

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2017

УДК 621.01
ББК 34.5
А28

Рецензенты:

Академик РАН, председатель Дальневосточного отделения РАН *В. И. Сергиенко*
Доктор физико-математических наук, профессор, директор Института
металловедения и физики металлов ЦНИИчермет им. И.П. Бардина
А. М. Глезер

Авторы:

А. И. Рудской, А. А. Попович, А. В. Григорьев, Д. Е. Каледина

Аддитивные технологии : учеб. пособие / А. И. Рудской [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 252 с.

Проведен анализ современного состояния вопроса в области материалов, технологий и оборудования для получения изделий с применением аддитивных технологий. Описаны существующие способы получения изделий с помощью аддитивных технологий, перспективные материалы, которые используются в этих технологиях, а также существующее оборудование в этой области.

Рекомендовано в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов высших учебных заведений, для аспирантов научно-исследовательских институтов, обучающихся по техническим направлениям. Также может быть использовано для повышения квалификации инженерных кадров в области аддитивных технологий.

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

Оглавление

Введение	5
Глава 1. ИСТОРИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	7
1.1. История появления аддитивных технологий	7
1.2. Классификация аддитивных технологий	9
Глава 2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	21
2.1. Металлические материалы	22
2.2. Керамические материалы	45
2.3. Композиционные материалы	87
Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	105
3.1. Теоретические основы процесса	105
3.2. Модели процесса селективного лазерного плавления	112
Глава 4. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	121
4.1. Сущность и особенности аддитивных технологий	121
4.2. Технология 3D-печати песчаных форм	142
4.3. Гибридные технологии	157
4.4. Постобработка и контроль качества	163

4.5. Оборудование для аддитивных технологий	175
4.6. Аддитивные технологии и биодизайн	190

Глава 5. РЫНОК АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ **211**

Заключение	227
Библиографический список	230
Глоссарий	249

Введение

Развитие промышленности требует существенной модернизации существующих технологий, а также создания новых. Особую роль в этом играют аддитивные технологии (АТ), или технологии послойного синтеза, являющиеся одним из наиболее динамично развивающихся перспективных производственных процессов [313] и предоставляющие инженерам инновационный подход к проектированию и изготовлению деталей по сравнению с традиционными методами литья и обработки на металлорежущих станках.

По данным Союза машиностроителей России, мировой рынок аддитивных технологий растет почти на 30 % ежегодно, ожидается, что к 2020 г. он достигнет 10,8 млрд. Это, по сути, — старт новой промышленной революции [339].

По словам генерального директора ФГУП «ВИАМ», академика РАН Е. Н. Каблова: «Степень использования аддитивных технологий в производстве материалов является верным индикатором индустриальной мощи государства, индикатором его инновационного развития» [313].

Потребность в снижении массы изделий, экономии материала, а также повышении эксплуатационных характеристик изделий приводит к увеличению сложности деталей. Один из способов снижения массы узлов — уменьшение количества отдельных деталей и элементов их соединения, однако такие конструкции зачастую обладают более сложной конфигурацией, что обуславливает особенные требования, предъявляемые к технологиям производства подобных изделий [91].

Традиционно для изготовления изделий сложной конфигурации использовались литейные технологии. В частности, одним из методов изготовления сложнопрофильных изделий является способ точного литья в разовые формы, либо литье под давлением [274]. При других технологиях, например при использованииковки или штамповки, такие изделия сложно извлечь из пресса, либо совсем невозможно изготовить. Свойства получаемых изделий по литейным технологиям ниже, чем по технологиям, предполагающим пластическую обработку металла.

Широко применяемые сегодня технологии формообработки зачастую не способны обеспечить необходимые обоснованные элементы, содержащие сложные геометрические формы, тонкие стенки, внутренние каналы охлаждения и прочие конструктивные особенности, для реализации

которых при помощи традиционных технологий, в частности, приходится прибегать к сварке отдельных частей детали.

Аддитивный подход позволяет создавать уникальные изделия с внутренней полой структурой, например: теплообменники со сложной системой каналов охлаждения любой формы; литейная оснастка для создания корпусов новых двигателей и насосов; фильтрующие элементы с сетчатой структурой, размер ячеек которой определяется размером гранул порошкового материала и пр. [275]. При помощи данных технологий появилась возможность изготавливать детали с прямоугольной либо любой другой формой внутренних полостей (спиралевидного типа) и с любой формой сетчатого наполнения.

Методы аддитивного производства считаются альтернативными существующим традиционным субтрактивным методам обработки, таким как механические, электрофизические и электрохимические и пр. В отличие от классического формообразования, где от заготовки «отрезается» все лишнее при изготовлении детали, с использованием технологий аддитивного производства деталь «выращивается» из предварительно подготовленного порошкового материала, частицы которого послойно скрепляются между собой в каждом слое, а слои скрепляются между собой [316].

Применение аддитивных технологий во многих случаях обеспечивает большую свободу в выборе конфигурации изделия, что позволяет оптимизировать массовые и функциональные параметры детали за счет использования сотовых и иных сложных конструкций, уменьшения толщины стенок, а также объединения нескольких деталей и изготовления их как единое целое [91]. Немаловажным является существенное уменьшение сроков изготовления первых образцов деталей (на этапе исследований и разработки новых изделий) и экономия материала.

Интерес к аддитивным технологиям, «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства товарной продукции возник в авиации, космической индустрии и энергетическом машиностроении. Мотивацией являлась экономическая целесообразность. Аддитивные технологии в ряде случаев оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные технологии, а также открывают новые возможности при производстве изделий. Например, возможно изготовление деталей или пресс-форм сложной формы, с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки [279].

Экономический эффект от внедрения АТ в масштабе предприятия, производящего элементы авиационных двигателей, оценивается в 500–700 млн. руб., при этом обеспечивается изменение в подходе к конструированию: улучшение массогабаритных и иных функциональных показателей эффективности изделий.