

ультратонких (толщина <100 нм), обладающих антибактериальными свойствами модифицирующих покрытий. Они проявляют как бактерицидное действие за счет входящих в их состав компонентов, так и антиадгезионные свойства, препятствующие сцеплению белков и бактерий, и могут использоваться для модификации изделий медицинского назначения (хирургические сетки, имплантаты и др.) с целью их защиты от бактериального заражения и расширения функционала.

Несмотря на то, что в последнее время есть ощущение, что термины «наноматериалы» и «нанотехнологии» широко общественностью понимаются в определенной степени как исчерпавшие свою актуальность и используемые ранее для «хайпа», следует отметить, что материалы при переходе на наноразмерный уровень все-таки демонстрируют принципиально новые свойства, не наблюдаемые на макроскопическом уровне. Именно это и привлекает внимание многих ученых как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Дальнейшее развитие и применение наноматериалов обещает множество возможностей, включая создание сверхточных систем доставки лекарств, нанороботов для производства микрообъектов, наноэлектроники, ультра-селективных молекулярных сит и нанокомпозитов для высокопроизводительных транспортных средств. Данные технологии будут и в дальнейшем привлекать внимание исследователей и инженеров, поскольку их потенциал и возможности далеко не исчерпаны. ■



Александр Ильющенко,
директор Института
порошковой металлургии,
генеральный директор
ГНПО порошковой
металлургии, академик,
профессор



Татьяна Талако,
заместитель академика-
секретаря Отделения
физико-технических наук,
доктор технических наук,
профессор



Андрей Лецко,
заведующий НИЛ №15,
кандидат технических
наук, доцент

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аддитивное производство (АП) находится в авангарде передовых технологий XXI в. Это связано с уникальными возможностями дизайна конструкций (повышенная свобода проектирования по сравнению с традиционными решениями: возможность изготовления облегченных решетчатых структур, сложных внутренних каналов или единых встроенных моделей вместо нескольких частей), широким набором методов построения и перечнем материалов. Однако для эффективного использования открывающихся в связи с этим перспектив необходимо полное переосмысление инженерного цикла АП.

Основные этапы аддитивного производства

Термин «аддитивное производство» (от англ. additive manufacturing) объединяет перечень перспективных технологий кастомизированного изготовления деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала (как правило, послойного), в противоположность так называемому вычитающему производству [1].

Несмотря на то, что до сих пор единой устоявшейся классификации аддитивных технологий не существует, в соответствии со стандартом ASTM F2792 (США), по принципу построения выделяют 7 основных групп процессов:

- *material extrusion* – выдавливание материала;
- *material jetting* – разбрызгивание материала, струйные технологии;
- *binder jetting* – разбрызгивание связующего;
- *sheet lamination* – соединение листовых материалов;
- *vat photopolymerization* – фотополимеризация;
- *powder bed fusion* – расплавление материала в заранее сформированном слое;
- *directed energy deposition* – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Невзирая на многообразие процессов, типовой технологический цикл аддитивного производства включает следующие этапы:

- 3D-моделирование, при котором используют проектирование в среде САПР либо обратный инжиниринг

(3D-сканирование), результатом которых является создание виртуальной 3D-модели (CAD-модель);

- преобразование CAD-модели в формат «.stl» (от первого метода – стереолитография), в котором описаны внешние замкнутые поверхности изначальной САПР-модели, формирующие основу для расчета слоев. Как правило, в формате «.stl» 3D-модель представляют последовательностью треугольников-фасет, каждый из которых описывается 4 наборами данных (координатами x , y , z для каждой из вершин и вектором нормали, указывающим ориентацию фасета). Таким образом создается набор послойных сечений 3D-модели;
- передача .stl-файлов в 3D-принтер, где они корректируются (исправление размеров, закрытие полостей и открытых структур, позиционирование и ориентация изделия для конкретного способа построения, проектирование поддержек);
- настройка 3D-принтера (установка параметров процесса, например характеристик источника энергии, стратегии сканирования, толщины слоя и др.);
- непосредственно процесс построения (как правило, полностью автоматизирован);
- извлечение изделия (удаление неиспользованного порошка, поддержек, платформы построения);
- последующая обработка, которая может включать термическую или термомеханическую (горячее изо-

статическое прессование (ГИП)) для удаления остаточной пористости, уменьшения остаточных напряжений и регулирования структуры и фазового состава материала, а также различные варианты механической обработки для обеспечения необходимой точности и шероховатости поверхности (шлифовка, полировка).

Среди порошковых технологий получения металлических и керамических изделий наиболее широкое применение получили платформенные технологии селективного лазерного (SLM) (рис. 1) и электронно-лучевого сплавления (EBM), а также струйной 3D-печати с использованием связующего вещества.

В первых двух методах (SLM, EBM) слой порошка сначала наносится на платформу построения, после чего энергия сфокусированного лазерного или электронного луча локально (в соответствии с цифровой моделью) спекает или расплавляет порошок, формируя изделие. Затем платформу опускают, и цикл повторяется до тех пор, пока деталь не будет сформирована, после чего излишки порошка удаляются, а деталь отделяется от платформы.

В технологиях струйной печати используется печатающая головка, которая селективно наносит капли жидкого связующего вещества (3DP) на платформу с порошком в соответствии с информацией о наборе сечений детали. После ее формирования изделие осторожно извлекают из слоя порошка, так как оно представляет собой сырую (неспеченную) заготовку. Затем связующее удаляют, и начинается процесс спекания, иногда с последующей инфильтрацией.

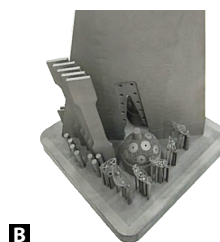
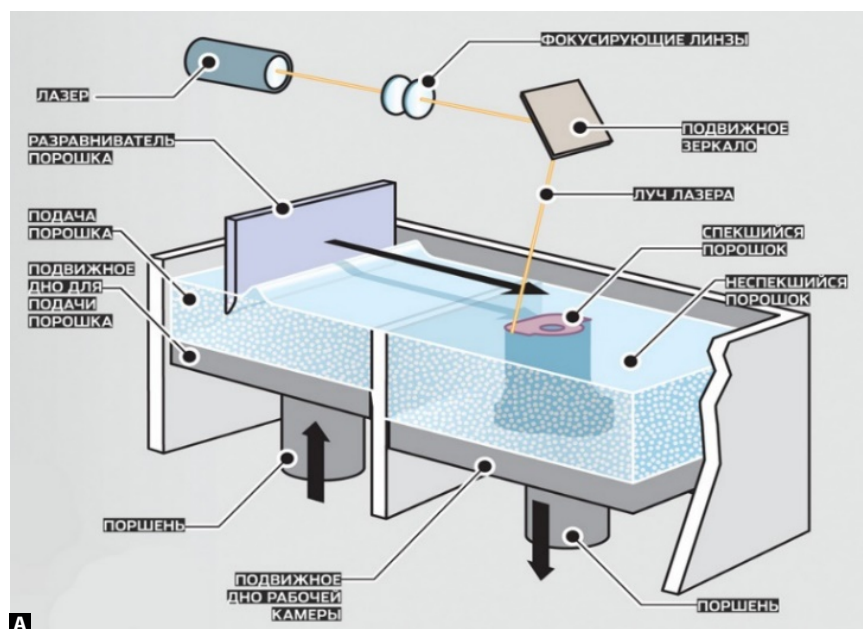


Рис. 1. Селективное лазерное сплавление (SLM): а) схема работы установки селективного лазерного сплавления (SLM); б) установка SLM ProX300 («3D Systems», США) Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа; в) детали на плите построения

Основные требования к порошкам для аддитивных технологий

Особенности послойного формирования изделий обусловили специфические требования к порошкам, применяемым в аддитивном производстве. Принято считать, что основными характеристиками, обеспечивающими возможность достижения близкой к теоретической плотности порошковых изделий, получаемых данными методами, является сферическая форма частиц и оптимизация их распределения по размерам под конкретную технологию [2]. Кроме указанных характеристик при выборе порошков для АП важное значение имеют химический состав, в первую очередь содержание кислорода, примесей и растворенных газов, а также дефекты типа сателлитов, открытой или закрытой пористости, которые обычно стремятся минимизировать.

Основной метод получения металлических порошков железных, никелевых и кобальтовых сплавов для аддитивных технологий – распыление расплава газовой струей, при котором плавление осуществляют в защитной атмосфере или вакууме, что обеспечивает низкое содержание кислорода и примесей. Метод позволяет соз-

давать качественные порошки для селективного лазерного сплавления, селективного электронно-лучевого сплавления, послойной лазерной наплавки и других аддитивных технологий.

На рис. 2 представлена морфология поверхности никелевого жаропрочного сплава Inconel 718, полученного в Институте

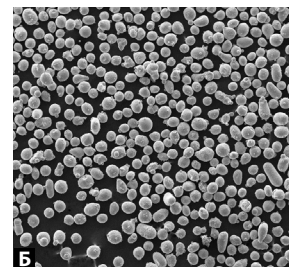


Рис. 2. Установка распыления и порошки, полученные по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии имени академика О.В. Романа: а) установка вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом; б) морфология поверхности распыленных порошков никелевого жаропрочного сплава, полученных по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии им. академика О.В. Романа

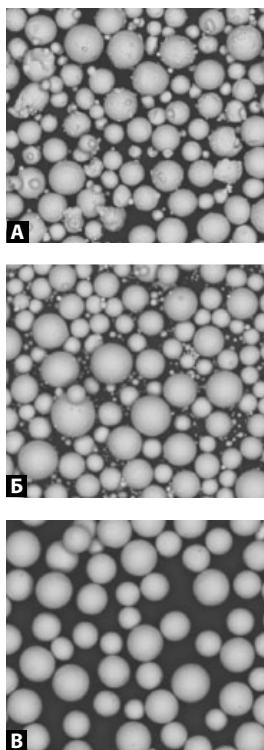


Рис. 3. Морфология поверхности порошков титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных различными методами: а) технология EIGA; б) плазменное распыление; в) технология PREP [3]

порошковой металлургии им. академика О.В. Романа на установке вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом «JT-QWH-25KG» (технология VIGA). Фактор формы порошков варьируется в диапазоне 0,85–0,92, что находится на уровне лучших зарубежных аналогов.

Традиционным методом производства особо чистых порошков реакционноспособных сплавов сферической формы является технология EIGA, основанная на индукционном плавлении вращающегося электрода с последующим его распылением инертным газом, не предусматривающая его контакт с тиглем либо другим электродом. Это наиболее экономичный способ получения

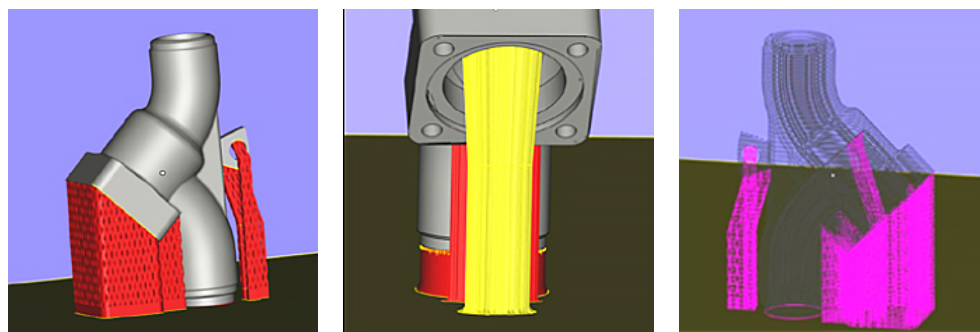


Рис. 4. Разработка поддержек (и разбивка на слои) с использованием программного обеспечения Magics (собственность компании Materialise)

реакционноспособных порошков размером менее 500 мкм (рис. 3а). Близка к нему так называемая плазменная технология вращающегося электрода (PREP), при которой материал плавится при контакте электрода с плазмой. При этом порошки имеют правильную сферическую форму размером менее 100 мкм (рис. 2в), и стоимость их очень высока.

Относительно нова технология плазменного распыления (PWP или PA), позволяющая выпускать высококачественные сферические порошки размером менее 200 мкм (рис. 2б). Однако возможности здесь ограничены материалами, которые могут быть изготовлены в виде проволоки.

Более подробный обзор методов получения металлических порошков для аддитивного производства представлен в [4].

Ограничения технологии АП

Чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами аддитивных технологий, важно учитывать имеющиеся ограничения.

Принято считать, что процессы АП обычно эффективны для единичного или мелкосерийного производства. Тем не менее уже имеется опыт изготовления серий до 25 тыс. деталей в год [5].

Несмотря на то, что в аддитивных процессах уже опробован и успешно применяется широкий перечень материалов (полимеры, металлы, сплавы, керамика, композиты и др.), их выбор, как правило, ограничен способностью к свариваемости. Трудносвариваемые компоненты требуют особого подхода.

В платформенных порошковых технологиях имеется целый ряд конструктивных ограничений. Прежде всего, максимальный размер деталей ограничен размерами платформы. Ориентация детали в слое порошка является ключевым моментом как с точки зрения качества, так и стоимости, и определяет продолжительность печати, количество поддержек, шероховатость поверхности и остаточные напряжения.

Важное правило при послойном построении детали с нависающими частями – избегать слишком малого угла выступа, поскольку каждый новый слой должен хотя бы частично поддерживаться материалом предыдущего. Если угол между деталью и платформой построения составляет менее 45°, необходимо использовать поддержки элементов нависающих частей, позволяющие предотвратить высокую шероховатость поверхности, а также искажения и деформации,



Рис. 5. Коробление поверхности из-за слишком малой толщины стенки (собственность компании Renishaw)

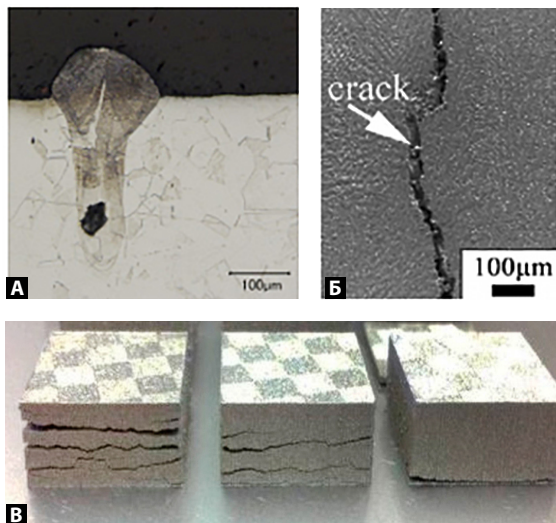


Рис. 6. Дефекты в АП-изделиях: а) пористость; б) трещина; в) расслоение [8]

приводящие к разрушению структуры в условиях быстрого нагрева и охлаждения материала. В этом случае поддержки выполняют функцию своеобразного анкера, обеспечивая формирование ровного слоя без изгиба вверх, и рассеивают избыточное тепло от сфокусированного источника энергии (рис. 4).

Рекомендуемый минимальный размер отверстия (полости) в технологии селективного лазерного сплавления, как правило, составляет около 0,4 мм. Толщина стенки обычно ограничивается значением 0,2 мм, но зависит от типа машины, используемого материала и свойств порошка. Если толщина стенки слишком тонкая и нет поддержек, есть шанс коробления поверхности, как это видно на рис. 5. В этом случае толщину стенки секции необходимо увеличивать, чтобы избежать эффекта коробления.

Максимальное соотношение длины и высоты в технологиях SLM обычно не должно превышать 8:1. Но в случае оптимизации сечения детали или геометрии поддержек возможно превы-

шение рекомендуемого соотношения. Некоторые рекомендации по оптимизации конструкций представлены в [6, 7].

Основные дефекты в материалах, получаемых аддитивными методами

Специфические дефекты, характерные для изделий аддитивного производства, связаны с особенностями их формирования и обусловлены главным образом неправильной стратегией построения, некорректным

выбором ориентации детали и параметров процессов либо недостаточным качеством порошка. К числу наиболее распространенных недостатков следует отнести чрезмерную шероховатость поверхности («эффект ступеньки лестницы»), анизотропию структуры (как правило, в направлении построения (по оси Z)), недостаточное проплавление материала, высокую пористость, примесные включения, растрескивание и расслоение, скручивание, коробление, краевые эффекты и неточность размеров (рис. 6).

Следствие этого – появление отклонений в размерах, неприемлемого качества поверхности, структурной и механической анизотропии, которая также может быть связана с формированием определенной текстуры зерен, обусловленной направлениями теплоотвода. Сокращение анизотропии может быть достигнуто путем выбора соответствующей ориентации виртуальной конструкции. При наличии высоких остаточных напряжений в зависимости от локальной кривизны поверхности могут возникать разрывы.

Еще один важный дефект, определяющий свойства изделия, – пористость. Под напряжением она действует как кон-



Рис. 7. Установки горячего изостатического прессования, используемые в Институте порошковой металлургии имени академика О.В. Романа

центратор напряжений и может привести к снижению механической прочности за счет развития микротрещин.

Некоторые из дефектов (высокие внутренние напряжения, обширная остаточная пористость, анизотропия структуры и др.) могут быть исправлены с помощью последующей обработки, например горячим изостатическим прессованием (ГИП) [7] (рис. 7).

На рис. 8 представлена микроструктура SLM-образца из распыленного порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до и после ГИП. Последующая обработка образцов этим методом позволила не только обеспечить рекристаллизацию и формирование однородной структуры, но и повысить плотность SLM-образцов до теоретической.

Более детальную информацию о фазовых и структурных превращениях в SLM-образцах до и после обработки можно получить с помощью метода дифракции обратно-рассеянных электронов (ДРОЭ). В частности, анализ прямых и обратных полюсных фигур (рис. 9) позволяет определить направление преимущественной ориентации зерен относительно направления построения,

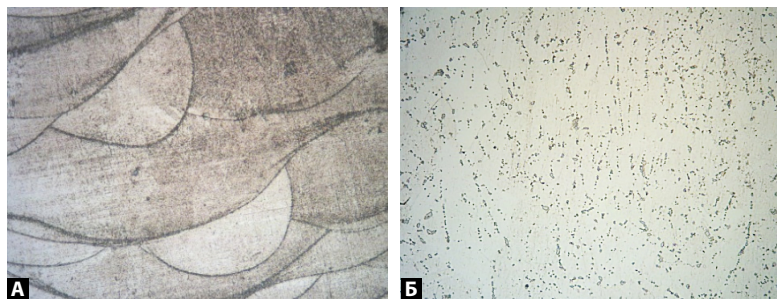


Рис. 8. Оптические микрофотографии поперечного сечения SLM-образца из порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до (а) и после (б) ГИП

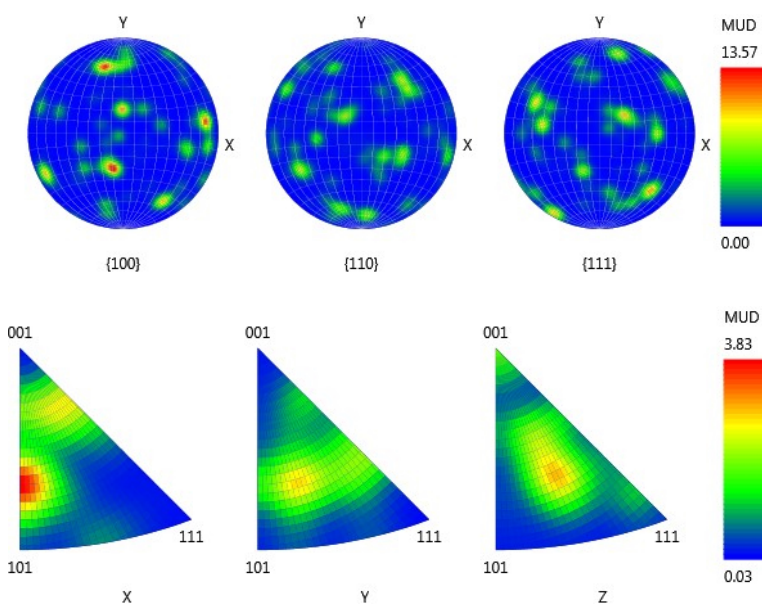


Рис. 9. Прямая и обратная полюсные фигуры для никелевого жаропрочного сплава Inconel 718

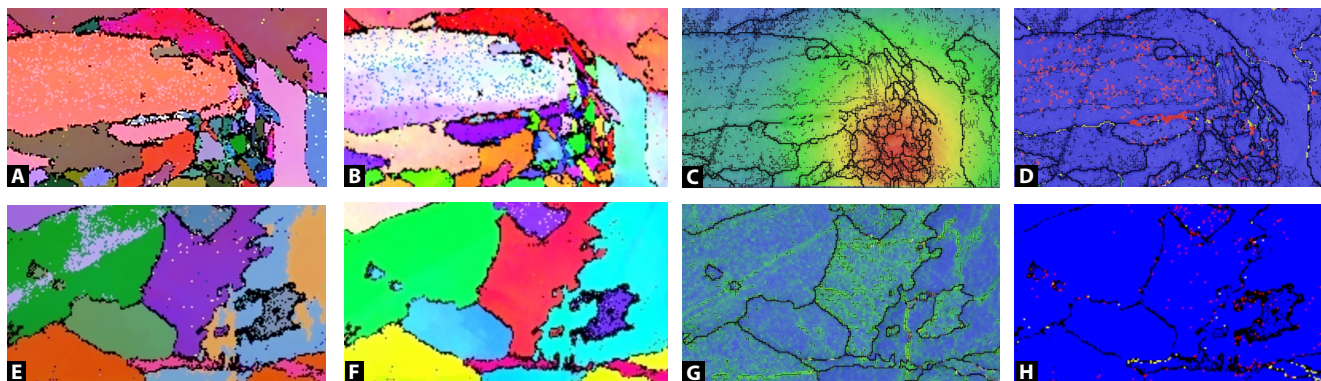


Рис. 10. Карты ДРОЭ SLM-образца из никелевого жаропрочного сплава Inconel 718 до (а–д) и после ГИП (е–h): цвета Эйлера (а, е), разориентация кристаллов относительно плоскости Z (б, ф), внутренние напряжения + границы зерен (с), локальные деформации + границы зерен (г), распределение фаз + границы зерен (д, h)



	Шероховатость, Rz															
	0.04	0.06	0.10	0.16	0.25	0.40	0.63	1.0	1.6	2.5	4.0	6.3	10	16	25	40
Токарная обработка																
Фрезерование																
Полирование																
После построения (напечатанный)																
После кратковременной дробеструйной обработки																
После полировки																

Рис. 11. Стандартная шероховатость деталей SLM в зависимости от способа механической обработки и полированная центробежная топливная форсунка для авиакосмической промышленности

	Основной диапазон
	Менее типичная область

которое в данном случае соответствует (100). Сравнительный анализ карт ДОЭ (рис. 10) полезен для контроля процессов рекристаллизации, выявления областей с повышенной локальной деформацией и др.

Шероховатость поверхности изделий, полученных АП, зависит от размеров используемых порошков для построения и обычно находится в пределах Rz 16–63 мкм. Разработаны технологии электрохимической полировки, при которой достигается шероховатость поверхности Rz 0,1 мкм (рис. 11).

Более подробный анализ причин и способов борьбы с дефектами представлен в обзоре [10].

Аддитивное производство металлических материалов

Наибольшее распространение в аддитивном производстве получили сплавы титана и алюминия, нержавеющие стали и жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта [8]. Разрабатываются и исследуются также медные и магниевые сплавы, драгоценные (золото, серебро, платина)

и тугоплавкие металлы и сплавы на основе Mo, W и др. [11].

Безусловным лидером являются титановые сплавы, особенно Ti-6Al-4V, характеризующийся высокой удельной прочностью и широко используемый в авиакосмической и медицинской области. Напечатанные детали, как правило, имеют более высокую прочность, но меньшую пластичность по сравнению с изделиями, полученными традиционными методами. Последующая термообработка может привести к полярному изменению этих характеристик.

Алюминиевые детали АМ в основном производятся из сплавов AlSi10Mg с высоким содержанием кремния, способствующим снижению температуры плавления и обеспечивающим высокую стойкость к образованию горячих трещин и низкую усадку при затвердевании, без охрупчивания и образования пористости. В целом механические свойства таких изделий не уступают литейным сплавам за счет мелкозернистой структуры без заметной анизотропии [8]. Однако требуются усилия по обеспечению стойкости к усталостным разрушениям АП-деталей из AlSi10Mg, которые весьма восприимчивы к локальным дефектам.

Детали АП из аустенитной нержавеющей стали обычно отличаются более высокой прочностью, твердостью и характеризуются анизотропией, а также более низкой пластичностью по сравнению с традиционно получаемыми аналогами. Это объясняется более мелкозернистой структурой (вследствие быстрого затвердевания) и особенностями внутреннего строения (дендритная и ячеистая структура), более высокой плотностью дислокаций и остаточными напряжениями (до 60–90% от предела текучести). Есть данные об увеличении предела прочности на 25% (с 200 до 250 МПа) [8] после механической обработки для снижения шероховатости поверхности.

Среди сплавов на основе Ni чаще используются жаропрочные сплавы марок Инконель 625 и 718 с повышенной прочностью при растяжении, стойкостью к окислению, коррозии и ползучести, рассматриваемые в качестве перспективных кандидатов для применения в реактивных двигателях и компонентах газовых турбин. Технологии получения этих сплавов методами АП обычно требуют компромисса между прочностью и пластичностью, демонстрируя значительные уровни

анизотропии. Сообщалось, что наличие дефектов сварки оказывает значительный эффект на усталостную долговечность деталей АП из сплава IN718, сокращая срок их службы. Термическая обработка улучшает эти характеристики до значений традиционных литых или кованных аналогов (при более высоком сопротивлении ползучести).

Другие сплавы на основе Ni, например Haynes 230 (PBF-SLM), также демонстрируют лучшие механические свойства (предел текучести и предел прочности) по сравнению с литыми и коваными материалами. Однако на пластичность отрицательно влияет наблюдаемая сегрегация элементов в микроструктуре.

В таблице представлены сравнительные механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в аддитивных технологиях металлических сплавов [12]. Детали АП на металлической основе по механическим свойствам не уступают традиционным литым или кованным изделиям.

Аддитивные технологии получения керамики

В АП керамических материалов опробованы почти все известные технологии. Однако в отличие от полимеров и металлов, уже получивших широкое распространение, АП-керамика пока используется ограниченно. Это связано с хрупкостью большинства керами-

ческих материалов. Чтобы избежать чрезмерных повреждений, применяют технологии формообразования частично спеченной или неспеченной керамики, которая затем может быть подвергнута механической обработке и последующему спеканию для достижения необходимой плотности и прочности [13].

В платформенных порошковых технологиях в качестве сырья используют керамические порошки, смесь керамических частиц со связующим веществом, композиционные частицы или частицы с полимерным покрытием, гели, а также добавки с низкой температурой плавления (MgO , $CaMgSiO_4$) либо образующие фазу жидкого стекла.

Процессы селективного лазерного плавления порошков были одними из первых в изготовлении керамики. Так, методом SLM получены литейные формы из кварцевого песка [14, 15] и стоматологические изделия из порошков стабилизированного иттрием диоксида циркония [16].

Большое количество публикаций, посвященных исследованию процессов SLM стабилизированного иттрием диоксида циркония, объясняется его сравнительно высокой фазовой стабильностью после затвердевания и достаточной вязкостью. Отмечается высокая чувствительность свойств получаемой керамики к атмосфере и параметрам процесса.

Кроме того, реализованы операции спекания с образованием керамической фазы при химическом взаимодействии между двумя порошками либо между порошком и атмосферным воздухом. Так, AlN получен путем селективного лазерного спекания алюминиевого порошка в присутствии азота [17]. Лазерная обработка SiC при участии кислорода

Материал	Процесс	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Ti6Al4V	Горячее деформирование	951	883	14
	LMD*	1160	1160	6
	EBM**	1020	950	14
	SLM	1100	1000	8
	LENS***	1077	973	11
Inconel 718	Горячее деформирование	1407	1172	21
	LENS	1393	1117	15,8
	EBM	1238	1154	7
Inconel 625	LENS	938	548	38
17-4SS	SLM	1050	540	25
Сплав Co–Cr	EBM	960	560	20
Сплав Co–Cr–Mo	SLM	1350–1450	910–1010	9–13
316SS	Горячее деформирование	579	290	50
	LENS	655	278	66,5
	LMD	579	296	41

Таблица. Механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в настоящее время в аддитивных технологиях металлических сплавов [13]:

*LMD – объемная лазерная наплавка;

**EBM – электронно-лучевое сплавление;

***LENS – объемная лазерная наплавка на оборудовании с торговой маркой

LENS™ – Laser Engineered Net Shaping

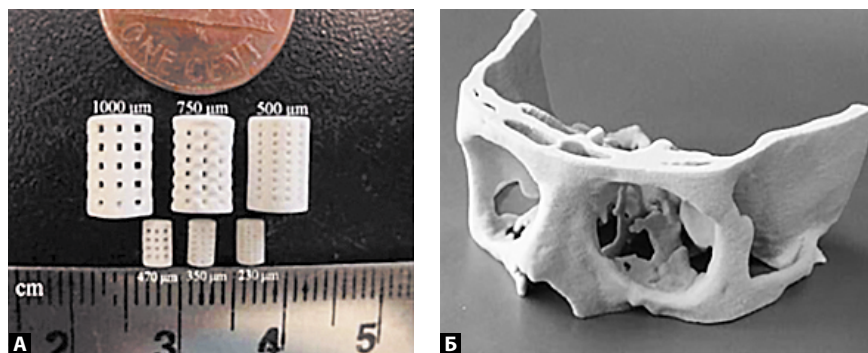


Рис. 12. Сложнопрофильные изделия из керамики, полученные SLA: а) три-кальций фосфатные каркасы для бондажа костной ткани; б) лицевой сегмент из кальций фосфатного порошка [21, 22]

привела к созданию композита SiC/SiO₂ [18].

Сообщалось, что использование в качестве источника тепла электронного луча, эффективное при обработке проводящих материалов (например, металлов), при изготовлении керамики приводило к высоким термическим напряжениям, растрескиванию и искажению структуры [19, 20].

Свойства керамики можно улучшить путем последующей обработки, например, спеканием в печи, инфильтрацией полимером или легкоплавким металлом, отжигом, горячим или холодным изостатическим прессованием. Однако контроль пористости и деформации в процессе обработки остается сложной задачей и больших преимуществ по сравнению с традиционными технологиями селективного спекания, например медицинских (в частности, стоматологических) изделий, не обеспечивает.

С учетом сложности селективных лучевых процессов изготовления керамики дальнейшие исследования были сосредоточены на более простых методах с применением связующего вещества. *Binder jetting* (BJ) наиболее широко используется среди методов АП для производства керамики и заключается в послойном нанесении порошков и

распылении жидкого связующего в соответствии с цифровой трехмерной моделью. Связующее частично отверждается или высыхает перед нанесением следующего слоя. В отличие от технологии плавления в порошковом слое, где применяется нагрев, который может привести к остаточным напряжениям, фазовым изменениям или окислению, при струйной обработке в качестве связующего можно использовать практически любой материал. Технология легко масштабируется и обеспечивает более высокую производительность по сравнению с SLM, исключает необходимость поддержек, а стоимость машин значительно ниже. Недостатком является возможное загрязнение материала примесными элементами и необходимость этапов последующей обработки, что создает риск искажения из-за несимметричного уплотнения или неконтролируемой усадки. Для устранения нежелательных элементов в некоторых случаях эффективен двухэтапный процесс, сочетающий в себе вакуумный пиролиз и удаление связующих воздухом.

Данная технология опробована для большого количества керамики, такой как Al₂O₃, SiC, SiSiC, Si₃N₄, MoSi₂, диоксид циркония, дисиликат лития (Li₂Si₂O₅), гидроксид

апатит, фосфат кальция и др. Преимуществом порошковых технологий в биомедицинских приложениях является возможность эффективного регулирования пористости конструкций. Для повышения плотности и механических свойств после формирования изделий методом BJ также используют различные методы постобработки керамических деталей, такие как жидкофазное спекание, инфильтрация и изостатическое прессование (рис. 12).

Еще одно перспективное направление – технология стереолитографии (SLA), характеризующаяся «высоким разрешением» процесса (минимальное значение, встречающееся в литературе, – 100–125 мкм) и позволяющая получать сложную геометрию изделий, например керамические ячеистые структуры, лопатки турбины и др.

Несмотря на необходимость в специализированном фотополимерном сырье, накладывающую значительные ограничения на круг используемых материалов, процесс SLA был успешно опробован для получения керамики на основе ZrO₂, Li₂Si₂O₅, Al₂O₃, SiC, SiOC, SiO₂ и TiC с помощью основных форм исходного материала: керамических суспензий и полимерных предшественников производимой керамики. Показана возможность армирования керамики, изготавливаемой из фотополимеров, микроволокном и короткими волокнами [23, 24].

Для обеспечения качества деталей SLA решающее значение имеет контроль реологических параметров и характеристик процесса фотоотверждения. Более перспективен подход, заключающийся в применении полимеров, разлагающихся с образованием керамики. Он был использован для изготовления композитов

SiC/SiOCN и SiC/SiO_xC_y для лопаток турбины двигателя. Кроме того, поскольку температуры пиролиза в таких процессах с полимерами относительно низкие (<1300 °C), для спекания требуется меньше энергии. Тем не менее в полученных изделиях также присутствуют дефекты, такие как трещины и внутренняя пористость.

Среди перспективных направлений развития аддитивного производства керамики в [25] отмечаются технологии binder jetting и SLA, разработка новых систем связующих и суспензий для мелких деталей в электронике, пористых медицинских изделий для остеointеграции, пьезокерамики, новые возможности формирования интегрированных структур.

Можно констатировать, что рынок аддитивных технологий быстро растет, а изделия используются во многих отраслях: авиакосмической, энергетике, медицине, в автомобилестроении и транспорте, для изготовления оснастки, потребительских товаров и др. АТ рекомендуются для кастомизированного и мелкосерийного производства деталей сложной формы, которые демонстрируют более высокие свойства, нежели традиционные аналоги.

Несмотря на то, что аддитивные технологии подразумевают сложные и многофакторные процессы, имеющие ряд ограничений и немало нерешенных моментов, они предоставляют уникальные возможности для дизайна конструкций и требуют полного переосмысления инженерного цикла АП, включая методологию проектирования, оптимизации и моделирования процессов, а также решения ряда практических вопросов по формированию структуры и свойств материалов и способов борьбы с дефектами. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ильющенко А.Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия: монография / А.Ф. Ильющенко // Национальная академия наук Беларуси; Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа. – Минск, 2019.
2. Dawes J. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain / J. Dawes, R. Bowerman, R. Trepleton // Johnson Matthey Technol. Rev. 2015. Vol. 59. No3. P. 243–256.
3. M. Heynick. Additive manufacturing of metals: a review // Proc. Of MS&T11, Additive Manufacturing of Metals. – Columbus, Oh. 2011. P. 1413–1425.
4. А.Ф. Ильющенко, А.И. Лецко, Т.Л. Талако // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. трудов. – Минск, 2017. Вып. 40. С. 48–53.
5. Introduction to additive manufacturing technology. A guide for designers and engineers // EPMA V2-REVISED. N12. 2012. P. 44.
6. Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures / P. Das [et al.] // Procedia Manufacturing. 2015. N1. P. 343–354.
7. Gaynor A.T. Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design / A.T. Gaynor, J.K. Guest // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016. N54. P. 1157–1172.
8. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy [et al.] // Progress in Materials Science Prog. 2018. N92. P. 112–224.
9. Рудской А.И. Аддитивные технологии. Материалы и технологические процессы: монография / А.И. Рудской [и др.]. – СПб., 2021.
10. Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing / A. Mostafaei [et al.] // Current Opinion in Solid State and Materials Science. N26. 2022.
11. Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review / B. Barroqueiro [et al.] // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2019. N6.
12. Singh S. Material issues in additive manufacturing: A review / S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. Vol. 25. P. 185–200.
13. Diener S. Literature review: Methods for achieving high powder bed densities in ceramic powder bed based additive manufacturing / S. Diener, A. Zocca, J. Günster // Open Ceramics. 2021. N8. P.100191b.
14. Direct laser sintering of a silica sand / Y. Tang [et al.] // Materials and Design. 2003. N24. P. 623–629.
15. An investigation of rapid prototyping of sand casting molds by selective laser sintering / G. Casalino [et al.] // Journal of Laser Applications. 2002. N14. P. 100–106.
16. Ceramic components manufacturing by selective laser sintering / P. Bertrand [et al.] // Applied Surface Science. 2007. N254. P. 989–992.
17. Sercombe T.B. Rapid manufacturing of aluminum components / T.B. Sercombe, G.B. Schaffer // Science 301 (2003) 1225–1227.
18. M. Geiger (Ed.). Laser Assisted Net Shape Engineering 2: Proceedings of the 30th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems – LANE'97, Meisenbach, Bamberg, 1997. Erlangen, September 23–26.
19. Materials for additive manufacturing. CIRP Annals / D. Bourell [et al.] // Manufacturing Technology. 2017.
20. Electron beam sintering of ceramics for additive manufacturing / A.S. Klimov [et al.] // Vacuum. 2019. N169. P. 108933.
21. Development of a new calcium phosphate powder-binder system for the 3D printing of patient specific implants / A. Khalyfa [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2007. N18. P. 909–916.
22. Microwave Sintered 3D Printed Tricalcium Phosphate Scaffolds for Bone Tissue Engineering / S. Tarafder [et al.] // Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine. 2013. N7, 8. P. 631–641.
23. D.J. Thomas. 3-D printing of polymer-derived CMCs for next-generation turbine blade manufacture // American Ceramic Society Bulletin. 2017. N96. P. 28–30.
24. Short fiber reinforced 3D printed ceramic composite with shear induced alignment / D.E. Yunus [et al.] // Ceramics International. 2017. N43(15). P. 11766–11772.
25. Diener S. Literature review: Methods for achieving high powder bed densities in ceramic powder bed based additive manufacturing / S. Diener, A. Zocca, J. Günster // Open Ceramics. 2021. N8. P. 100191b.