

# МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ 3D-ПЕЧАТЬ —

## будущее эффективных производств

Владимир ЕЖЕЛЕНКО, Дмитрий ТРУБАШЕВСКИЙ, Андрей КОЛМАКОВ,  
компания «Современное оборудование»

*Ускорение и усложнение научно-технологического прогресса становится настолько интенсивным, что многие аналитики предсказывают появление уже в 2030-х годах эффекта «технологической сингулярности», когда концентрация технологических новаторских изменений повлечет за собой качественный скачок во всех сферах производства. Не вызывает сомнений, что одну из ключевых позиций в нем займут аддитивные технологии.*

Сегодня в мире мы наблюдаем переход от индустриального уклада к постиндустриальному. Он характеризуется кардинальным сокращением участия человека в процессах производства продукции: от повсеместного участия практически к его исключению из процесса и к полной автоматизации производства. В США, Японии и странах Западной Европы в новом экономическом укладе человеку отводится роль создателя лишь опытных образцов, уникальных товаров и услуг. Серийное же производство должно превратиться в относительно простой и легко управляемый процесс.

Самым перспективным направлением сейчас является организация товарного производства на новой, постиндустриальной базе — на базе современных гибких технологий, оборудования и инструментов. Так как рынок все больше отходит от массового производства и ориентируется на удовлетворение специфических требований клиентов, наибольшую важность имеет налаживание мелкосерийного кастомизированного производства. Например, тюнинг автомобиля (пока это относится к премиальным брендам) уже сегодня выполняется для каждого покупателя по принципу индивидуального заказа, с учетом его требований и пожеланий. В то же время массовый переход к кастомизации предполагает глубокие изменения,

направленные как на ускорение и удешевление разработки новых моделей и типов продукции, так и на организацию гибких, способных быстро перенастраиваться производственных систем.

В новой производственной реальности главная добавочная стоимость будет определяться в сфере производства товара, для которого материальная часть уже не так важна, как индивидуальная и дизайнерская. Бизнес в сфере этого высокотехнологического производства — тренд сегодняшнего технического и экономического прогресса. По мнению аналитиков Wohlers Associates, 3D-печать будет гораздо шире использоваться в производстве деталей для конечной продукции, чем для изготовления прототипов, поскольку спрос на нее гораздо выше, чем на единичные прототипы. То есть перспективы рынка 3D-печати сегодня связаны именно с массовым производством, а не с прототипированием, так как аддитивное производство открывает огромные возможности с точки зрения выпуска коммерческой кастомизированной продукции.

### ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В перспективе, а нередко это происходит уже сейчас, аддитивное производство будет предпочтительнее традиционного при изготовлении единичных изделий и мелких партий

уникальных деталей в тех случаях, когда стоимость станочной обработки высока, либо она в принципе невозможна. К этому добавляется потребность в ремонте и восстановлении деталей сложных агрегатов. В результате получаем уникальную и широко востребованную технологию, определяющую развитие производства на ближайший век.

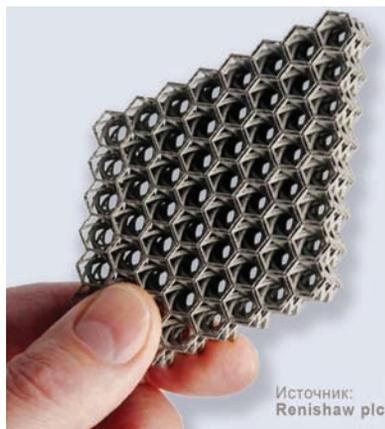
Основные предпосылки и преимущества применения аддитивных технологий заключаются в следующих факторах:

- исключение извечного конфликта «конструктор — технолог»;
- возможность изготовления деталей любой геометрической сложности;
- возможность внесения изменений в проект на этапе передачи изделия в производство (например, при необходимости осуществления его функциональной оптимизации);
- изготовление изделий в рамках опытного производства;
- отсутствие необходимости изготовления инструментальной оснастки, свойственной традиционным методам обработки;
- минимизация потерь материала и отходов производства (например, стружки);
- возможности для упрощения логистики, сокращения времени поставок, уменьшения объемов складских запасов.

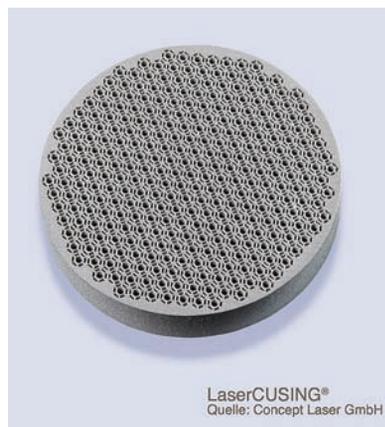
Одним из самых перспективных векторов развития аддитивного технологического сектора является технология селективного лазерного плавления металлических порошковых материалов для получения конечных деталей или заготовок с минимальным припуском для заключи-

тельной чистовой станочной обработки. Самые передовые из таких систем позволяют применять металлы с температурой плавления до 3500 градусов Цельсия. Широко востребованы порошковые материалы из нержавеющей и жаропрочной стали, жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальт-хрома, а также алюминиевых и титановых сплавов. В особом ряду стоят порошки драгоценных металлов: серебра, золота, платины.

В число ведущих производителей систем для аддитивного производства входят компании 3D Systems, ExOne и Stratasys (США), Arcam (Швеция), а также Concept Laser, EOS, SLS и Voxeljet (Германия) и др. Рынок 3D-печати, по оценке Wohlers Associates, ускоренно растет. По числу введенных в эксплуатацию систем с большим отрывом лидируют США – 38% промышленных установок. Значительное количество установок эксплуатируется также в Японии



Источник: Renishaw plc



LaserCUSING®  
Quelle: Concept Laser GmbH

Рис. 1. Пример сотовой структуры, произведенной с применением технологии селективного лазерного плавления

(9,7%), Германии (9,4%) и Китае (8,7%). Доля России составляет пока 1,4%.

### ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Автомобилестроительная компания Daimler AG (Германия) в партнерстве с Concept Laser и Фраунгоферским институтом лазерных технологий<sup>1</sup> перешла в своем опытном производстве на изготовление с помощью 3D-печати крупных функциональных металлических деталей из порошковых материалов. Таким образом, там отказались от более дорогостоящего (для опытного производства) традиционного метода литья под давлением и в песчаные формы.

Неотъемлемое техническое требование к любой продукции авиационной, космической, автомобильной промышленности – снижение веса изделия. В решении задачи оптимизации конструкции с целью создания внутренней облегченной структуры без потери функционального назначения изделия аддитивные технологии являются непревзойденным по возможностям инструментом. Если раньше разработчики творили, исходя из жестко ограниченных возможностей традиционных технологий, и проявляли недюжинную смекалку при проектировании сверхсложной оснастки для изготовления непростых по форме и максимально облегченных деталей, то теперь об этих ограничениях можно забыть. При использовании технологий трехмерной печати стало возможным, не прибегая к изготовлению оснастки, получать детали самой сложной формы и с наименьшим весом. В настоящее время предлагаются совершенные программные средства для оптимизации конструкции по определенным условиям и требованиям с целью сокращения веса конечного изделия. Вместо внутреннего монолитного заполнения материалом в этом программном обеспечении (ПО) задается сотовая или балочная структура изделия (рис. 1). Адаптированная таким образом конструкция существенно теряет в весе, при этом показатели ее прочности сохраняются или даже повышаются.

Подобного рода программные продукты уже предлагаются на рын-

ке САПР ведущими мировыми разработчиками ПО. Например, 3-maticSTL Lightweight Structures Module от ветерана отрасли – компании Materialise; программа Within от Autodesk; Inspire от компании solidThinking. Такое ПО помогает просто и быстро генерировать внутреннюю конструкцию изделия, удалив лишний объем материала. В результате получается более легкая структурная конструкция, которую без труда можно изготовить с использованием аддитивных технологий. Стоит отметить, что внутри таких программ скрывается мощный математический аппарат, выполняющий конечно-элементный анализ конструкции изделий в соответствии с воспринимаемыми нагрузками. А «снаружи» мы видим элегантный интерфейс с простыми настройками и быстрым визуальным отображением результатов расчетов.



LaserCUSING®  
Concept Laser GmbH



LaserCUSING®  
Quelle: Concept Laser GmbH



Рис. 2. Кронштейны, изготовленные методом селективного лазерного плавления металлопорошка

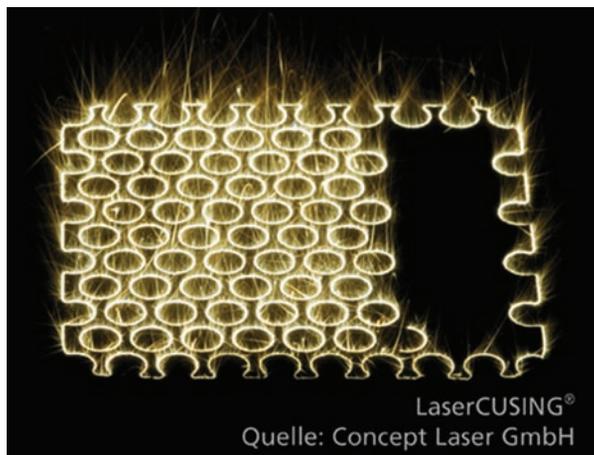


Рис. 3. Фотография рабочей зоны установки при формировании структуры слоя

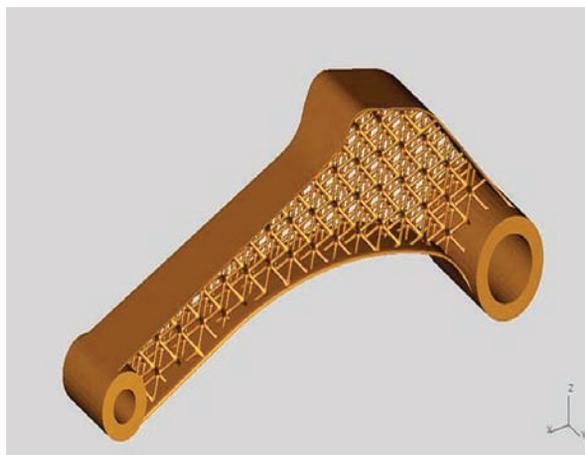


Рис. 4. Конструкция изделия, оптимизированная с помощью программного обеспечения

Производители самолетов приобретут грандиозные конкурентные преимущества, если получат возможность на 50-80% уменьшить вес металлических компонентов авиационной техники и снизить технологическую себестоимость их производства. А именно этого позволяет достичь применение технологии селективного лазерного плавления металлопорошков. Центр NASA, Центр космических полетов им. Джорджа Маршалла (Хантсвилл) и компания Directed Manufacturing провели огневые испытания инжектора, разработанного в рамках американской государственной программы создания сверхтяжелого ракетносителя для пилотируемых полетов Space Launch System. Событие имело большое значение, во-первых, потому что был представлен изготовленный методом 3D-печати компонент реактивного двигателя, состоящий к тому же всего из двух частей, в то время как подобные инжекторы, изготовленные по традиционным технологиям, состояли из 115 деталей. Во-вторых, при экстремальных воздействиях были проверены свойства материала инжектора (порошковый сплав никеля и хрома). Во время испытаний через инжектор в камеру сгорания пропустили жидкий кислород и газообразный водород, таким образом увеличив тягу двигателя в 10 раз (до 9,07 кг). В таблице приведено сравнение методов изготовления инжектора реактивного двигателя.

Очень удачный опыт применения технологии послойного синтеза металла в инструментальном произ-

| Параметры                     | 3D-печать методом SLM                       | Традиционные способы обработки |
|-------------------------------|---|--------------------------------|
| Затраченное время             | 3 недели, из них 40 часов – на изготовление | 24 недели                      |
| Количество компонентов детали | 1   | 4                              |
| Количество сварных соединений | 0   | 5                              |
| Стоимость детали              | 5 000 \$                                    | 10 000 \$                      |

Таблица. Сравнение аддитивного и традиционного методов изготовления инжектора



Рис. 5. Этот топливно-насосный агрегат выполнен по аддитивным технологиям, содержит на 45% меньше деталей, чем насосы, изготовленные традиционным образом и протестирован в условиях, близких к полетным, в Центре космических полетов имени Дж. Маршалла NASA



Рис. 6. Корпуса сверл, изготовленные по аддитивной технологии



Рис. 7. Корпуса разверток, изготовленные по аддитивной технологии

водстве получен немецкой компанией Maral. Лазерное плавление металлического порошка на оборудовании Concept Laser сделало возможным реализовать принципиально новые подходы к проектированию инструмента. Серия прецизионных сверл с твердосплавными вставками выпускается компанией с использованием так называемого гибридного (смешанного) подхода: режущая пластина инструмента спекается традиционным способом, а его корпус изготавливается методом селективного лазерного плавления LaserCUSING®. Технология может применяться для построения объектов любой сложной геометрической

формы, имеющих сложные внутренние каналы, тонкие стенки и полости. Аддитивные подходы позволили компании существенно удешевить производство инструментов. Гибридные технологии при изготовлении сверл показали себя как оптимальные: простые компоненты обрабатываются на традиционных станках с ЧПУ, а более сложные – строятся на аддитивном оборудовании. При этом главным фактором перехода от традиционного производства к аддитивному стала получаемая возможность изготовления принципиально новой геометрии инструментов, улучшающей их рабочие характеристики. Идеальное

сверло – очень жесткое снаружи и слегка пластичное внутри. При лазерном плавлении металлов есть возможность задавать выборочную толщину внешней поверхности с последующей закалкой путем термообработки, а внутри формировать ячеистую или сотовую структуру. В результате производится инструмент с облегченной конструкцией, которую невозможно получить традиционным способом (рис. 6, 7).

Пример удачного внедрения в производство технологии послойного лазерного синтеза изделий из металлопорошков также есть у компании General Electric (GE) Aviation. Распылители топлива для двигателей LEAP-1A изготовлены методом прямого лазерного спекания из кобальтохромового сплава. Такой сплав широко используется при производстве медицинских инструментов и различных протезов. Он достаточно прочен и легкий, поэтому инженеры GE Aviation сочли возможным его использование при производстве деталей для двигателей (рис. 8).

Одна из сильных сторон аддитивного производства – экономически целесообразное штучное изготовление изделия любой формы, что очень востребовано в медицине. На данный момент аддитивное производство продвинулось в этом направлении довольно далеко. Сегодня методом селективного лазерного плавления металлопорошка успешно



Рис. 8. Топливная форсунка авиадвигателя, изготовленная по аддитивной технологии



Рис. 9. «Напечатанные» металлические протезы

изготавливаются и используются персональные сердечные клапаны, искусственные челюсти, части коленного сустава, фрагменты черепа, широкий спектр стоматологических протезов (рис. 9). Причем все эти детали сугубо индивидуальные, в точности повторяющие части человеческого тела, которые приходится заменять. Возможность комбинирования гомогенных и пористых структур в одном объекте ценна при создании имплантатов, например, ацетабулярных чашек или других ортопедических имплантатов с пористой поверхностью, способствующей остеоинтеграции (сращиванию с костной тканью). Два ведущих производителя слуховых аппаратов Siemens и Phonak применяют аддитивные

технологии для изготовления персонализированных устройств, точно соответствующих уху пациента.

Аддитивное производство также является экономически оправданным решением для изготовления небольших партий ювелирных украшений. Такая необходимость часто возникает при изготовлении пробных партий для маркетинговых исследований, выставок и показов, при высокой срочности заказов или же в случаях невозможности изготовления изделий традиционным способом. Появление новой цифровой технологии прямого аддитивного производства изделий из металлов, в том числе драгоценных, обеспечивает исключительную свободу дизайна (рис. 10). Использование технологии позволяет изготавливать эксклюзив-

ные изделия ранее недоступных форм и дизайнерских решений, что позволяет производителю получить конкурентное преимущество на рынке.

#### ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Официальным термином технологии для описания технологии является «лазерное спекание», хотя он несколько не соответствует действительности, так как расходные материалы подвергаются не спеканию, а полной плавке до образования гомогенной массы. Как вариант, процесс может называться прямым лазерным спеканием металлов (Direct Metal Laser



Рис. 10. Ювелирные украшения, полученные методом селективного лазерного плавления LaserCUSING®

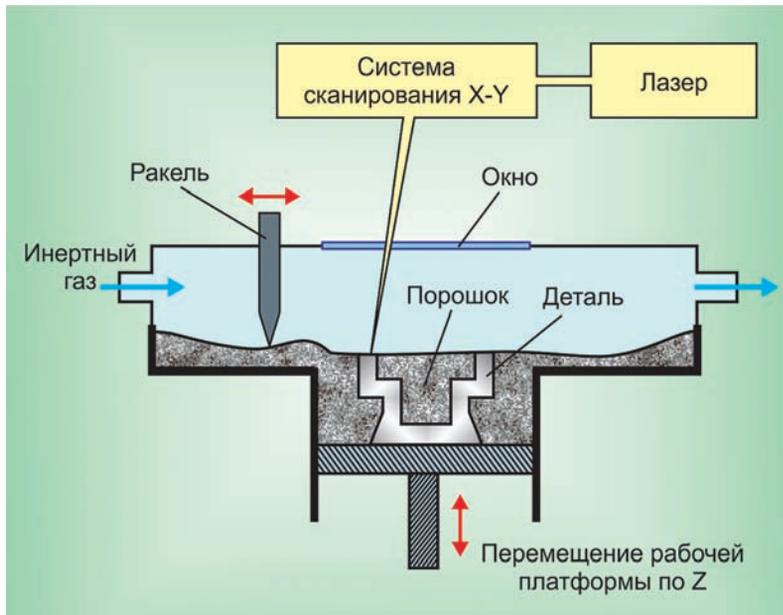


Рис. 11. Принцип реализации технологии СЛП

Sintering – DMLS) в случае использования металлических порошков, а также LaserCUSING® (фирменное название, бренд компании Concept Laser GmbH). Схожим методом является электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting – EBM), использующая электронные излучатели вместо лазеров. Ниже мы подробно рассмотрим суть технологии селективного лазерного плавления металлических порошков.

**SLM – суть процесса**

Селективное лазерное плавление (СЛП) – метод аддитивного производства, использующий лазеры высокой мощности, (как правило, это

иттербиевые волоконные лазеры), для создания трехмерных физических объектов за счет плавления металлических порошков.

Методы лазерного спекания (плавления) металлического порошка в соответствии с особенностями процесса уплотнения материала можно разделить на несколько групп:

- селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering – SLS) происходит за счет твердофазного спекания лазером;
- не прямое лазерное спекание металлов (Indirect Metal Laser Sintering – IMLS) происходит за счет спекания лазером смеси порошка металла со связующим веществом

(например, с полиамидами, эпоксидной смолой, жидким стеклом и др.). Затем следует термическая обработка для удаления полимера из каркаса;

- прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering – DMLS) происходит за счет жидкофазного спекания легкоплавкого компонента в порошковой смеси лазером;

- плавление коаксиальной струей (Direct Metal Deposition – DMD) – когда металлопорошок распыляется из сопла и тут же спекается направленным лазерным лучом;

- селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting – SLM) происходит за счет полного плавления порошковой смеси лазером.

Принцип работы машин, работающих по технологии СЛП (рис. 11), заключается в нанесении слоя металлического порошка заданной толщины и последующего его плавления лазером в соответствии с геометрией сечения изготавливаемого слоя детали. Сначала на рабочую платформу установки переносят дозу порошкового материала со вспомогательной платформы и разравнивают его с помощью ракеля (ролика или «ножа»), создавая тем самым ровный слой материала определенной толщины. Затем в соответствии с геометрией конкретного слоя (сечения) математической модели детали на порошок воздействуют излучением лазера, сплавляя гранулы порошка между собой. После этого вспомогательная платформа, на которой осуществляется построение, опускается



Рис. 12. Платформа с построенными деталями



Рис. 13. Кронштейн, изготовленный по технологии SLM (на переднем плане), функционально идентичен образцу, полученному по классической технологии. Разница в весе – около 50%

на толщину слоя и процесс повторяется снова. Стоит заметить, что 97-99% незадействованного при построении порошка после процедуры просеивания пригодно к повторному использованию. Тем не менее, часть материала, задействованного на построение поддержек, утилизируется вместе с некондиционным порошком, не прошедшим операцию просеивания.

Построение ведется с постоянным контролем основных параметров процесса, – это, в том числе, мониторинг избыточного уровня кислорода в камере, поддержание нужной мощности лазера, контроль температуры в зоне построения и т. д. После построения формируется отчет, составленный программой на основе показаний датчиков и модулей контроля качества установки. По окончании процесса модель остывает, очищается от лишнего порошка и передается на постобработку, основной задачей которой является удаление структур поддержки и «лишнего» порошка из внутренних полостей. В ряде случаев требуется дополнительная термообработка для снятия напряжений в детали.

При производстве методом СЛП на металлической основе для построения выращиваются структуры поддержки, которые позволяют сохранить форму изделия в процессе ее послойного синтеза. Это важно, поскольку может возникать коробление вследствие термических деформаций. Данные структуры поддержек автоматически выстраиваются программным обеспечением установки.

После изготовления методом СЛП материал изделий характеризуется анизотропией свойств, повышенной прочностью и пониженной пластичностью из-за наличия остаточных напряжений. Для снятия напряжений, получения однородной структуры, повышения вязкости и пластичности материала проводят отжиг. Частично проблема остаточных напряжений решается в технологии выборочного лазерного плавления LaserCUSING®, применяющейся в установках фирмы Concept Laser. В ней используется уникальный метод перемещения лазерного луча: каждый слой разделяется в ПО на множество мельчайших блоков, которые обрабатываются лазерным лучом в случайном порядке и в разных направлениях штриховки. Такой метод

позволяет минимизировать и в ряде случаев свести к нулю внутренние напряжения в детали, и изготавливать крупные детали без коробления. Важным условием также является создание защитной среды, предотвращающей окисление порошка и обеспечивающей адгезию частиц порошка между собой. Для выполнения этого условия используют инертные газы (аргон – для реактивных материалов, азот – для всех остальных).

### Расходные материалы

Производство металлопорошков – важная задача для распространения и поддержки технологий металлической 3D-печати. Основными технологиями получения металлопорошков, позволяющих достигать необходимой дисперсии и обеспечения выполнения этих требований, являются газовая, вакуумная и центробежная атомизация. К слову, свыше 90% производства металлопорошковых материалов применяют газовую атомизацию.

При газовой атомизации металл расплавляют в плавильной камере (обычно в вакууме или в инертной среде) и затем сливают в управляемом



Рис. 14. Общий вид аддитивного цеха металлической печати

режиме через специальное устройство – распылитель, где производится разрушение потока жидкого металла струей инертного газа под давлением.

Одним из параметров, характеризующих порошок, является параметр  $d_{50}$  – средний диаметр частиц. Например, если  $d_{50}$  равен 40 мкм, это означает, что у 50% частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм. Чем больше частиц одного диаметра в партии порошка, тем лучше качество получаемых из него металлопорошковых композиций. Вот почему порошки после изготовления дополнительно сортируют по размерам частиц.

Общее требование к порошкам для установок СЛП – сферическая форма частиц. Это связано по большей части с тем, что такие частицы более компактно укладываются в определенный объем.

Качество используемого порошка – определяющий фактор для качества конечного изделия. На сегодня в России производство порошков стабильного качества, но в небольших объемах, налажено в ФГУП ВИАМ, использующем технологию газовой атомизации.

### Основные технологические параметры СЛП

Согласно исследованиям ВИАМ, после получения металлопорошкового материала возникает проблема отработки режимов его использования и окончательного уточнения состава. Например, с одной стороны, чем меньше величина  $d_{50}$  (когда количество частиц заданного среднего значения диаметра равно 50%), тем более детально могут быть проработаны мелкие элементы детали и тем более гладкую поверхность можно получить у построенной детали. С другой стороны, в этом случае процесс плавления может идти очень бурно, происходит разбрызгивание расплава, что может привести к обратному результату – повышенной шероховатости детали и микропористости (поры в структуре поверхностного слоя изделия).

Таким образом, задача технолога состоит в определении оптимальной взаимосвязи таких параметров, как мощность лазера, фракционный и химический состав порошка, шаг и скорость сканирования лазерным лучом, температура плавления материала. Чем выше скорость сканирования, тем выше произво-

дительность машины и тем качественнее шероховатость поверхности изделия. Особое значение имеет согласование шага сканирования, свойств материала и других параметров для минимизации пористости и противодействия формированию оксидных включений во внутренней структуре строящейся детали. Таким образом, скорость, мощность и шаг – главные параметры технологического процесса. Также важны отклонения от сферичности и шероховатость поверхности зерен металлопорошка.

### ВЕЯНИЕ МОДЫ ИЛИ СМЕНА ТЕХНОЛОГИЙ НА ДЕСЯТИЛЕТИЯ?

Вообще, стандартизация любых новых технологий – глобальная проблема, которую сегодня решают уполномоченные государственные учреждения в сотрудничестве с производственными компаниями. Все это требует времени, усилий и ресурсов, и только комплексный подход позволит синтезировать приемлемое решение. В этой области основа успеха – это реальные результаты, интегральная характеристика всех составляющих: исходный материал, проработанная адаптированная конструкция планируемого изделия, математические модели изделия, технологии, оборудование. Это также развитие и поддержка инжиниринговых центров в области аддитивных технологий. Таких, которые уже сегодня реально имеют кадры, инфраструктуру, способны обеспечить создание системы стандартов для аддитивного производства, классификацию материалов, стандартизацию конструкций, технологий и оборудования, а также масштабное применение технологий с соответствующим результатом.

Принимая решение о переходе на технологии такого уровня, как селективное лазерное плавление, приходится учитывать многие показатели. Все основные производители предлагают достаточно качественное оборудование. Однако, как и везде, выбор определяют нюансы. Немаловажный, а зачастую, определяющий фактор, особенно в условиях санкций, – возможность работы с любыми материалами, доступными на локальном рынке, и возможность управления процессом печати посредством установки величин параметров.

Здесь наилучшим образом выглядит подход компании Concept Laser для всего предлагаемого ею оборудования: от компактных машин для применения в стоматологии до больших установок для нужд авиационной, космической или автомобильной промышленности.

Несомненно, в перспективе мы увидим расширение ассортимента материалов, что позволит еще эффективнее адаптировать компоненты с учетом актуальных задач. Порошковые материалы будут разрабатываться и оптимизироваться с учетом техпроцессов и сферы применения. Изменится конструкционный потенциал, что даст новые варианты геометрии и функциональности. Наряду с этим можно ожидать новые требования и новую конструкторскую документацию для аддитивного производства, регламенты по сертификации конечных изделий.

В целом аддитивное производство способствует появлению новых подходов, немислимых в рамках традиционного производства. Эти технологии побуждают мыслить и творить по-новому, без ограничений и стереотипов. За аддитивным производством – интересное будущее, которое будет меняться на наших глазах. Новая технология прошла разнообразные испытания в течение тридцати непростых лет и способна стать драйвером воплощения инженерной мысли на ближайшие десятилетия. ■

<sup>1</sup> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

### Источники:

1. «Wohlers Report 2014», Wohlers Associates, (2014)
2. D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, *Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes, and Mechanisms*.
3. NASA tests limits of 3D printing with powerful rocket engine check, available at: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov), August 27, 2013.
4. Successful NASA Rocket Fuel Pump Tests Pave Way for 3-D Printed Demonstrator Engine, available at [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov), August 26, 2015
5. Report Skolkovo 2015 (January). Публичный аналитический доклад по развитию новых производственных технологий.