

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых материалов является одним из ключевых направлений развития современного мира. Эволюция материалов от монолитных однокомпонентных до сложных сплавов и композиционных материалов основывается на ограничении свойств одного класса материалов, что ведет к разработке их новых типов. В большинстве случаев от материалов требуется одновременное наличие противоречащих друг другу свойств, что невозможно в монолитном материале.

При изучении живой природы можно отметить организацию механически нагруженных элементов, таких как стебли растений и стволы деревьев, кости животных, раковины моллюсков и другие твердые биологические ткани. Хорошо заметно, что геометрия изменяется в соответствии с окружающей средой. Это означает, что они адаптированы ко всем внешним условиям и условиям нагрузки, определяемым окружающей средой. Только самая оптимальная и экономичная конструкция способна выдержать острую конкуренцию за выживание при минимальном количестве ресурсов, доступных им в их ограниченном жизненном пространстве. Например, внутреннее строение кости имеет оптимизированную форму в отношении направления основных нагрузок. Это объясняется оптимизированной механической конструкцией, которая характеризуется равномерным распределением напряжений без локализованных пиков и концентраторов. Лист кокосовой пальмы, например, по существу представляет собой консоль, использующую концепцию армирования волокнами. Древесина – волокнистый композит: волокна целлюлозы в матрице из лигнина. Целлюлозные волокна имеют высокую прочность на растяжение, но очень гибкие (т. е. с малой жесткостью), в то время как лигниновая матрица соединяет волокна и обеспечивает необходимую жесткость. В процессе эволюции на протяжении многих лет происходил естественный отбор наиболее приспособленных особей, которые сохраняли только оптимальные модификации строения. Таким образом, форма и умная конструкция твердых биологических тканей являются результатом непрерывного процесса оптимизации в естественной среде.

Основные характеристики биологических тканей, такие как внутреннее строение, функции и организация, вдохновляют проектировщиков инженерных сооружений. Принципиальное отличие биологических структур от

искусственных состоит в том, что в подавляющем большинстве в живых организмах этим структурам свойственны полифункциональность и адаптивность. Следовательно, биологические структуры сложны и неоднородны. Это говорит о том, что разумное и функциональное сочетание элементов, материалов и компонентов с различным назначением и характеристиками в одной и той же конструкции может привести к созданию гибридных систем, свойства которых будут наилучшим образом оптимизированы для конкретных целей.

Одним из первых примеров применения функциональных материалов в промышленности является создание композиционных материалов (КМ). Распространенные примеры – сажа в каучуке, цемент или асфальт, смешанный с песком, и стекловолокно в смоле. Идея композиционных материалов возникла достаточно давно, совместные исследования и разработки в области композитных материалов начались в 1965 г. С начала 1960-х гг. наблюдается растущий спрос на более жесткие и прочные, но легкие материалы в таких областях, как аэрокосмическая, энергетическая и гражданская промышленность. Требования, предъявляемые к материалам для улучшения общих характеристик, настолько велики и разнообразны, что ни один материал не может их удовлетворить. Это естественным образом привело к возрождению древней концепции объединения различных материалов в цельно-композитный материал для удовлетворения требований пользователя. Такие системы композитных материалов обеспечивают характеристики, недостижимые для отдельных компонентов, и демонстрируют большое преимущество гибкой конструкции, т. е. в принципе можно изготовить материал на заказ в соответствии со спецификацией оптимальной конструкции. Это означает, что, имея наиболее эффективную конструкцию, например, планера, автомобиля, лодки или электродвигателя, можно изготовить композиционный материал, который удовлетворит возникшие потребности. Шир и Юргенс (1983 г.) исследовали влияние композитов на конструкцию истребителя. По их мнению, «композиты привнесли необычайную гибкость в проектирование, фактически вынуждая дизайнера-аналитика создавать разные материалы для каждого приложения, поскольку он стремится к экономии веса и стоимости».

Однако невозможность достижения необходимых свойств композиционных материалов при работе в жестких условиях, а именно образование трещин на границе раздела между их отдельными компонентами, привела к необходимости разработки нового типа материалов. С этой проблемой столкнулись японские исследователи при работе над космическим летательным аппаратом в период 1987–1991 гг. Исследователям удалось решить проблему образования трещин между основным материалом и материалом термического покрытия путем создания плавного перехода химического состава от одного материала к другому. Таким образом, полученный функционально-градиентный материал (ФГМ) обладал способностью выдерживать повышенные температуры за счет снижения концентрации напряжений. В дальнейшем ФГМ начали применяться в других

инженерных областях. Основным ограничивающим фактором для применения ФГМ в ряде отраслей промышленности является их высокая стоимость производства.

ФГМ традиционно характеризуются плавным изменением состава или структуры по объему образца в соответствии с некоторой закономерностью. Это создает возможность регулирования свойств материала и получения продуктов с необычными характеристиками. В первом приближении ФГМ можно представить как слоистый материал, поверхностный слой которого по своим эксплуатационным свойствам резко отличается от нижерасположенного объемного материала, например стальное изделие с высокопрочным азотированным или карбидным покрытием. Такие поверхностные слои из любых соединений можно получить различными способами, но это поверхностное упрочнение изделия, и основная проблема обусловлена тем, что поверхностный слой имеет свою кристаллическую решетку. Это неизбежно приводит к внутренним напряжениям на границе покрытие–основа. В ФГМ этой резкой границы нет, а есть плавный переход состава поверхностного слоя в материал основы.

ФГМ можно встретить в различных объектах, существующих в природе, например в костях, зубах, древесине, бамбуке и др. Высокая износостойкость, которая требуется внешней поверхности человеческих зубов, является причиной того, почему природа спроектировала зубы, как ФГМ. Внешняя часть зубов состоит из эмали – материала с высокой износостойкостью, в то время как внутренняя часть зубов – более вязкого материала, который служит для смягчения ударных воздействий и повышения усталостных характеристик.

Однако, несмотря на то что ФГМ изначально были разработаны в качестве температурных барьеров, области их применения в настоящее время значительно шире и позволяют решить ряд таких проблем, как, например, повышение износостойкости или коррозионной стойкости материала.

Традиционные процессы производства ФГМ включают в себя дробеструйное упрочнение, ионную имплантацию, термическое напыление, электрофоретическое осаждение и химическое парофазное осаждение. Использование аддитивного производства (АП) дает возможность изготовления геометрически сложных деталей за счет точного размещения материалов контролируемым путем. Технология послойного изготовления, изменяющая параметры процесса и постепенно варьирующая пространственную организацию материалов в рамках одного компонента для выполнения целевой функции, называется функционально-градиентным аддитивным производством (ФГАП).

Целью использования ФГАП является изготовление компонентов произвольной формы, основанной на требованиях к эксплуатационным показателям за счет свойств градиентных материалов. В отличие от обычного АП с одним или несколькими материалами, в котором основной акцент делается на прототипирование с упором на форму, ФГАП – это процесс изготовления с упором на материал, который представляет собой радикальный переход от

контурного моделирования к моделированию эксплуатационных показателей. Поскольку функциональность, обеспечиваемая эксплуатационными показателями, встроена прямо в материал, она предоставляет фундаментальное преимущество и значительно улучшает технологии АП. Количество, объем, форму и расположение армирующих элементов в матрице материала можно точно контролировать для достижения необходимых механических свойств для конкретной задачи [6].

Потенциальный состав материала, достижимый с помощью ФГАП, разделяют на три вида: переменное уплотнение в рамках однородного состава; неоднородный состав за счет одновременного сочетания двух или более материалов посредством постепенного перехода; использование комбинации переменного уплотнения в неоднородном составе.

ФГАП позволяет производить конструкции путем рационального регулирования пространственного положения (например, плотность и пористость) и морфологии решетчатых структур по всему объему сплавленного материала [9]. Данный вид материала называют ФГАП с переменным уплотнением (также существует название ФГАП с градиентной пористостью). В [15] этот метод называют методом быстрого прототипирования, заимствованным у природы, поскольку оно имитирует материалы, встречающиеся в природе, такие как радиальные градиенты плотности у пальм, губчатая трабекулярная структура костей и изменение тканей в мышцах, неоднородных по упругости и жесткости. Анизотропность, размеры и плотность вещества в монолитной анизотропной композитной структуре способствуют функциональным отклонениям от нормы для изменения физических свойств и создания функциональных форм посредством структурной иерархии.

ФГАП с одним материалом с переменным уплотнением продемонстрировано в [11] на функционально-градиентном бетоне: функциональный градиент плотности имитирует клеточные структуры пальмы с радиальным градиентом плотности от твердой внешней части к пористой сердцевине. Градиент пористости был достигнут изменением размеров частиц порошка, которые переназначены для различных точек в процессе градации, и путем изменения параметров производственного процесса [9]. В [11] плотность контролировали по совокупности содержания воды в бетоне в любой конкретной точке, что приводило к высокому соотношению прочности и массы.

Аддитивное производство с несколькими материалами (АПНМ) выполняют с помощью обычных 3D-принтеров с несколькими головками сопел для подачи различных материалов на платформу [8]. ФГАП с несколькими материалами улучшает межповерхностные связи путем устранения четких границ между разнородными или несовместимыми материалами. Концентрации механических напряжений и термические напряжения, вызванные разными коэффициентами расширения, значительно снижаются [18].

В [2] рассмотрено влияние взаимодействия материалов в слоистых конфигурациях для достижения оптимального сочетания свойств компонентов, таких как масса, твердость поверхности, износостойкость, ударопрочность

или ударная вязкость. Влияние сложной морфологии в производстве градиентных материалов на изменение физических, химических, биохимических или механических свойств рассмотрено в [10, 12]. Геометрическое расположение двух фаз определяет общие свойства материала и допуск при проектировании, при этом точность изготовления необходимо контролировать, чтобы итоговый компонент соответствовал предъявляемым требованиям [18].

Непрерывные изменения в трехмерном пространстве можно получить путем регулирования соотношений смешивания двух или более материалов до размещения и затвердевания веществ [9]. К ФГАП относят только те процессы, где изменения состава контролируются компьютерной программой [14]. Изделия ФГАП с многослойной структурой разделяют на четыре вида: переход между двумя материалами, переход между тремя материалами или больше, перемена состава в различных точках и неоднородные составы с изменением плотности.

Изменение материала внутри неоднородного компонента классифицируют как одно-, двух- и трехмерный градиент [13]. Ключевые параметры включают в себя размерность градиентного вектора, геометрическую форму и разделение эквипотенциальных поверхностей.

Эксплуатационные показатели ФГМ определяются градиентным переходом [18]. При работе с материалами, обладающими переменными или неравномерными свойствами, встречается больше сложностей по сравнению с материалами с постоянным составом. Сложнее выбрать общую геометрию изделия, определить оптимальное пространственное распределение между разнородными материалами и прогнозировать скорость постепенного изменения свойств. Это обусловлено тем, что не все материалы с близким составом совместимы или пригодны для создания постепенного изменения свойств, особенно при работе со сплавами в реальных условиях. Существует большое количество вариантов организации фаз, поэтому необходимо установить правила и методы проектирования (например, требуемый набор свойств, требуемое расположение фаз и совместимость материалов) во избежание нежелательных фаз. Знание взаимосвязи между обработкой, структурой и свойствами для существующих материалов требуется для прогнозирования эксплуатационных показателей деталей.

Выбор материалов для систем АП довольно ограничен [20]. При необходимости использования нескольких составов сложность увеличивается, а объем смешивания ограничивается, при этом следует не только учитывать поведение и совместимость всех граничащих между собой материалов и эффективность перехода, но также выбирать правильные материалы для получения требуемых свойств в определенном агрегатном состоянии, учитывая выбранную технологию АП и пригодность для обработки. Системы экструзии материала и синтеза на подложке можно использовать для печати несколькими материалами.

ФГАП оптимизирует применение материалов и расширяет набор инструментов проектирования, доступный в аддитивных технологических процессах

за счет потенциального использования нескольких материалов [1, 17]. ФГАП расширяет возможности обработки материалов и способствует эффективной экономии материалов [16].

ФГАП может обеспечить нужное изменение свойств на небольшом участке, в конкретном месте или в ключевых точках в объеме материала детали [14]. Существует потенциал уменьшения количества материала поддержек, поскольку компоненты ФГАП можно спроектировать как самостабилизирующиеся в процессе построения с минимальным количеством опорных элементов. ФГМ также позволяют создавать опоры с переменными свойствами, в которых могут быть участки, облегчающие их удаление.

Производство ФГМ – это сложный процесс, требующий обширных знаний об ограничениях материала и производственных ограничениях. Среди важнейших задач выделяют выбор материала, определение оптимального распределения свойств материала, подтверждение свойств материалов и изделий, установление допусков и прогнозирование свойств [18].

Возможность изготовления ФГМ с точным позиционированием и высоким разрешением является важной задачей, особенно на микро- и наноровне. Для ФГАП необходима система подачи материала, которая, быстро и точно подавая материал, меняет материалы между слоями и внутри них [14]. Обеспечить смешивание материалов и изменение расхода каждого экструдера может только установка с несколькими подающими шнековыми экструдерами и бункерами.

На сегодняшний день ФГАП может быть реализовано с использованием технологий печати PolyJet, например в установках Objet Connex. Данная установка способна реализовать сложные внутренние структуры трехмерных объектов путем струйного нанесения нескольких материалов для создания композитных материалов с заранее заданными сочетаниями механических и физических свойств. Другим вариантом является перспективная технология холодного распыления [5], в которой частицы на высокой скорости из сверхзвукового потока газа ударяют по подложке, вызывая интенсивную пластическую деформацию частиц, при использовании двух устройств подачи порошка, данный метод может быть использован в качестве ФГАП.

Для развития ФГАП требуется новый подход к анализу – методами компьютерного моделирования (CAE), который позволит задавать, моделировать и управлять информацией о материале для локального контроля состава (ЛКС) [4]. Данные ЛКС можно отправить в установку в виде послойных пиксельных листов, чтобы при их наложении получался воксел. Современные информационные технологии аддитивного производства дают возможность рационального управления плотностью и анизотропностью веществ для получения окончательной формы. Поддерживающее программное обеспечение должно быть способно наслаивать или смешивать разнородные материалы, контролировать изменения жесткости посредством логического распределения твердых и мягких материалов по всей геометрии, в том числе цвет, текстуру и другие характеристики.

Для описания решетчатых структур в моделях на основе материалов используются такие подходы, как воксели (графическая методология на основе вокселей), конечные элементы (МЭК/АМЭК), элементы системы частиц и элементы нечеткого дискретного моделирования (НДМ), редактирование данных затруднено из-за отсутствия надежного способа связывания и интегрирования информации с моделями и анализом.

Существует несколько форматов обмена данными: AMF (формат аддитивного производства), FAV (воксел, который можно изготовить) и 3MF (формат 3D-производства). Они подходят для использования в ФГАП в целях цифрового представления градиентов и свойств материала помимо описания геометрической формы [17].

AMF дает возможности (помимо спецификации материала), которые хорошо подходят к ФГАП: смешанные и градиентные материалы и поддержки; создание новых материалов как композиции из других материалов; пористые материалы.

FAV – первый формат 3D-данных с возможностью сохранения информации о поверхности геометрической электронной модели, внутренних конструкциях, цвете, материалах и прочности соединения [7]. Данные 3D-модели в формате FAV, оптимизированные для изготовления, включают в себя сведения, необходимые для изготовления (например, форма, материал, цвет, прочность соединения) в трехмерном пространстве детали с учетом поверхностных и внутренних характеристик объекта. Каждому вокселю можно присвоить различные значения атрибутов, включая информацию о цвете (RGB, CMYK и т. д.) и о материале (АБС, нейлон и т. д.). Имеется возможность свободного моделирования и эффективного управления сложными внутренними структурами и атрибутами и контролируется взаимосвязь между различными вокселями, а затем эти данные сохраняются. Формат файла позволяет пользователю проектировать (САПР), анализировать (CAE) и проверять (CAT) данные 3D-модели на комплексной основе без необходимости преобразования данных. Данные модели FAV можно создавать, редактировать и использовать внутри систем (функциональная совместимость), способствуя проектированию трехмерных объектов с большей степенью свободы, например создавать функционально-градиентные конструкции с множеством материалов, точно распределенных в рамках той или иной конструкции с тесно переплетенными внутренними структурами.

Формат 3D-производства (3MF) позволяет приложениям для проектирования аддитивного производства отправлять максимально точные 3D-модели множеству других приложений, платформ, служб и принтеров. 3MF представляет собой описание физических объектов в формате разметки с большим количеством информации о внутренних и внешних свойствах для обеспечения совместимости с различными принтерами. 3MF не поддерживает моделирование твердых тел (B-Rep, NURBS и STEP), но служит в качестве однозначного формата экспорта геометрической информации для этих систем.

ФГАП представляет широкие возможности для проектирования, постоянно растущую производительность и экономически эффективные изделия с увеличенным сроком службы. Например, регулируя решетчатые структуры при сохранении прочности, можно получить более легкую конструкцию. Для получения нужных свойств для каждой конкретной задачи возможно индивидуально изменять параметры матрицы материалов, усиление, объем, форму и расположение элементов усиления, а также метод изготовления [6].

ФГАП можно использовать для создания изделий, от которых требуется структурное сочетание несовместимых функций (например, жесткость и гибкость [9, 19]). Конечную продукцию ФГАП объединяют в две группы: предназначенную для промышленного рынка и потребительского рынка [1]. Промышленный рынок включает в себя медицинскую, стоматологическую, аэрокосмическую, автомобильную, оборонную и энергетическую отрасли, потребительские рынки – бытовую технику, моду и развлечения. Ключевые сектора, подходящие для внедрения ФГАП, нацелены на рынки, в которых требуется индивидуальная геометрия [20], а также надежные механические, тепловые или химические свойства [9], например медицинские устройства и имплантаты и изделия аэрокосмической отрасли. ФГАП способствует созданию вспомогательных, хирургических и протезных устройств, хирургических имплантатов, каркасов для тканевой инженерии и градиентной пористости для улучшения роста тканей и ускорения заживления. Одной из областей применения является костно-хрящевой каркас (например, используется при остеоартрите), в котором существует постепенный переход между костью и хрящем, при этом каркас можно изготовить с помощью биопрототипера АП с возможностью использования гидрогелей, биополимеров и керамических материалов [3].

Изначально ФГМ были разработаны для аэрокосмической промышленности в целях снижения веса или оптимизации топологии с улучшенной функциональностью. Применение ФГМ в деталях космических аппаратов и ракетных двигателей приводит к повышению коэффициента использования материала для металлических компонентов, улучшенным усталостным свойствам и высокому качеству поверхности [1]. Среди других новых областей применения выделяют ферменные конструкции космических аппаратов, теплообменные панели, отражатели, солнечные панели, корпуса камер, турбинные колеса, носовые обтекатели, передние кромки крыльев ракет и космических челноков [9].

По мере роста количества областей применения ФГАП будущие работы будут направлены на исследование соотношений наполнителей, вспенивателей, прочих чувствительных материалов, биопрототипирования с использованием опор, а также биочернил.