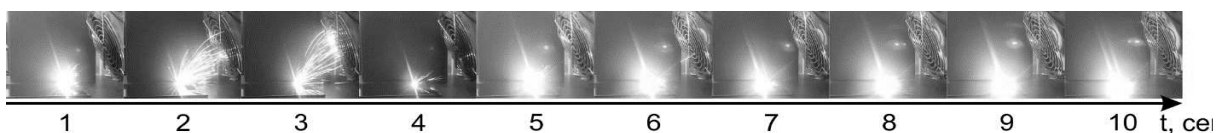


Рисунок 8 – Кадры видеосъемки обработки нержавеющей стали векторами с переменной скоростью [1]

Такой эффект может быть использован для формирования рельефа на тонкостенных деталях. Так как унос материала незначителен, не происходит утоньшения стенки. На рисунке 9 изображено применение такого способа получения рельефа для цилиндра из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм.

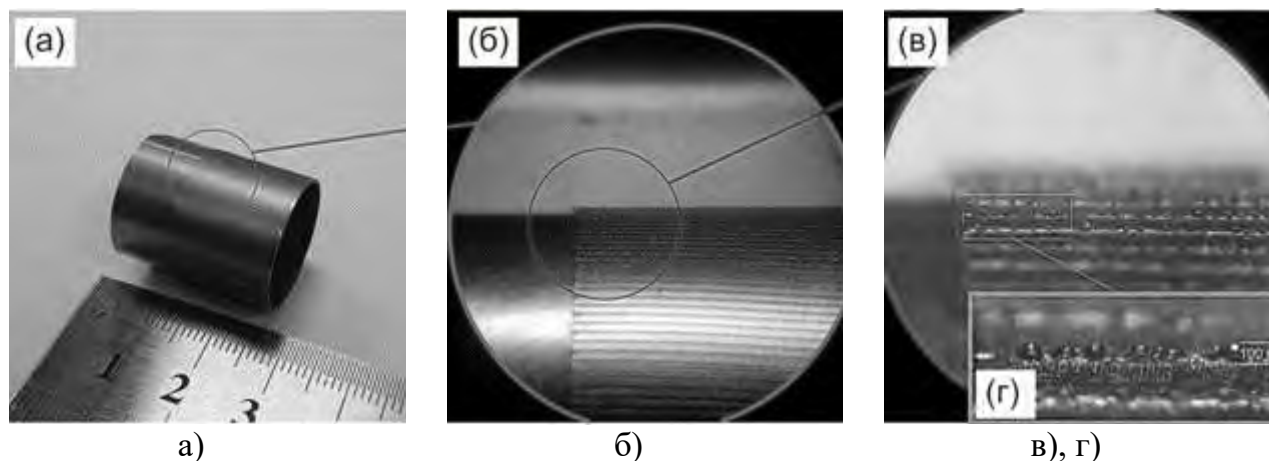


Рисунок 9 – Получение выпуклого рельефа на внешней поверхности тонкого цилиндра [1]

Во время получения рельефа, представленного на рисунке 9 образовывались оксиды. Это хорошо заметно на рисунке 7, где они выделяются коричнево-оранжевым оттенком. Для их удаления использовалась та же лазерная система. Был подобран режим, который удалял оксиды и часть металла. Удаление металла происходило в пренебрежимо малой степени, что видно из рисунка 9 (г). Шероховатость стали вокруг выпуклых рельефных структур значительно меньше высоты рельефа (100 мкм).

Заключение

Технологии получения выпуклых линейных структур могут быть использовать в качестве альтернативного метода создания рельефа на поверхности металлических изделий в случаях, когда точечная маркировка, создаваемая ударным воздействием, либо глубокая лазерная гравировка не обеспечивают долговечность маркировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amiaga J.V., Vologzhanina S.A., Gorny S.G. Development of a fast method for forming Braille on the surface of steels with IR nanosecond pulsed 50W fiber laser // AIP Conference Proceedings - 2020, Vol. 2285, pp. 040003..
2. Lopota V. A., Sukhov Y. T., Turichin G. A.; Veiko V. P. Computer simulation of laser beam welding for technological applications // SPIE Proceedings - 1997 [SPIE International Symposium on Intensive Laser Actions and Their Applications and Laser

Applications Engineering - St. Petersburg-Pushkin, Russia (Wednesday 3 July 1996)] Laser Applications Engineering (LAE-96) -, 3091, pp. 19–23.

3. E. I. Pryakhin, E. Yu. Troshina. Degradation induced by thermal and chemical on matrix codes installed on brass and aluminium alloy parts by laser. Russia. Tsvetnye Metally. 2022. No. 7. pp. 87–91 DOI: 10.17580/tsm.2022.07.10.

4. Pfefferkorn F. E.; Morrow J. D. Controlling surface topography using pulsed laser micro structuring // CIRP Annals - Manufacturing Technology - 2017, Vol. 66, No 1, pp. 241-244. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.138>.

5. Veiko V., Karlagina Y., Moskvina M., Mikhailovskii V., Odintsova G., Olshin P., Yatsuk R. Metal surface coloration by oxide periodic structures formed with nanosecond laser pulses // Optics and Lasers in Engineering - 2017, Vol 96 No April, pp. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.04.014>.

6. Petkova A.P., Ganzulenko O.Yu. Features of laser marking technology for products made of non-ferrous metals and alloys using matrix ultra-dense barcodes / Tsvetnye metally, No. 7, 2022. P. 92-97.

7. Ganzulenko, O.Y., Petkova, A.P. Simulation and approbation of the marking laser process on metal materials / Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1753(1), 012016.

8. Blackburn J., Hilton P. Producing surface features with a 200 W Yb-fibre laser and the Surf-Sculpt® process // Physics Procedia - 2011, Vol. 12, No 1, pp. 529–536. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.065>.

J.V. Amiaga¹, S.A. Vologzhanina², V.O. Volokh²,
R. Khuznakhmetov², A. Ramos Velasquez³, A.F. Igolkin³
¹OOO «Laser Center», St. Petersburg, Russia
²Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia
³ITMO University, St. Petersburg, Russia

POSSIBILITIES OF LASER PROCESSING IN OBTAINING A CONVEX RELIEF ON THE SURFACE OF STEEL PRODUCTS

Abstract

The paper investigates the possibility of controlling the melt and obtaining convex stable structures when processing the surface of steel with low-power nanosecond laser radiation. The effect of laser processing parameters on the structure of convex linear structures is established. The optimal parameters for processing St3sp steel with low-power laser radiation are found.

Keywords: laser processing, low-power laser, convex relief.

А.Н. Кивалов, Д.А. Зинченко
Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия,
dmitriy.zinchenko.87@gmail.com

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ДАННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация

В статье рассматриваются особенности разработки сложных технических систем (далее – СТС), важность и необходимость детального учета условий и факторов, снижающих достоверность оценок их показателей на этапе проведения испытаний. Проведён анализ способов решения данной проблемы, по результатам которого сформирована методика определения характеристик СТС на основе объединения результатов испытаний и данных моделирования. Рассмотрена возможность применения программно-алгоритмических средств Data Mining как инструмента анализа и обработки результатов испытаний, определения характеристик и прогнозирования динамических процессов функционирования СТС.

Ключевые слова: сложные технические системы, испытания, программно-алгоритмические средства, определение характеристик, оценивание характеристик.

Введение

Анализ создания современных СТС различного предназначения указывает на существенное увеличение требований, предъявляемых к их качеству и эффективности. Сложность разрабатываемых технических систем и трудность адекватного теоретического описания функционирования, предполагает необходимость совершенствования процесса их разработки, важной составной частью которого являются различные виды испытаний, устанавливая соответствие СТС заявленным характеристиками во многом определяющие материальные и финансовые затраты всего их жизненного цикла. Величина стоимости и необходимого времени на проведение всех экспериментов, значительно затрудняет определение характеристик по результатам натурных испытаний. Сокращение же затрат на испытания ведет к снижению качества (точности и достоверности) оценок определяемых характеристик СТС, принятию необоснованных решений о соответствии опытных образцов требованиям технических заданий, а также увеличению затрат на последующие доработки при эксплуатации.

В этих условиях исключительную важность и актуальность приобретает задача по совершенствованию научного подхода, обеспечивающего повышение качества определения характеристик СТС [1 - 5].

Результаты анализа научных трудов многих авторов и выполненных научно-исследовательских работ подчеркивают актуальность проведения исследований, направленных на повышение качества оценивания характеристик СТС различного назначения.

Для СТС характерен набор целого ряда факторов, усложняющих процесс оценивания их показателей и снижающих качество оценок:

высокая сложность и стоимость проведения испытаний и, как следствие, малые

объемы выборочных экспериментальных данных;

многообразие и сложность связей между элементами систем и внешней средой; трудности, а иногда и невозможность использования результатов испытаний и опыта применения аналогичных систем в силу применения принципиально иных (инновационных) технических решений при создании новых средств;

сложность оценивания некоторых их свойств, обусловленных ограничениями экспериментальной базой;

наличие внешних и внутренних воздействующих факторов и их комбинаций, проявляющихся в условиях комплексного применения.

В результате, в теории и практике современных испытаний имеет место актуальная научная проблема, заключающаяся в развитии существующих научно-методических положений планирования и проведения испытаний СТС с целью повышения качества оценок их характеристик, в том числе в условиях информационной ограниченности.

Наличие и актуальность данной научной проблемы обуславливает комплекс противоречий при оценивании характеристик СТС между следующими обстоятельствами и категориями:

высокой ответственностью принимаемых решений по результатам испытаний о соответствии характеристик разрабатываемых систем и средств заданным техническим требованиям и неопределенностью результатов испытаний, вызванной, прежде всего, их малым числом;

существенным влиянием объемов испытаний и результатов проводимых экспериментов на порядок планирования последующих испытаний и отсутствием математического аппарата рационального распределения выделяемого на испытания ресурса с учетом априорных и апостериорных данных об объекте, исходя из условия обеспечения максимума уровня качества получаемых оценок характеристик СТС;

необходимостью детального учета условий и особенностей функционирования СТС и сложностью формализации данного процесса;

объективной потребностью сокращения объемов и сроков проведения натурных испытаний и необходимостью развития существующего математического аппарата обработки экспериментальных данных малого объема с требуемым качеством, в том числе обоснованного объединения результатов математического моделирования, процесса функционирования СТС с результатами, полученными в ходе испытаний.

Обобщение этих и других противоречий позволяет сделать вывод о том, что фундаментальным является противоречие между существующим уровнем развития научно-методического аппарата оценивания характеристик СТС и требованиями по повышению точности и достоверности оценок характеристик СТС на этапе испытаний.

Методы

Проведенные исследования и анализ работ в данной области, позволили сделать вывод, что разрешением указанных противоречий, во многом определяется степенью развития методов определения характеристик на основе объединения результатов испытаний и данных моделирования, которые вошли в основу разработанной методики.

Методика определения характеристик СТС на основе объединения различной по характеру исходной информации, включает в себя:

- теоретико-экспериментальное определение характеристик;
- байесовские процедуры объединения результатов различных этапов испытаний;
- определение характеристик с учетом структуры и параметров математической модели;
- объединение данных с учетом их информационной значимости;
- объединение однородных результатов испытаний.

Результаты и обсуждение

Метод теоретико-экспериментального оценивания обеспечивает получение обобщенных оценок характеристик СТС путем объединения статистической экспериментальной, статистической модельной и расчетной модельной оценки. При этом статистическая модельная оценка формируется на основе математической модели функционирования системы и данных о внешних воздействующих факторах, измеряемых при каждом конкретном испытании. Расчетная модельная оценка находится путем моделирования по соответствующим алгоритмам внешних воздействующих факторов и использования этих результатов в качестве исходных для моделирования функционирования системы. Получение обобщенной оценки характеристики СТС с минимально возможной дисперсией производится путем решения задачи оптимизации значений весовых коэффициентов составляющих оценок.

Расчеты показывают, что повышение точности оценок характеристик СТС за счет использования результатов теоретических исследований может составлять до 50% и более [1 - 17].

При Байесовском подходе нет необходимости рассматривать свойства эффективности, несмещенности и состоятельности, так как к байесовским оценкам предъявляется одно требование – они должны быть оптимальными в смысле минимума ожидаемых потерь. Кроме того, используя классическое определение эффективности и состоятельности, возможно доказать теорему о том, что байесовские оценки состоятельны и асимптотически эффективны. Байесовский подход целесообразно применять при условии наличия достаточной априорной информации о распределении оцениваемых характеристик СТС [4].

Для определения характеристик СТС по результатам испытаний с учетом результатов моделирования, строится математическая модель процесса функционирования в виде регрессионной зависимости, предложенный подход позволяет учитывать при оценивании характеристик структуру и параметры математической модели. Использование данного подхода целесообразно в ходе натурных испытаний СТС, так как это обеспечивает повышение достоверности (точности) оценивания характеристик или соответственно значительное сокращение числа испытаний [4].

При различной значимости неоднородной информации, в том числе качественной, о свойствах СТС, для обеспечения существенного повышения достоверности определяемых характеристик, целесообразно применить подход объединения данных с учетом их информационной значимости, включающий определение коэффициентов важности критериев, общих оценок полезности для каждой информационной ситуации и получение объединенной оценки [4].

При наличии однородных данных наибольшее распространение нашли методы, основанные на линейном объединении показателей. Линейное объединение оценок

характеристик предполагает, что имеются выборки, представляющие собой экспериментальные данные, полученные в результате испытаний СТС, а также априорные данные. К которым можно отнести результаты моделирования или испытаний образцов аналогов [4, 7, 11 - 13].

Так же перспективным инструментом анализа и обработки результатов испытаний, определения характеристик и прогнозирования динамических процессов функционирования СТС, целесообразно рассмотреть применение программно-алгоритмических средств DataMining (англ.- «анализ данных») основными задачами которых в данном процессе является комплексный системный анализ оперативных ситуаций, включающий в себя:

- обнаружение и прогнозирование скрытых тенденций и закономерностей развития наблюдаемых процессов;
- обнаружение и распознавание скрытых факторов влияния (в том числе, факторов угрозы);
- обнаружение и идентификацию ранее неизвестных взаимосвязей между многомерными динамическими параметрами и факторами влияния;
- анализ среды взаимодействия динамических процессов и прогнозирование изменения ее характеристик;
- выработку оптимизационных рекомендаций по управлению многомерными динамическими процессами;
- визуализацию результатов анализа, подготовку предварительных отчетов и проектов допустимых решений с оценками достоверности и эффективности возможных реализаций [18].

Данные свойства указанных алгоритмических средств, несомненно повысят качество выходных данных проводимых испытаний и позволят прогнозировать возможные отказы, определять слабые стороны изделия на этапе проектирования, существенно облегчат формализацию влияющих факторов и процессов предусмотренных на всех этапах жизненного цикла СТС.

Заключение

Описанная в статье методика позволяет получить более точное и достоверное значение обобщенной характеристики СТС, чем статистическое экспериментальное за счет объединения статической модельной и расчетной модельной оценки определяемой характеристики, получаемые на основе теоретических исследований математической модели, со статической экспериментальной оценкой, исходя из обеспечения минимума дисперсий обобщенной оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буренок, В. М. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения. / В.М. Буренок, В.М. Ляпунов, В.И Мудров; под ред. А. М. Московского. - Москва: 2004. - С. 419.
2. Ивченко, Б. П. Теоретические основы информационно-статистического анализа сложных систем / Б. П. Ивченко, Л. А. Мартыщенко, М. Л. Монастырский. - Санкт-Петербург: 1997. - С. 320.
3. Александровская, Л. Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка СТС / Л. Н. Александровская. - Москва: 2003. - С. 736.
4. Кивалов, А. Н. Теоретические основы определения тактико-технических характеристик высокоточных средств ракетного вооружения на этапе испытаний.

Монография / А. Н. Кивалов, С. А. Умеренков, Д. Н. Самотонин; под ред. А. Н. Кивалова. - Санкт-Петербург: МВАА, 2020. - С. 320.

5. Арефьев, И. Б. Теория управления (современные проблемы управления и принятия решений) / И. Б. Арефьев, Л. А. Мартыщенко. - Санкт-Петербург: 2000. - С.247.

6. Гасюк, Д.П. О содержании сущности качества менеджмента, качества продукции и их гармонизации // В сборнике: Управление качеством в интересах устойчивого развития. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. – 2019. – С. 31–36.

7. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А., Барабанов В.В., Филиппов А.А. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2015. № 648. С. 6-12.

8. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гарькушев А.Ю., Гасюк Ю.Д. Моделирование приемо-сдаточных испытаний ракетно-артиллерийского вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 95-100.

9. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Сауренко Т.Н., Сазыкин А.М., Усиков Р.Ф. Модель и алгоритм обоснования состава оборудования и специалистов для проведения испытаний // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1-2 (151-152). С. 113-122.

10. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73.

11. Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сазыкин А.М., Усиков Р.Ф. Методические положения сокращения объема выборки при испытаниях артиллерийских боеприпасов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 9-10 (135-136). С. 90-96.

12. Черныш А.Я., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Оценка эффективности перспективных автоматизированных информационно-управляющих систем военного назначения на основе натуральных испытаний // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2022. № 1. С. 37-41.

13. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Сазыкин А.М., Ковальчук А.М., Романюта А.Е. Методический подход к оценке надежности вооружения и военной техники на основе ограниченного объема натуральных испытаний // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 3-4 (165-166). С. 95-98.

14. Гарькушев А.Ю., Курилов А.В., Супрун А.Ф., Гасюк Д.П. Методика оценки показателей качества информационных систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. С. 56-61.

15. Гасюк Д.П., Белов А.С., Трахинин Е.Л. Научно-методический подход по оцениванию живучести компьютерных систем в условиях внешних специальных программно-технических воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 4. С. 86-90.

16. Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019. – 358 с.

17. Гасюк Д.П., Романовская В.Е. Управление рисками менеджмента качества в условиях удалённого режима работы персонала организации // Кластеризация цифровой экономики: Глобальные вызовы: Сборник трудов национальной научно-практической конференции с зарубежным участием. В 2-х томах. Под редакцией Д.Г. Родионова, А.В. Бабкина. 2020. С. 24-31.

18. 6. Мусаев, А. А. Алгоритмы «Data Mining» в задачах управления динамическими процессами / А. А. Мусаев, И. А. Барласов. - Санкт-Петербург: 2007. - С. 14.

A.N. Kivalov, D.A. Zinchenko
Mikhailovskaya Military Artillery Academy, St. Petersburg, Russia,
dmitriy.zinchenko.87@gmail.com

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF THE STS BASED ON THE COMBINATION OF TEST RESULTS AND SIMULATION DATA

Abstract

The article discusses the features of the development of complex technical systems (hereinafter referred to as STS), the importance and necessity of detailed consideration of conditions and factors that reduce the reliability of estimates of their indicators at the stage of testing. The analysis of ways to solve this problem is carried out, according to the results of which a methodology for determining the characteristics of the STS is formed on the basis of combining test results and simulation data. The possibility of using Data Mining software and algorithmic tools as a tool for analyzing and processing test results, determining characteristics and predicting dynamic processes of STS functioning is considered.

Keywords: complex technical systems, tests, software and algorithmic tools, determination of characteristics, evaluation of characteristics.

СОДЕРЖАНИЕ

Д.П. Гасюк, д.т.н., профессор ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОСНОВА РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ	5
ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ	13
Ван Цзыси, Ли Цзылинь, Чэнь Жуй, Ияо Цзакан, Гуо Тэнда, Ли Дэцай ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИИ ПОДШИПНИКОВ ЛЕВИТАЦИИ (МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ И ПОДШИПНИКОВ ИЗ ФОЛЬГИ)	13
Я.Ю. Бровкина, Д.Н. Шабалин, И.И. Козарь, А.В. Петров МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА И ПОВЫШЕНИЯ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ КРУГОВ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ	20
П.В. Бурдин, С.В. Михайлов, Н.Ю. Ковеленов МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗЦАМИ СО СМЕННЫМИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ	24
Д. Быченко, И.И. Козарь, Д.Н. Шабалин ВЫБОР И РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ	33
Е.Г. Деева, Д.П. Гасюк УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В ПРОЦЕССА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА	40
А.К. Елагина, Т.А. Макарова, С.А. Любомудров ВЫБОР СРЕДСТВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НАРУЖНЫХ ДИАМЕТРОВ	45
А.М. Гудкова, Т.А. Макарова, С.А. Любомудров РАЗРАБОТКА СРЕДСТВА АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	49
М.В. Хеук, К.Т. Аббасов, А.Н. Парфиевич, С.Р. Онысько ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ ПОЛИРОВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ Ø50 – 400 ММ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВАЛ» НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНОМ СТАНКЕ МОД. 1М63	56
Д.П. Гасюк, В.А. Косова МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ПОЗАКАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА	61
Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В. Яковицкая ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ОТВЕРСТИЯМИ ПРИ СВОБОДНОЙ ГИБКЕ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА	68
Н.А. Молчанов, С.А. Любомудров МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ В ДИСКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН	73
Namboodri Tanuj PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS USING AI	81

Н.Н. Попок, С.А. Портянко, Е.М. Тихон, В.С. Анисимов, Р.С. Хмельницкий, Г.И. Гвоздь МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ СТРУЖКИ И ПОТОКОВ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ СКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВЗ	85
М.А. Рабыко, А.Н. Юманова, В.М. Шеменков ВЛИЯНИЕ ПРИКАТОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	92
Д.Н. Шабалин, И.И. Козарь, Т.А. Ларионова, И.С. Михайлова, А.В. Рябова ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТОКАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ НАИВЫСШЕЙ ЗАГРУЗКЕ СТАНКОВ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ	97
Т.А. Макарова, А.В. Рябова ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРА МАШИНОСТРОЕНИЯ СПБПУВ УСЛОВИЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	103
Ши Шуанюань, С.В. Михайлов, Д.Н. Шабалин ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ	109
С.Н. Степанов, И.Н. Хрусталева, С.С. Степанов ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО БЛОКА ЦИЛИНДРОВ, С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ	115
С.А. Любомудров, О.Т. Турабаев ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ ПРУЖИНЫ ГИДРОЗАМКА ПОДЪЕМНИКА АВТОМОБИЛЬНОГО	119
Т.У. Умаров, О.К. Яцкевич, З.Н. Мухиддинов ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ	122
О.А. Лапшина, И.И. Козарь ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА МЕЖДУ МЕДНЫМ ДИСКОМ И ДИСКОМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ПЕРЕДАВАЕМЫЙ МОМЕНТ В МАГНИТНОЙ МУФТЕ	126
Д.Д. Брусова, И.И. Козарь СРАВНЕНИЕ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН РАЗНЫХ ФИРМ ДЛЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШЕСТЕРНИ ИЗ МАТЕРИАЛА 20Х3МВФА-Ш	132
М. Шульга, Н.А. Беликова, И.И. Козарь, Т.А. Ларионова, Д.Н. Шабалин ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ЦИФРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	137
КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ	144
В.Р. Хабиров ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ФРЕЗЕРНОМ СТАНКЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ	144
	513

А.К. Кузин, С.Г. Орлов REVISE: ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ НА СВЕРХБОЛЬШИХ СЕТКАХ	148
В.В. Ларькин, В.Л. Хрулев, М.Л. Бегунов, Д.Г. Шахов, В.В. Шиль МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОСТИ ПАРКА ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ ТЕХНИКИ В МАТЕРИАЛАХ, КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЯХ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЯХ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ПРОАКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	155
Л.В. Логинов, В.В. Ларькин, А.С. Ерюшев, А.А. Вырвич, Е.А. Мельников МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ОСВОЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	163
А.М. Шевелев, А.А. Зарукин, В.И. Новиков ВОЗМОЖНОСТЬ ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС УСТРОЙСТВ ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ УПРАВЛЕНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ БУРОВОГО ВАЛА	171
К. Аубекеров, С. Копцев, А.Ю. Скрыбнев ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ	178
С.Г. Колесников, М.В. Корнаков, А.В. Репин МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЗАГРУЖЕННОСТИ УЗЛОВ И СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ НИМИ	186
А.С. Рымхан, Г.Б. Абдугалиева РАСЧЕТ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ КОСТЕНКО	195
Н.Б. Садырбекова, Г.Б. Абдугалиева РАСЧЕТ И ВЫБОР НАПРЯЖЕННОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ КОСТЕНКО	200
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	204
Е.В. Васильева, А.О. Жукова, Ху Дикай, Г.В. Иванова, В.Л. Полонский, Е.А. Тарасенко АДДИТИВНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ	204
А.О. Жукова, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛА ПОДВЕСКИ КРАНА	211
Е.Н. Костылева, А.П. Драгун, А.Л. Федоров УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ	219
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	225

А.С. Кириенко, С.Э. Завистовский, В.Э. Завистовский РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЕМ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР В ГИБКИХ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ	225
В.Н. Кудрявцев, В.С. Кобчиков СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНЫМ ПОЛИРОВАНИЕМ	233
А.И. Попов, А.С. Фумин, С.А. Кислицын, А.П. Веселовский, М.М. Радкевич ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА СТРУИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО КАТОДА К МЕТАЛЛИЧЕСКОМУ АНОДУ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБРАБОТКИ	238
А.И. Попов, Г.А. Дудко, В.Г. Теплухин, А.А. Безбородов, В.С. Кобчиков, Ф.Л. Глухих, М.В. Яковицкая ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ СТРУЙНЫМ ЗАГЛУБЛЕННЫМ ТОКОПОДВОДОМ	245
К.А. Садыров МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ ПРИ СВАРКЕ ТИТАНА И ИХ КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА	252
Е.В. Овчинников, Т.Ф. Григорьева, Е.И. Эйсымонт, И.И. Музыка МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ	259
МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	266
М.М. Радкевич, С.С. Гроховский ФОРМИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ПРОГРАММНОЙ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ	266
И.В. Калатозишвили, В.С. Мамутов, К.С. Арсентьева, В. Авдеенко КРИВАЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	274
И.В. Калатозишвили, В.С. Мамутов, К.С. Арсентьева, Е.В. Сидорова КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВЫТЯЖКИ- ФОРМОВКИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КАЛИБРОВКОЙ	280
С.Н. Лежнев, А.Б. Найзабеков, Е.А. Панин, А.О. Толкушкин, Д.В. Куис РАЗРАБОТКА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОЙ СОВМЕЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АРМАТУРНОГО ВИНТОВОГО ПРОФИЛЯ	285
А.Б. Найзабеков, И.Е. Волокитина, Е.А. Панин, А.В. Волокитин ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ	292
С.В. Пилипенко РАСЧЕТ ШИРИНЫ РУЧЬЯ КАЛИБРА СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ	297
Н.М. Потапов, С.Н. Кункин, Л.Б. Аксенов ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКЕ	305

Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, Е.А. Яновская, А.С. Пономарева МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИБКИ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ БАЛОК	311
А.А. Степанов, К.С. Арсентьева ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЮЛЬДЕНА-ПАППУША В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ	319
П.А. Кузнецов, К.В. Лепетан, Д.Р. Кравцов АНАЛИЗ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ПОРОШКОВ	325
Y. V. Auchynnika, N.M.Chekan, I.P.Akula, E.I.Eisimont, A.Y. Auchynnika NANOPHASE VACUUM COATINGS	332
Е.В. Овчинников, А.П. Возняковский, А.А. Возняковский, Е.И. Эйсымонт НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ РЕАКТОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ	339
С.Р. Шнайдер, Н.В. Соколов СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ОСНОВАНИЕ»	343
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ	347
К.С. Гречина, Д.В. Ляховенко ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРЕССОВОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВРЕМЯЗАДАЮЩЕГО КОЛЬЦА	347
Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДАТЧИКОВ ИНСТРУМЕНТАМИ «ШЕСТЬ СИГМ»	352
Д.П. Гасюк, А.Н. Усанова ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА СОТРУДНИКА ОТК В УСЛОВИЯХ МЕЖОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ	362
Д.П. Гасюк, И.В. Узлов МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЕЁ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ В УСЛОВИЯХ ПОЗАКАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА	366
Д.П. Гасюк, Ю.А. Валуйских ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ ВО ВНОВЬ ПРИСОЕДИНИВШИХСЯ РЕГИОНАХ РОССИИ	372
А.С. Скоробогатов ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ, КОРРЕКТИРОВКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ КОМПЛЕКТУЕМОЙ СЕРИЙНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ОПК	377
К.С. Гречина, Д.В. Ляховенко ВЫБОР СПОСОБОВ ИСПЫТАНИЙ ВРЕМЕНИ ГОРЕНИЯ ВРЕМЯЗАДАЮЩИХ КОЛЕЦ И ОЦЕНКА ИХ ТОЧНОСТИ	382

Songyuan Li, Shunca Li, Zhi Liu, V.I. Slatin, A.V. Petrov ROUGHNESS PREDICTION MODEL OF MILLING NOISE-VIBRATION- SURFACE TEXTURE MULTI-DIMENSIONAL FEATURE FUSION FOR N6 NICKEL METAL	387
В. Гридина, Д. П. Гасюк ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ДОКУМЕНТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ, РАСКРЫВАЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЦЕССАМ АНТИКОРРОЗИЙНОГО ПОКРЫТИЯ В ИЗДЕЛИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ	404
К.В. Пономарева, Д.П. Гасюк ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА НОРМИРОВАНИЯ ТРУДА НА ОПЫТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В УСЛОВИЯХ ПОЗАКАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА	407
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	410
А.И. Веремейчик МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА НОЖА ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ДВИЖУЩИМСЯ НОРМАЛЬНО-КРУГОВЫМ ИСТОЧНИКОМ	410
В.Г. Комаров, В.В. Ларькин, И.А. Спивак, С.А. Акатьев, В.А. Хохлов РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ	417
С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев ДЛИТЕЛЬНАЯ КОРРОЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ 22Х2Г2АЮ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ	422
В.В. Ларькин, В.Л. Хрулев, М.Л. Бегунов, М.В. Левицкий, А.В. Кропачев МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРИСПОСОБЛЕННОСТИ ОБРАЗЦА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ К ПРОАКТИВНОМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ И РЕМОНТУ	429
Л.В. Логинов, В.В. Ларькин, А.С. Ерюшев, А.А. Вырвич, Е.А. Мельников МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ ОСВОЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	436
С.Г. Мельник ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА Fe - C - РАСПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНО - ДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА	445
С.Ю. Прилипко, Д.С. Линник, Ю.А. Кудрявцев, Д.Р. Беличко, Г.К. Волкова, В.А. Глазунова, В.В. Бурховецкий ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА С ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ НА ИЗГИБ	452
С.В. Васильев, А.И. Лимановский, В.М. Ткаченко, Т.В. Цветков, Е.А. Свиридова, В.В. Бурховецкий, В.Н. Саяпин, В.И. Ткач МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ БЫСТРООХЛАЖДЕННЫХ ЛЕНТ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	457
М.В. Семенченко ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПУТЕМ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРОПУСКАНИЯ ТОКА ЧЕРЕЗ ИЗДЕЛИЕ В РЕЖИМЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ	464

Н.А. Феоктистов, В.М. Голод, Л.Ю. Добош, А.М. Барышникова КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ДЕНДРИТНО-ЗЕРНОВОЙ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТАЛИ 110Г13Л В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ	469
Е.А. Фетисова, А.О. Коротеев, Н.М. Шукан ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ СИНТЕЗОМ С ВВЕДЕНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ	477
О.В. Швецов, Т.А. Жужгина, Е.Э. Михайлова, С.А. Вологжанина ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	481
Д.Н. Юманов, С.М. Фурманов ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ Т-ОБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОЩНОСТЬЮ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ	487
К. Hamouda, В. Boudali, М.А. Djema, D. Saidi, S. Bouti PROCESS FOR SURFACE TREATMENT BY GRANULAR VIBRO-IMPACT	492
Д.В. Амяга, С.А. Вологжанина, В.О. Волох, Р.М. Хузнахметов, А. Рамос Веласкес, А.Ф. Иголкин ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫПУКЛОГО РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	499
А.Н. Кивалов, Д.А. Зинченко МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ДАННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЯ	506
СОДЕРЖАНИЕ	512

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Сборник научных трудов
Международной научно-практической конференции

21–25 ноября 2022 года

Санкт-Петербург

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 27.02.2023. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 32,5. Тираж 40. Заказ 0199.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного редакционной коллегией,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.