

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография «Перспективные материалы и технологии аддитивного производства» состоит из двух томов. В первом томе рассмотрены новые материалы для аддитивных технологий.

Большинство современных материалов получают уникальные свойства благодаря материальному составу, использование метаматериалов обусловлено их микроструктурной геометрией. Свойства метаматериалов, такие как проницаемость, коэффициент преломления и модуль упругости, основаны на геометрии структур и составляющих их метаатомов и отличаются от свойств составляющих материалов. В монографии подробно рассмотрены различные типы данных материалов – решетчатые, ячеистые и хиральные. Показано, что с точки зрения дизайна метаматериалы представляют собой спроектированные микроструктуры для получения аномального механического отклика на макроуровне при сохранении их материала в изотропном состоянии, что является наиболее типичным отличием метаматериалов от композитных материалов. Выявлению этих ключевых особенностей метаматериалов уделено особое внимание, что помогает понять принципы проектирования и оптимизации перспективных материалов.

Возможности аддитивного производства (АП) привлекли внимание исследователей метаматериалов для использования этого подхода в качестве мощного инструмента для изготовления нового поколения метаматериалов. Возможность изготовления свободно стоящих сложных 3D-геометрий, низкая стоимость производства и прямое изготовление из CAD-проекта улучшают процесс проектирования. Это позволяет исследователям изготавливать сложные структуры с заданными оптическими, акустическими и механическими свойствами.

В монографии подробно рассмотрены примеры использования аддитивного производства для изготовления тканеинженерных скаффолдов. В частности, представлено четыре уровня геометрии тканеинженерных скаффолдов: топография поверхности, размер и геометрия пор, пористые сети и макроскопическое расположение пор, включая потенциал для функционально-градиентной структурной геометрии. Показано, что расположение и ориентация нитей влияют на механические свойства скаффолдов. Для материала скаффолда пористость может быть наиболее важным фактором, определяющим ее механические свойства.

В монографии представлены технологии аддитивного производства для изготовления металлических каркасов и обобщены результаты исследований металлических материалов, включая небiorазлагаемые металлы (сплавы титана, тантала и нержавеющей стали) и биоразлагаемые металлы (сплавы железа, магния и цинка). Рассмотрены структурные характеристики каркасов из пористого металла и методы их проектирования, оценены преимущества и ограничения этих методов и направления развития костных каркасов. Показано, что размер пор и пористость являются важными структурными параметрами, которые влияют на механические свойства и биосовместимость костных каркасов. Правильный размер пор может обеспечить пространство для роста клеток, а правильная пористость – транспортировку питательных веществ и метаболитов в костную ткань. Форма пористой структуры каркаса также связана с биосовместимостью и механическими свойствами: непрерывная и гладкая пористая структура позволяет избежать концентрации напряжений и облегчает прикрепление клеток к поверхности каркаса.

Для формирования метаматериалов могут быть использованы металлургические принципы. Так, материаловедом хорошо известно, что высокие эксплуатационные характеристики дуплексных сталей обеспечивает правильное сочетание и относительное расположение ОЦК- и ГЦК-решеток. При использовании технологий послойного синтеза можно управлять и программировать расположение и вид топологии ячеистых структур, а следовательно, более гибко настраивать конструкцию в целом и конкретные характеристики в частности.

Еще один пример проектирования конструкций с учетом металлургического опыта базируется на упрочнении дисперсионно-стареющих и дисперсно-упрочненных сплавов. Создавая области с более высокой плотностью, а значит, и более высокой прочностью, можно управлять распределением напряжений, так же как торможением дислокаций в дисперсно-упрочненных материалах, например в дуралюмине или нимонике. Таким образом, благодаря применению комбинаций различных топологий ячеистых структур можно проектировать свойства и поведение конструкции с использованием подходов микроуровня на мезоуровне.

Среди перспективных материалов для АП особое место занимают так называемые умные материалы (*smart-material*). В монографии подробно рассмотрены данные материалы и особенно металлические сплавы (нитинол) и неметаллические (пьезокерамика). Показано, что получение сплавов с памятью формы (СПФ) системы Ti–Ni традиционными металлургическими технологиями остается трудоемким и дорогостоящим процессом, даже для получения изделий простой формы, например таких, как проволока, пружина, слиток, труба и т. д. Данные задачи можно решить, используя технологии аддитивного производства. Среди методов аддитивного производства, применяемых для получения образцов и изделий из сплава TiNi, наиболее активно используют такие методы, как селективное лазерное плавление (*selective laser melting, SLM*), электронно-лучевая плавка (*electron beam melting, EBM*), прямой подвод энергии и материала (*direct energy deposition, DED*).

По сравнению с традиционными технологиями, применяемыми при создании СПФ TiNi, аддитивные лазерные технологии представляют возможность изменить параметры формования непосредственно во время процесса, таким образом, часть материала может иметь иную микроструктуру, свойства, иной химический состав. Производство материалов с эффектом памяти формы из никелида титана аддитивными методами сопровождается рядом негативных эффектов: это способность титана, входящего в сплав, образовывать нежелательные включения в материале, формирование пор и однонаправленность образованных в процессе сплавления вытянутых зерен.

Способность сплавов с памятью формы восстанавливать исходную форму в ходе разгрузки после значительных деформаций (до 10 %) делает их перспективными для использования в различных областях промышленности (машиностроение, станкостроение, медицина, автомобильная и авиационная промышленность, приборостроение, радиоэлектроника, нефтяная и газовая промышленность) и для изготовления термомеханических соединений, например муфты для надежных и легкоразборных термомеханических соединений трубопроводов и элементов конструкций; термосиловых исполнительных элементов (актуаторов), способных при естественном или принудительном изменении температуры выполнять определенную работу за счет реализации реактивного усилия в условиях восстановления формы при внешнем механическом противодействии; тепловых двигателей; температурных датчиков и терморегуляторов.

Благодаря высоким эластичным свойствам и способности к изменению формы под действием температуры, а также инертности к биологическим структурам СПФ на основе Ti–Ni применяют в медицине в качестве инструментов и имплантируемых в организм длительно функционирующих материалов. Широкий температурный гистерезис мартенситного фазового перехода наиболее сильно проявляется в пористых и сетчатых структурах, что позволяет использовать сплавы в большом температурном интервале.

В монографии также представлены умные материалы на основе полимеров. Полимеры с эффектом памяти формы (ЭПФ) представляют серьезную альтернативу известным металлическим сплавам с аналогичными свойствами, а в ряде случаев значительно превосходят их. ЭПФ в большинстве случаев проявляется в двухфазных системах, где каждая из фаз имеет свою область температур плавления и стеклования. Полимеры, обладающие ЭПФ, представляют собой, как правило, блок-сополимеры. В то же время двухфазная система может быть сформирована и в условиях механического смешения. Это открывает большие возможности создания новых материалов, так как имеется перспектива изменять их свойства в широких пределах в процессе формирования требуемой морфологии.

В монографии подробно рассмотрены различные типы функционально-градиентных материалов (с переменным химическим составом, с переменной плотностью и переменной микроструктурой), а также процесс изготовления данных материалов с помощью аддитивных технологий.

Многокомпонентные высокоэнтропийные сплавы являются новым классом материалов. Вариативность элементного состава позволяет получать ряд уникаль-

ных свойств для высокоэнтропийных сплавов (высокотемпературная прочность, супермагнетизм, сопротивление коррозии и износу, высокая твердость наряду с пластичностью), что существенно расширяет области их применения: режущие инструменты, штампы, детали машин, покрытия и диффузионные барьеры (тонкие слои толщиной от 10 нм).

В монографии подробно рассмотрена технология синтеза высокоэнтропийных сплавов различного назначения: AlCrFeNiSiTi, AlCrNbSiTi, CoCrFeNiMnW. Приведены исследования технологий сфероидизации и компактирования полученных порошков различными технологическими приемами, в том числе методом АП.

Важным шагом в конструировании деталей является адаптация их для процесса изготовления. При этом оптимизация конфигурации детали, расположения структурных зон, тонкостенных и сетчатых элементов с использованием цифрового проектирования – ключевое направление развития аддитивных технологий. Это позволит находить решения, недостижимые при традиционном проектировании и конструировании. Объединение проектирования, оптимизации и изготовления в единую систему формирует новый подход к цифровому производству.

Необходимо отметить, что проектирование не только конфигурации изделий, но и свойств материалов, из которых это изделие изготавливается, является ключевым направлением развития аддитивных технологий. В настоящее время процесс создания турбинных лопаток для теплонапряженных газотурбинных двигателей 5-го поколения индивидуален для каждого двигателя. По сути, это кастомизированный продукт. Лопатки представляют собой ажурную конструкцию со сложной системой внутренних полостей. Высокую работоспособность и ресурс лопаток такой конструкции можно обеспечить формированием равноосной, направленной или монокристаллической структуры в заданных ее элементах. Используя аддитивные технологии (АТ), можно создать функционально-градиентные материалы (ФГМ) с требуемыми свойствами в каждом элементе за один технологический цикл.

Я хотел бы поблагодарить коллег – кандидатов технических наук, докторантов и аспирантов, которые помогли мне в подготовке монографии, особенно в предоставлении микрофотографий и рисунков, представляющих перспективные материалы и технологии, используемые в аддитивном производстве. В частности, я хотел бы поблагодарить Николая Разумова, Вадима Суфиярова, Евгения Борисова, Игоря Полозова, Кирилла Старикова и Ирину Мутьлину. Наконец, я хотел бы поблагодарить Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого за предоставленную возможность опубликования монографии и поддержку в ее подготовке.

Мои особые слова благодарности ректору СПбПУ академику А. И. Рудскому, вдохновившему меня на написание двух томов монографии.