

## ВВЕДЕНИЕ

Монография «Перспективные материалы и технологии аддитивного производства» состоит из двух томов. Во втором томе рассмотрены перспективы развития аддитивных технологий.

Аддитивное производство (АП) обеспечивает высокую свободу проектирования и гибкость изготовления сложных деталей по принципу слой за слоем [427], именно это позволяет точно контролировать пространственное распределение материалов и, таким образом, имеет большой потенциал для проектирования и изготовления мультиматериальных структур.

По сравнению с традиционными технологиями производства мультиматериальное АП может обеспечить более надежный метод изготовления геометрически сложных мультиматериальных компонентов и снизить стоимость производства. В частности, данный процесс обеспечивает более высокий уровень свободы проектирования, который позволяет контролировать направленность и разнообразие распределения материала в сложном трехмерном пространстве. Таким образом, мультиматериальный аддитивный процесс может обеспечить «печать нужных материалов в нужных местах» и «печать уникальных структур для уникальных функций» [328].

В соответствии с распределением разнородных материалов мультиматериальные структуры, напечатанные методом лазерного сплавления порошкового слоя (LPBF), разделяют на структуры с межслойной и внутрислойной печатью. Репрезентативными типами мультиматериалов являются металл/металл, металл/керамика, металл/стекло и металл/полимер. Получение беспористых структур и отсутствие трещин на границе раздела с прочным соединением являются наиболее важными показателями для этих типов мультиматериалов. Критические технические вопросы в процессе LPBF из нескольких материалов включают разработку систем доставки порошка, подготовку данных о структурах из нескольких материалов перед печатью, термодинамические расчеты и моделирование процесса, а также перекрестное загрязнение и рециркуляцию порошка.

В процессе LPBF с использованием нескольких материалов очень важно доставлять разнородные порошки в заранее определенные места. Существующее оборудование LPBF предназначено для печати одного материала из-за ограничений систем доставки порошка. В работе [506] описаны попытки печати

мультиматериальных структур со сменой материала вдоль направления выращивания посредством замены порошков вручную. В работе [270] сообщается о печати подложки с использованием стального порошка и замене стального порошка на керамический в одном печатном процессе для изготовления детали из мультиматериала сталь—керамика, что значительно увеличило трудозатраты, время выполнения заказа и стоимость материала. Для достижения индивидуального изменения физического расположения разнородного порошка наиболее эффективна модификация системы подачи порошка оригинального оборудования LPBF.

Развитие оборудования LPBF позволяет печатать структуры из нескольких материалов с пространственным распределением разнородных материалов по желанию заказчика. Свойственные LPBF характеристики (например, на основе слоя порошка) приводят к неизбежной проблеме перекрестного загрязнения порошка во время печати мультиматериальных структур. Порошок в нерасплавленной области после печати одного слоя порошка необходимо очищать, иначе происходит смешение разнородных порошков, что приводит к перекрестному загрязнению порошка [237]. Эта смесь может нарушить тонкое расположение материала и изменить функцию мультиматериальных структур [156, 161], что наносит ущерб точному контролю их характеристик. Таким образом, для оборудования LPBF для мультиматериалов важна система очистки для эффективного удаления несканированных порошков внутри печатного слоя.

Для снижения стоимости материалов необходимо иметь возможность переработки, разделения и повторного использования разнородных порошков. Если смешанные порошки имеют значительные различия в размере частиц, их можно разделить с помощью просеивания [109], различные магнитные свойства — с помощью магнитной адсорбции [132, 407], различную плотность — с помощью инерции частиц [216]. Оборудование для LPBF из нескольких материалов должно не допускать смешивания сырого порошка в процессе печати.

Стратегия сканирования, определяемая как пространственная схема перемещения лазера в процессе LPBF, варьируется различными последовательностями и направлениями сканирования, длинами векторов сканирования, углами поворота векторов сканирования, промежутками между штрихами и т. д. [446]. Из-за быстрого движения лазера в процессе LPBF стратегия сканирования может влиять на направление теплового потока, тепловой градиент и скорость охлаждения внутри деталей, что оказывает значительное влияние на остаточные напряжения и микроструктуру. Использование определенной стратегии сканирования для оптимизации направления теплового потока, теплового градиента и скорости охлаждения границы раздела между разнородными материалами позволяет снизить остаточное напряжение и получить бездефектную микроструктуру на границе раздела. Количество и размер пор на границе раздела могут быть значительно уменьшены посредством оптимизации круга ванны расплава с помощью стратегии сканирования.

В процессе LPBF применяют различные стратегии сканирования, включая основные стратегии сканирования (например, сканирование в одном

направлении, сканирование в двух направлениях и спиральное сканирование), стратегии двумерного сканирования (например, сканирование плоскости, сканирование полосы и островное сканирование) и стратегии межслойного сканирования (например, межслойное сканирование в шахматном порядке и ортогональное сканирование). Комбинация стратегий сканирования может быть использована для печати границы мультиматериальных структур с уменьшенным остаточным напряжением и желаемой микроструктурой.

Для печати границы раздела разнородных материалов с ограниченной совместимостью, которая может удалить оксидные пленки и создать чистую границу раздела твердое тело—жидкость на атомном уровне, часто используется стратегия переплавки [166]. В работе [270] описано создание зазубренной поверхности между стальным и керамическим слоем посредством переплавки для повышения прочности сцепления между сталью и керамикой, в то время как без переплавки наблюдалось расслоение. Аналогичные результаты были получены при переплавке поверхности 316L при осаждении стеклянного материала на подложку 316L [68].

Характеристики границы раздела являются приоритетными в мультиматериальных структурах, напечатанных методом LPBF. Типы мультиматериалов для LPBF демонстрируют различные механизмы формирования конструкции межслойных структур и сцепления. Например, мультиматериальные структуры металл—металл имеют зону сплавления и уникальную микроструктуру для прочного межфазного сцепления; границы раздела металл—полимер, металл—стекло и металл—керамика скрепляются механическими блокирующими структурами. Дефекты, такие как трещины, поры, расслоение и нерасплавленные частицы порошка, часто возникают на границе раздела мультиматериальных структур, отпечатанных методом LPBF, что отрицательно сказывается на их механических свойствах.

Эффективные методы упрочнения межфазного соединения включают оптимизацию параметров процесса на границе раздела фаз, введение промежуточных связующих слоев и зоны перехода состава, а также проектирование формы и размера межфазного соединения. Среди этих методов наиболее применяемым является метод перехода состава для уменьшения межфазных дефектов и концентрации напряжений.

Одним из необходимых условий для LPBF-обработки мультиматериальных структур является создание их 3D-моделей [474]. Большинство распространенных 3D-моделей из-за ограничений доступного коммерческого программного обеспечения передают только геометрическую информацию о детали без информации о ее материале, что затрудняет печать мультиматериальных структур.

Мультиматериальные структуры для LPBF требуют нового подхода к вычислительному моделированию, который может не только содержать геометрическую информацию, но и задавать информацию о материалах для локального контроля состава и управлять ею [71]. Новый подход к вычислительному моделированию должен быть способен контролировать пропорции и направленность материалов в трехмерном пространстве.

Для процесса мультиматериального LPBF необходимо понимание совместности свойств материалов и предсказание поведения разнородных материалов (межфазная морфология, форма ванны расплава, эволюция микроструктуры и т. д.), чтобы быстро подобрать типы материалов и параметры процесса для мультиматериальных структур. Совместимость свойств материалов и физическое поведение, лежащее в основе мультиматериального LPBF, связаны с термодинамикой и гидродинамикой расплава, фазовым переходом, термодинамикой материалов и т. д. Высокосовместимые материалы могут обладать схожими функциями, что приводит к единой функции детали из нескольких материалов, которая может оказаться неспособной адаптироваться к изменяющимся условиям работы. Оптимизация технологических параметров границы раздела осуществляется в основном посредством многочисленных экспериментов методом проб и ошибок, что может привести к длительному времени изготовления и высокой стоимости деталей [236].

В монографии приведены примеры перспективных технологий АП для реального сектора экономики. В атомной и аэрокосмической промышленности существует необходимость изготовления высокопрочных соединений между титановыми сплавами и нержавеющей стали [281]. Эти материалы предпочтительны из-за их высокого отношения прочности к весу, малого веса и высокой жаропрочности [119]. Однако прямое соединение этих двух типов материалов сопряжено со значительными трудностями. Например, традиционные методы сварки могут привести к образованию хрупких интерметаллидных соединений, таких как  $\text{FeTi}$  и  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ , которые способствуют образованию остаточных напряжений и вызывают преждевременное разрушение [262, 274, 480]. Разница в коэффициентах теплового расширения между этими материалами также может привести к преждевременному разрушению изделий и в крайних случаях к их межфазному расслоению [390].

Для создания переходного слоя, который может избежать локализованных эффектов от разницы свойств материалов, были использованы функционально-градиентные материалы (ФГМ). В качестве потенциальных межслойных материалов предлагались  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Al}$  и их сплавы [141, 170, 218, 273, 509]. Механизм выбора материала прослойки зависел от склонности к образованию интерметаллидной фазы между выбранным материалом прослойки и сплавами  $\text{Ti}$  и нержавеющей стали [251]. Например, в работе [509], чтобы избежать образования хрупких интерметаллидных фаз, в качестве материала прослойки был предложен ванадий. Однако образец 316L SS/Ti6Al4V с ванадием в качестве прослойки разрушился во время испытания на растяжение. Хрупкость была объяснена присутствием твердого раствора ( $\text{Cr}$ ,  $\text{V}$ ) и  $\text{FeTi}$  в зоне сварки между Ti6Al4V и ванадием. Хотя твердый раствор обычно вязкий, последующее охрупчивание было объяснено тем, что температура перехода от вязкости к хрупкости ванадиевых сплавов превышала температуру окружающей среды.

Изготовление деталей из интерметаллидных соединений, близких к желаемой конечной геометрии, возможно с помощью процессов литья или порошковой металлургии, но стоимость производства высока, а конфигурация

конечного продукта не может быть очень сложной из-за использования формы в этих методах [276]. Среди новых методов производства АП показало хороший потенциал для изготовления деталей из интерметаллидных соединений благодаря своим высоким возможностям в разработке новых сплавов и максимально интегрированному производству, близкому к конечной форме (без каких-либо геометрических ограничений) [307]. Основными проблемами при АП интерметаллидных соединений являлись высокая восприимчивость к затвердеванию/низкотемпературному растрескиванию, образование пористости и неоднородность химического состава.

В области биомедицины обработка мультиматериальных структур с помощью LPBF позволяет печатным имплантатам достичь тонкой мультиматериальной компоновки для получения различных свойств (например, биосовместимость, жесткость, устойчивость к истиранию, коррозионная стойкость), необходимых человеческим костям. Гибридные структуры металл–полимер также могут применяться для ортопедических целей. Например, металлические имплантаты с функцией местной доставки лекарств обычно требуются для предотвращения инфекции после операции по замене протеза сустава. Однако профиль высвобождения лекарств не может контролироваться с помощью биоразлагаемого полимерного покрытия на имплантатах [492]. В [240] описан новый металлический/полимерный имплантат с LPBF-печатью и контролируемым профилем доставки лекарств. Полимер, в который могут быть загружены антибиотики, встроен внутри металлического имплантата и является биоразлагаемым. С помощью процесса LPBF возможно изготовление искусственных зубов из нескольких материалов с металлическим сердечником и керамической оболочкой, что позволяет достичь отличных механических характеристик и более высокой совместимости с человеческим организмом [14].

Выражаю слова благодарности моим кандидатам технических наук, докторантам и аспирантам за помощь в подготовке данной рукописи, особенно за предоставление микрофотографий и рисунков, которые используются для иллюстрации перспективных технологий, используемых в аддитивном производстве. Я хотел бы поблагодарить Разумова Николая, Суфиярова Вадима, Борисова Евгения, Полозова Игоря, Старикова Кирилла, Сотова Антона и Мутьлину Ирину. Я благодарен Санкт-Петербургскому политехническому университету Петра Великого за предоставленную возможность подготовки и поддержку в подготовке данной монографии. Мои особые слова благодарности ректору СПбПУ академику А. И. Рудскому, вдохновившему меня на написание этих двух томов монографии.