

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

А. И. Рудской А. А. Попович

**ПРИРОДОПОДОБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

Монография



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2025

УДК 620.22+778.64

ББК 30.3:30.6

Р83

Р е ц е н з е н т ы:

Академик РАН, научный руководитель Волгоградского государственного
технического университета *В. И. Лысак*

Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник,
заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств
Института физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук *А. В. Макаров*

Рудской А. И. Природоподобные материалы и аддитивные технологии их производства :
монография / А. И. Рудской, А. А. Попович. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. — 446 с.

Представлены принципиально новые возможности применения аддитивных технологий, способных достаточно близко воспроизводить природоподобные материалы и конструкции. Рассмотрены различные типы природных и природоподобных материалов, описаны их структура и свойства. Отмечено, что, используя природообразные конструкции и аддитивные технологии, можно создавать детали сложных геометрических форм с заданным комплексом физико-химических, механических и функциональных свойств.

Предназначена для широкого круга специалистов, работающих на промышленных предприятиях и в научных учреждениях, а также для обучающихся по направлениям магистерской подготовки и аспирантуры «Металлургия», «Машиностроение», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Материаловедение и технология материалов».

Табл. 22. Ил. 304. Библиогр.: 1413 назв.

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

ISBN 978-5-7422-8893-0
doi:10.18720/SPBPU/2/id25-6

© Рудской А. И., Попович А. А., 2025
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2025

Ministry of science and higher education of the Russian Federation

PETER THE GREAT
ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY

A. I. Rudskoy A. A. Popovich

**NATURE-INSPIRED MATERIALS
AND ADDITIVE TECHNOLOGIES
FOR THEIR PRODUCTION**

Monograph



POLYTECH PRESS

Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic
University

Saint Petersburg
2025

Reviewers:

Academician of the RAS, academic supervisor of Volgograd State
Technical University *V. I. Lysak*

Corresponding member of the RAS, Doctor of Engineering, chief researcher, head
of the Materials Science Department and Mechanical Properties Laboratory of M. N. Mikheev
Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
A. V. Makarov

Rudskoy A. I. Nature-inspired materials and additive technologies for their production : monograph /
A. I. Rudskoy A. A. Popovich. – St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2025. – 446 p.

The monograph presents fundamentally new possibilities for applying additive technologies to closely reproduce nature-inspired materials and structures. The authors consider different types of natural and nature-inspired materials, describe their structure and properties. It is noted that, using nature-inspired structures and additive technologies, it is possible to create parts with complex geometric shapes and a specified set of physical, chemical, mechanical, and functional properties.

The monograph is intended for a wide range of specialists working at industrial enterprises and scientific institutions, as well as for students in master's and doctoral programs in "Metallurgy", "Mechanical engineering", "Design and technology in machine-building" and "Materials science and technology".

Tables 22. Figures 304. References: 1413 titles.

Printed by decision of the Council on Publishing Activities of the Academic Board of Peter the
Great St. Petersburg Polytechnic University.

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Природные и природоподобные материалы	15
1.1. Природные и природоподобные материалы и структуры.....	16
1.2. Применение аддитивного производства для получения природоподобных материалов и конструкций.....	39
Библиографический список	67
Глава 2. Природоподобные металлические материалы с пространственным изменением химического состава.....	77
2.1. Природоподобные металлические материалы с пространственным изменением химического состава и технологии их получения	80
2.2. Методы проектирования и моделирования природоподобных металлических материалов с пространственным изменением химического состава.....	94
Библиографический список.....	109
Глава 3. Природоподобные полимерные и металлические функционально-градиентные материалы	115
3.1. Технологии получения природоподобных полимерных функционально-градиентных материалов и их свойства.....	115
3.2. Технологии получения природоподобных металлических функционально-градиентных материалов и их свойства.....	140
Библиографический список.....	192
Глава 4. Природоподобные функционально-градиентные пористые материалы и метаматериалы.....	204
4.1. Природные функционально-градиентные пористые материалы.....	204
4.2. Метаматериалы, технологии получения и области применения	218
4.3. Метабиоматериалы, технологии получения и области применения	241
4.4. Проектирование метаматериалов.....	258
Библиографический список	283
Глава 5. Материалы с природоподобной геликоидальной структурой.....	311
5.1. Особенности природоподобной геликоидальной структуры	313
5.2. Влияние природоподобной геликоидальной структуры на свойства материала	317
Библиографический список	346
Глава 6. Природоподобные материалы с низким модулем упругости	351
6.1. Природные материалы с низким модулем упругости	351
6.2. Природоподобные материалы с низким модулем упругости в биомедицинской инженерии. Структура, свойства и технологии получения изделий.....	354
Библиографический список.....	385
Глава 7. Природоподобные конструкции для систем охлаждения и виброустойчивого инструмента.....	391
7.1. Природные конструкции с терморегуляцией	391
7.2. Природоподобные конструкции с терморегуляцией	394
7.3. Природоподобные конструкции для систем охлаждения газотурбинных лопаток....	409
7.4. Природоподобные спиралеобразные конструкции для виброустойчивого инструмента.....	425
Библиографический список.....	434
Заключение.....	441

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография является дополнением к предыдущим изданиям по аддитивным технологиям, опубликованным в период 2017–2024 годов.

В монографии изложены принципиально новые возможности применения аддитивных технологий, способных достаточно близко воспроизводить природоподобные материалы и конструкции. История развития человечества прошла этапы каменного, бронзового и так называемого железного веков, несколько промышленных революций и др. Каждый этап развития рождал свои технологии, «заточенные», как правило, на потребление. В развитии потребления человек прошел путь «от камня в руке до смартфона в кармане». Как ни парадоксально, предел потребления человеком не имеет границ, но многие ресурсы Земли не восполняются.

По сути, существующие технологии производства, начиная от металлургии до машиностроения, тупиковые в плане отсутствия принципов природоподобия. К таким принципам относят экологичность (технологии не должны наносить вред окружающей среде); природоподобие (необходимо использовать принципы и закономерности, заложенные природой и доказавшие свою эффективность за сотни миллионов лет существования жизни на Земле); своевременность (в природе все процессы происходят в определенный момент и все действия поэтапны); завершенность (цикличность в природе означает, что, если какой-либо процесс не доведен до логического завершения, другие не начинаются); отсутствие лишнего (природа пользуется тем, что имеет, но использует имеющиеся ресурсы эффективно); польза (в природе ничего не производится просто так, польза процесса должна быть очевидной); взаимосвязанность (в природе прослеживаются связи между различными системами).

Многие мировые лидеры, в том числе президент России Владимир Путин, осознают глобальную проблему нарушения человеком баланса между биосферой и техносферой. На 70-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН в 2015 году В. В. Путин заявил: «...Мы должны сосредоточиться на разработке принципиально новых, природоподобных технологий, которые не наносят вреда окружающей среде, а существуют в гармонии с ней. Это позволит восстановить баланс между биосферой и техносферой, нарушенный деятельностью человека. Формирование и развитие техносферы, подобной природе, определит новый облик цивилизации».

Национальные приоритеты и цели развития Российской Федерации обусловили появление Указа Президента Российской Федерации от 02.11.2023 № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации», в котором говорится, что Россия находится в самом начале пути развития таких технологий, поэтому перед ней стоят задачи определения основных принципов и критериев отнесения технологий к природоподобным, оценки их состояния в стране, разработки и утверждения плана мероприятий, направленных на их развитие. Функции головной научной

организации, осуществляющей научное руководство реализацией плана мероприятий, а также мониторинг и оценку научных результатов в сфере природоподобных технологий, возложены на федеральное государственное бюджетное учреждение ФГБУ «Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”».

Развитие природоподобных технологий – главная задача Курчатовского института в XXI веке. И, как отметил Михаил Ковальчук, президент НИЦ «Курчатовский институт», альтернативы такому подходу практически нет: «Если человечество хочет избежать глобального ресурсного кризиса, и в первую очередь энергетического, нам придется создать новую техносферу, основанную на принципах работы живой природы, а не на антагонизме с ней». В интервью «Коммерсанту» Ковальчук высказал идею о том, что научно-технологические прорывы главным образом связаны с созданием принципиально нового, природоподобного технологического уклада: «Природоподобные технологии будут, фактически, воспроизводить процессы живой природы, и дадут нам принципиально иной экономический, как в самой природе, уровень потребления энергии, откроют новые возможности для увеличения продолжительности жизни, улучшения ее качества».

Владислав Панченко, вице-президент Российской академии наук (РАН), подчеркнул, что для реализации природоподобных технологий необходимо активное участие в выполнении Указа Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». Среди приоритетных направлений «Стратегии» – переход к передовым цифровым технологиям, новым материалам и аддитивным технологиям, экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, персонализированной медицине, высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству, создание качественных продуктов питания, противодействие терроризму и идеологическому экстремизму, возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы, применение междисциплинарных методов естественно-научных, гуманитарных и социальных наук.

Материалы и конструкции, которые частично или полностью воспроизводят принципы и закономерности живой природы, доказавшие свою эффективность сотнями миллионов лет существования жизни на Земле, называют природоподобными. За столь длительный период природа выработала эффективные стратегии синтеза разнообразных материалов, демонстрирующих исключительные механические, тепловые и оптические свойства, а также обладающих многофункциональностью. Структура строения живых организмов помогает выполнять им такие функции, как защита от хищников, питание, обеспечение прочности и т. д. С древних времен люди прибегали к заимствованию конструкторских решений и специфики животного и растительного мира для создания новых изделий, инструментов и сооружений, но природа имеет ограниченный выбор материалов для создания структур. Современные ученые и инженеры располагают широким спектром компонентов синтетических материалов. Изучая и понимая взаимосвязь между синтезом, структурой и свойствами биологических материалов, можно получать знания, необходимые для эффективного создания природоподобных материалов нового поколения.

Безопасность и эффективность выживания обеспечивают механические свойства природных материалов. Эти свойства делают живые организмы конкурентоспособными, что способствует их выживанию в сложной и изменчивой среде. Например, природная броня, устойчивая к истиранию или ударам, значительно

повышает эффективность охоты, легкий вес большинства птиц обеспечивает эффективность миграции, а рога некоторых животных, обладающие высокой прочностью на изгиб, используются в процессе внутривидовой конкуренции. Реализация уникальных механических свойств осуществляется благодаря их локальному изменению и определяет эффективное выполнение специфических функций, необходимых для выживания живых организмов. Так, например, в булавовидном придатке креветки-богомолы наблюдается значительный градиент минерализации, что объясняется наличием минеральных наночастиц, располагающихся на ударной поверхности, и отсутствием каких-либо волокон. Твердость и модуль упругости увеличиваются по направлению к поверхности булавовидного придатка и достигают максимума на ударной поверхности. Под ударной поверхностью находится область, в основном отвечающая за перераспределение напряжений и деформаций, что позволяет избежать значительных повреждений. В этой области располагаются высокоминерализованные хитиновые волокна, образующие елочный узор. Под высокоминерализованной ударной областью находится область со сложной структурой хитиновых волокон с уникальной спиральной организацией, называемой структурой Булигана (геликоидальная структура), которая снижает скорость распространения трещин.

Повышение эффективности выживания природных организмов обеспечивают не только высокие механические свойства, но и сверхлегкость природных материалов, поскольку при малом весе меньше потребляется энергии. Так, у птиц пневматическое (воздухоносное) строение костей с полостями обеспечивает уменьшение массы и устойчивость в полете. Крыло странствующего альбатроса топологически оптимизировано так, что только необходимое количество материала присутствует в определенных местах.

Существуют и другие природные материалы с полым строением, удовлетворяющие необходимым требованиям за счет локального армирования в определенных областях, например периодическое армирование дисками бамбука и экзоскелета жука. Снижения веса обеспечивает пенная структура иголок дикобраза, клюва тулкана, иголок ежа и перьев большинства птиц.

Умные природоподобные структуры, имитируя природные реакции на внешнее воздействие окружающей среды, активируются под воздействием температуры, влажности, света, электричества и магнитных полей, что приводит к изменению формы. Создание функциональных природоподобных материалов и структур позволяет получать ценные знания и опыт для инновационных разработок в различных областях науки и техники.

Биологические особенности живых организмов представляют собой возможности, которые далеко выходят за рамки обычных инженерно-технических систем. Как следствие, ученые начали задаваться важным вопросом: как можно воспроизвести/адаптировать природные структуры в инженерно-технической среде, используя при этом перспективные материалы и технологии? На основе природных структур создаются коммерческие продукты для различных сфер деятельности. Воспроизведение принципов и закономерностей живой природы, то есть создание природоподобных материалов и конструкций, встречается в машиностроении и робототехнике, авиастроении и архитектуре. Функциональные природоподобные материалы и структуры, обладающие термо-, магнито-, электро-,

свето- и мультичувствительностью, применяют в регенеративной медицине, в имплантационных устройствах, используют для доставки лекарств, изготовления мягких роботов, бионических сенсоров, структур типа оригами, умного текстиля, «рассекречивания» и изготовления разворачиваемых систем.

Уровень воспроизводимости получаемых природоподобных материалов и структур зависит от выбранных технологий их получения. С применением передовых производственных технологий открываются новые перспективы для создания природоподобных материалов. Возможности получения упорядоченных разномасштабных природоподобных структур и конструкций расширяются с применением аддитивных технологий (АТ). Для разработки новых природоподобных материалов с помощью АТ необходимо понимание механизма формирования многомасштабной структуры природных материалов, управление процессами аддитивного производства (АП) при изготовлении природоподобных разномасштабных структур и понимание связи между структурой и функциональным применением новых природоподобных материалов, разработанных в процессе АП.

В главе 1 «Природные и природоподобные материалы» приведена классификация природных структур, рассмотрены природные материалы и структуры. Особое внимание уделено функциональным свойствам природных материалов и их взаимосвязи со строением организмов и растений. Показана взаимосвязь конструкций природных живых организмов и растений, обеспечивающая их функциональные свойства. На примере строения древесины и конструкции дерева рассмотрен механизм природного насоса, способного поднимать жидкость в дереве на десятки метров.

Глава 2 «Природоподобные металлические материалы с пространственным изменением химического состава» посвящена описанию аналогов природных материалов с пространственным изменением состава – функционально-градиентных материалов (ФГМ) по составу и мультиматериалов, а также покрытий, имеющих ограниченные возможности применения по сравнению с ФГМ и мультиматериалами.

Строение ФГМ меняется в процессе изготовления, что также обуславливает изменение свойств в зависимости от условий эксплуатации. Функционально-градиентные материалы по типу градиента подразделяют на материалы с градиентным составом, градиентной микроструктурой и градиентной пористостью. Технически ФГМ состоят из двух и более материалов, имеющих разные свойства. При постоянном изменении состава граница между разнородными материалами исчезает, свойства материала постепенно изменяются, появляется возможность реализовать программируемую и специфичную для конкретного объекта функциональность. Функционально-градиентные материалы могут состоять из материалов одного типа, но с разными свойствами и имеют уникальное соотношение состава и физико-механических свойств. Материалы с пространственным изменением состава можно получать и из биоматериалов, применяя технологии АП.

Комбинирование АП и принципа пространственного изменения состава позволяет получать новые функциональные объекты. В главе 2 описаны методы проектирования и моделирования природоподобных металлических материалов с пространственным изменением химического состава. При создании мультиматериалов, имеющих природоподобные принципы строения, используют индивидуальный подход и современные методы проектирования и компьютерного моделирования, включающие машинное обучение и искусственный интеллект. При проектировании

мультиматериальных изделий, изготавливаемых с использованием АТ, система цифрового проектирования изделий состоит из взаимодействующих модулей. Начинается процесс проектирования с определения функциональных и технических требований. Далее из базы данных выбираются материалы-кандидаты, свойства которых соответствуют предъявляемым требованиям. Затем выбирается соответствующий процесс АП для изготовления изделия из выбранных материалов, из базы данных процессов извлекаются соответствующие методики проектирования. На последнем этапе происходит непосредственное проектирование изделия.

В главе 3 «Природоподобные полимерные и металлические функционально-градиентные материалы» описаны технологии получения природоподобных функционально-градиентных материалов и свойства этих материалов. Используя метод биомимикрии, можно разрабатывать и оптимизировать композиционные материалы с улучшенной механической прочностью и надежностью. За счет создания структур, имитирующих природу, может быть достигнуто значительное повышение свойств полимерных композиционных материалов. Ключевую роль в создании таких структур играют технологии АП, позволяющие создавать программируемые свойства в любой точке материала и конструкции, обеспечивать упорядоченное расположение непрерывных волокон, получать функционально-градиентные структуры (сетчатые армированные конструкции) в одном слое, изготавливать сложнопрофильные конструкции деталей с градиентными структурами и программируемыми свойствами. Объединяя АТ и способы создания природоподобных материалов и структур, можно получать легкие и эффективные компоненты для аэрокосмической, автомобильной, медицинской и других отраслей промышленности.

Природоподобный механизм адаптации (с изменяющейся ориентацией волокон и их объемной доли) используют при создании искусственных материалов для улучшения характеристик композитов, в которых локальная жесткость изменяется за счет переменных ориентации и объемной доли волокон, как в древесине, в зависимости от полей напряжений. Эффективность метода моделирования и процесса 3D-печати продемонстрирована на природоподобной композитной пластине с отверстием, в которой непрерывные волокна были адаптированы к градиентным полям напряжений. Основное разрушение композитных пластин происходило вдали от отверстия, что говорит об эффективности применения природоподобных структур в изделиях конструкционного назначения. При переходе с однонаправленного армирования на изогнутое армирование напряжения уменьшаются, а количество волокон для пластины с изогнутым армированием на четверть меньше, чем для пластины с однонаправленными волокнами, при практически одинаковой предельной нагрузке пластин.

В главе 4 «Природоподобные функционально-градиентные пористые материалы и метаматериалы и конструкции на их основе» представлены разнообразные материальные и структурные градиенты, существующие в биологических материалах и обеспечивающие большое количество примеров для проектирования ФГМ. Изучение закономерностей градиентного построения биологических природных материалов необходимо для решения задач инженерной механики. Высокая сложность моделей строения биологических ФГМ создает трудности получения материалов при использовании классических технологий. Наиболее перспективными методами изготовления природоподобных ФГМ являются АТ, которые позволяют

изготавливать различные природоподобные материалы как с материальными, так и со структурными градиентами.

Природоподобные материалы, полученные в процессе АП, превосходят свои синтетические эквиваленты или выполняют необходимые функции с использованием биологически совместимых ресурсов. Фундаментальная способность технологий АП послойно контролировать структуру и химический состав делает их перспективными для имитации структур пористых биологических материалов.

Природным прототипом ячеистых материалов являются сердцевина костей (особенно у птиц), личинки некоторых насекомых и соты пчел, из-за визуального сходства с которыми данные материалы и получили свое название. Геометрия природных ячеистых материалов и конструкций может варьироваться в широких пределах, но в общих чертах каждая из этих структур представляет собой массив из полых ячеек, образованных тонкими вертикальными стенками.

Дальнейшим шагом в развитии природоподобных структур является переход к изготовлению метаматериалов на основе природных геометрий. Метаматериалы, представляющие собой новый класс синтетических материалов, характеризуются сложными повторяющимися узорами на микро- или наноуровне, обладают уникальными функциями, такими как манипулирование механическим напряжением или волнами трибологического напряжения, и определяются специфической формой ячеистых структур, геометрией, размером, ориентацией и расположением. Использование природных геометрий для получения таких материалов является перспективным направлением науки и техники.

В главе 5 «Материалы с природоподобной геликоидальной структурой» описаны материалы с одной из наиболее интересных природоподобных структур, формирующихся путем последовательной укладки слоев волокон таким образом, чтобы центры осей волокон, имеющих одинаковый порядковый номер в рамках слоя, образовывали винтовую линию. Такая структура часто встречается в природе, например у членистоногих, насекомых и рыб.

Одним из ключевых механизмов сопротивления разрушению в геликоидальных материалах является отклонение трещины. При распространении трещины по материалу происходит ее столкновение со спиральными слоями, которые ориентированы под углом к направлению трещины. В результате трещина отклоняется и меняет направление, при этом эффективно замедляется ее распространение и уменьшается концентрация напряжений в вершине трещины. Другим механизмом является расслоение. При приложении к материалу нагрузки слои хитина деформируются упруго, но по мере увеличения нагрузки происходит переход от упругой деформации к пластической. Пластическая деформация приводит к отделению слоев друг от друга и к образованию зоны расслоения, которая эффективно увеличивает площадь поверхности материала и обеспечивает дополнительное сопротивление распространению трещин.

Уникальные конструкционные и функциональные характеристики природных структур создают потребность в их воспроизведении в реальных изделиях. Однако геометрическая конфигурация подобных структур сложная, что приводит к значительным трудностям при получении изделий с природоподобной структурой классическими производственными технологиями. Структурные элементы, морфологически восходящие к биологическим системам, включают трубчатые,

волокнистые, градиентные, ячеистые, иерархические и спиралевидные структуры. Используя аддитивные технологии, основанные на инновационном принципе послойного добавления материала, для создания деталей сложной геометрии, можно значительно сократить временной разрыв между проектированием и производством, обеспечивая тем самым эффективный подход к изготовлению природоподобных структур. С применением технологий АП для синтеза природоподобных материалов и структур создаются перспективы для разработки принципиально новых высокоэффективных материалов для поглощения энергии удара, терморегулирования и изменения формы в процессе эксплуатации.

Вызывают интерес природные и природоподобные материалы, описанные в главе 6 «Природоподобные материалы с низким модулем упругости». Природа является источником невероятного разнообразия материалов, обладающих уникальными свойствами. В последние десятилетия исследователи, инженеры и дизайнеры все чаще обращаются к природе для разработки новых материалов, которые эмулируют ее удивительные характеристики. Одним из примеров природоподобных материалов является бамбук, обладающий высокой прочностью и гибкостью благодаря своей микроструктуре. Множество волокон, объединенных в похожую на композитную структуру, обеспечивают оптимальную прочность и устойчивость при различных воздействиях. Подобные принципы могут быть применены для разработки новых композитных материалов с высокой прочностью и низкой массой.

Один из самых ярких примеров оптимизированного природного материала — кости, выполняющие ключевые механические функции в эндоскелете и являющиеся точками опоры для мышц. Костная ткань обладает уникальной структурой, сочетающей в себе органические и неорганические компоненты, что придает ей исключительные механические свойства. Основными составляющими костной ткани являются коллагеновые волокна и кристаллы гидроксиапатита. Коллаген, будучи основным органическим компонентом, обеспечивает эластичность и прочность на разрыв, тогда как неорганический компонент, гидроксиапатит, придает кости твердость и устойчивость при сжатии. Такая композиция позволяет костной ткани выдерживать значительные нагрузки и при этом оставаться легкой и способной к самовосстановлению.

Создание и использование природоподобных материалов и структур при изготовлении имплантатов представляет собой перспективное направление в биомедицинской инженерии. Природоподобные материалы стремятся имитировать как механические, так и биологические свойства костной ткани, что позволяет добиться лучшей интеграции имплантатов с живыми тканями. Эти материалы могут обеспечивать оптимальное распределение механических нагрузок, что минимизирует риск экранирования напряжений и, следовательно, снижает вероятность резорбции кости и отторжения имплантатов. Кроме того, такие материалы и конструкции способствуют росту и дифференцировке клеток, что ускоряет процесс остеоинтеграции.

Для улучшения характеристик биомедицинских сплавов и их приближения к природным материалам можно использовать два основных подхода. Первый подход заключается в модификации свойств самих материалов. Снижая модуль упругости до уровней, близких к костной ткани, можно существенно уменьшить эффект экранирования напряжений и сохранить здоровье прилегающей кости. При использовании нетоксичных легирующих элементов не происходит

токсичных реакций, что способствует улучшению биосовместимости материалов. Второй подход — это создание природоподобных конструкций, имитирующих естественные структуры костной ткани. Современные технологии, такие как АП, позволяют создавать сложные сетчатые и пористые структуры, которые имитируют архитектуру костной ткани. Такие конструкции не только обеспечивают механическую поддержку, но и создают благоприятные условия для роста клеток и формирования новой костной ткани. Сетчатые структуры могут быть оптимизированы для улучшения биомеханических свойств и ускорения процесса остеоинтеграции, что делает их особенно перспективными при использовании в ортопедических и стоматологических имплантатах. Комбинируя модификацию материала и тип природоподобных структур, можно значительно улучшить характеристики биомедицинских сплавов, обеспечив их соответствие естественным тканям организма и повысив функциональность и долговечность.

В главе 7 «Природоподобные конструкции для систем охлаждения и виброустойчивого инструмента» описаны существующие в природе механизмы терморегуляции, позволяющие растениям, животным и насекомым выживать в экстремальных условиях и эффективно справляться с тепловыми нагрузками. Эти естественные системы охлаждения не только поддерживают жизнеспособность организмов, но и представляют собой потенциальные источники вдохновения для инженерных решений.

Природными решениями охлаждения, используемыми различными биологическими системами для защиты своих структур и обеспечения устойчивой терморегуляции, являются капиллярная система растений, система охлаждения крыльев бабочек, акуля чешуя и др. Капиллярная система растений, в частности ксилемы, обеспечивает эффективное продвижение воды по всему растению. Изучение асимметричных капилляров в растениях позволяет использовать эту концепцию для охлаждающих систем в технологических установках, таких как лопатки турбин. Данные поведения воды в несимметричных линейных капиллярах свидетельствуют о том, что особенности капиллярной системы позволяют эффективно распределять жидкость, это может быть полезно и при жидкостном охлаждении турбинных лопаток. Асимметричное расположение боковых капилляров обеспечивает дополнительное перераспределение жидкости, позволяя ей достигать даже самых труднодоступных участков.

Одним из вариантов терморегуляции в природе является морфологическая терморегуляция, достигаемая с помощью какой-либо формы или структуры для поддержания температуры в пределах жизнеспособного диапазона для выживания. Морфологическая терморегуляция может осуществляться посредством циркуляции воздуха, при которой избыточное тепло постоянно отводится за счет конвекции. Например, в курганах термитников это достигается благодаря особой структуре, обеспечивающей постоянную температуру, высокую влажность и низкую концентрацию углекислого газа внутри.

Анализ мировых трендов в области повышения эффективности работы газовых турбин показал, что перспективным направлением является использование природоподобных конструкций, новых производственных технологий и материалов при изготовлении газотурбинных лопаток. Анализ модели Diamond, выполненный при изучении теплообмена в турбулентном потоке и тепловых напряжений структуры на основе ТППП (топология Diamond) в канале охлаждения лопатки газовой турбины,

показал, что модель Diamond более равномерно распределяет поток по всему каналу, чем базовая структура pin fin. Рециркуляционный поток на внутренней стенке и в канале значительно снижается благодаря взаимосвязанным изогнутым стенкам сети Diamond. Теплоотдача, коэффициент трения и тепловые характеристики в модели Diamond увеличиваются по сравнению с базовой структурой.

Более низкие температуры потока наблюдались в области наконечника и в зоне нагрева при установке структуры Diamond в клиновидный канал. Также была замечена равномерность температуры, особенно на выходе из канала. Структура Diamond продемонстрировала равномерную температуру на поверхности, а также более низкие температуры, чем базовая модель. В обоих случаях наибольшая деформация наблюдалась на выходе. Модель Diamond в клиновидном канале помогла уменьшить объемное смещение в результате теплового расширения материала по сравнению с базовой структурой. Смещение в модели типа Diamond было меньше и распределено равномерно. В модели Diamond равномерная деформация может уменьшить внезапное появление трещин на лопатке задней кромки газовой турбины.

Вибрация, удары и импульсы, превышающие технологические пределы работы забойного оборудования, могут привести к поломке инструмента, преждевременному износу вооружения долота и тем самым к снижению производительности. При выходе из строя элементов компоновки низа бурильной колонны может произойти долговременная остановка бурения скважины с последующим значительным материальным ущербом для сервисной компании и компании-заказчика. В конструкции забойного оборудования ответственными узлами являются забойный двигатель и породоразрушающий инструмент. Для снижения вибраций, гидродинамики в целях охлаждения вооружения долота и качественной очистки забоя от выбуренной породы, для увеличения частоты вращения долота и сбалансированной работы компоновки низа бурильной колонны необходимо создать оптимальную конструкцию долота и силовой секции забойного двигателя.

При разработке оборудования со сложной геометрией можно использовать природообразные конструкции и АТ, что позволит создать сложные геометрические формы деталей из прочных и износостойких материалов, имеющих градиентную ударопрочную структуру. Проектирование оборудования устойчивых природных форм органического и неорганического мира – это возможность выхода на качественно новый уровень в области создания нового и совершенствования существующего оборудования, работающего на ответственных и стратегически важных объектах энергетики Российской Федерации.

Мы выражаем благодарность тем сотрудникам университета, которые помогли в подготовке монографии, особенно в предоставлении фотографий и рисунков. В частности, мы хотим поблагодарить Арсения Репнина, Евгения Борисова, Антона Сотова, Дмитрия Масайло, Вадима Суфиярова, Игоря Полозова и Кирилла Старикова.

Монография написана при поддержке Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-562 от 25.04.2024 «Научные основы создания природоподобных материалов и конструкций с заданным комплексом свойств с использованием передовых технологий цифрового проектирования, моделирования и аддитивного производства».