



## ПРОМЫШЛЕННЫЕ 3D-ПРИНТЕРЫ – ДОРОГИЕ "ИГРУШКИ" ИЛИ РЕАЛЬНЫЙ ПУТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В РОССИИ?

М. Макаров, ООО "НеоВейтус", [taxmak@neoveytus.ru](mailto:taxmak@neoveytus.ru), Москва

"Аддитивные технологии" являются темой дня, обсуждаемой в России на правительственных совещаниях. Ни одно крупное мероприятие не проходит без уже ставших "обязательными" ряда научных докладов по данной тематике. Тем не менее, промышленная 3D-печать до сих пор не получила широкого распространения на отечественных предприятиях. В предлагаемой статье раскрываются, на первый взгляд, не очевидные проблемы, с которыми сталкиваются пользователи АМ-машин. Развешиваются мифы о возможностях аддитивных технологий при создании металлических изделий, литейном производстве и быстром прототипировании. И как итог, описываются реальные области, где промышленные 3D-принтеры могут найти применение – с учетом специфики российского машиностроения, введенных Западом санкций и общей макроэкономической ситуации.

**И**дея послойного создания физических объектов не является новым словом в инженерной мысли. Уже более 4500 тысяч лет назад строители в Древнем Египте возводили пирамиды, в которых каждый следующий ряд каменных блоков опирался на предыдущий. Принцип послойного производства не был утрачен в веках. В 1890 году возникла идея его применения для создания топографических карт, которые бы в трехмерном пространстве демонстрировали рельеф местности. Для воплощения задумки вырезанные фрагменты карты, которые являлись горизонтальными сечениями объекта, укладывались друг на друга и склеивались между собой. В итоге формировалась объемная модель ландшафта.

Современную эру развития 3D-принтеров принято отсчитывать с мая 1980 года, когда было подано первое заявление на выдачу патента, защищающего технологию быстрого прототипирования (RP – Rapid Prototyping). За прошедшие 35 лет трехмерная печать активно развивалась. 3D-принтинг стал использоваться не только в опытно-конструкторской деятельности, но и в медицине, строительстве и даже кулинарии. Постепенно термин "быстрое прототипирование" стал отпадать, так как он не в полной мере раскрывал новые грани и возможности 3D-принтеров. Ему на замену пришли "аддитивные технологии". Новый термин происходит от английской аббревиатуры AF (Additive Fabrication), так как изделие создается путем добавления материала ("add" – добавлять), а не традиционных техно-

логий, в которых лежит принцип вычитания (съемка) лишнего материала из заготовки.

Политический резонанс аддитивные технологии получили 13 февраля 2013 года, когда в ежегодном послании к конгрессу США Барак Обама заявил, что "3D-печать имеет потенциал коренным образом изменить современный порядок вещей". В своем обращении президент подчеркнул, что он анонсирует создание сети из 15 научно-исследовательских предприятий, которые должны обеспечить то, что следующая промышленная революция произойдет именно в Америке. Данная речь послужила прямым политическим и экономическим вызовом остальному миру. Ответная реакция не заставила себя долго ждать. За следующие 2,5 года аддитивные технологии обрели статус стратегически важного направления развития во всех лидирующих странах. Российская Федерация, безусловно, не стала исключением.

Возникает вопрос – не слишком ли поздно наше правительство обратило внимание на новую отрасль? Успеют ли российские машиностроители вовремя получить преимущества и технологические возможности, которые предоставляет аддитивное производство? Сможет ли Россия в итоге включиться в очередную гонку и не упустить начало "Третьей промышленной революции?"

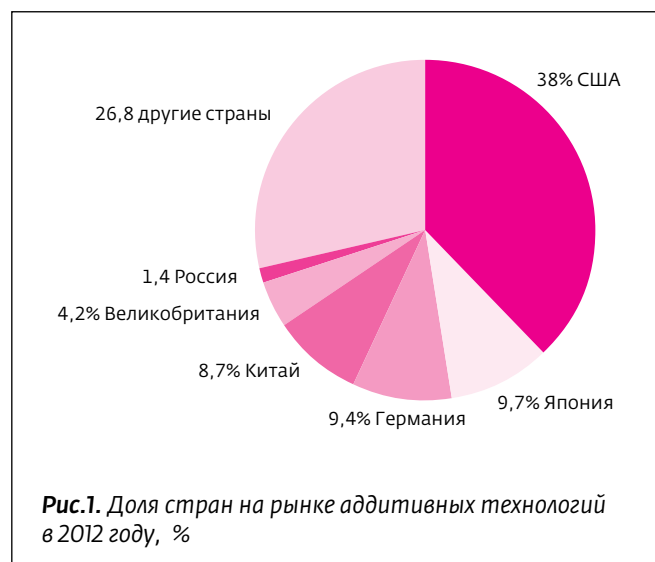
### БИЗНЕС ПО-РУССКИ ИЛИ ОПЯТЬ ОПОЗДАЛИ?

Начало 2000-х годов в России характеризуется этапом возрождения отечественного машиностроения. Преодолев трудности времен перестройки,

всеобъемлющей приватизации и экономической депрессии, этап выживания для многих предприятий закончился. Настала пора думать о дальнейшем развитии. Российская промышленность, наконец, получила доступ к западным технологиям. Постепенно кульманы сменились на компьютеры, производственные корпуса отремонтировались, станочные парки обновились и на заводы стали приходить молодые кадры.

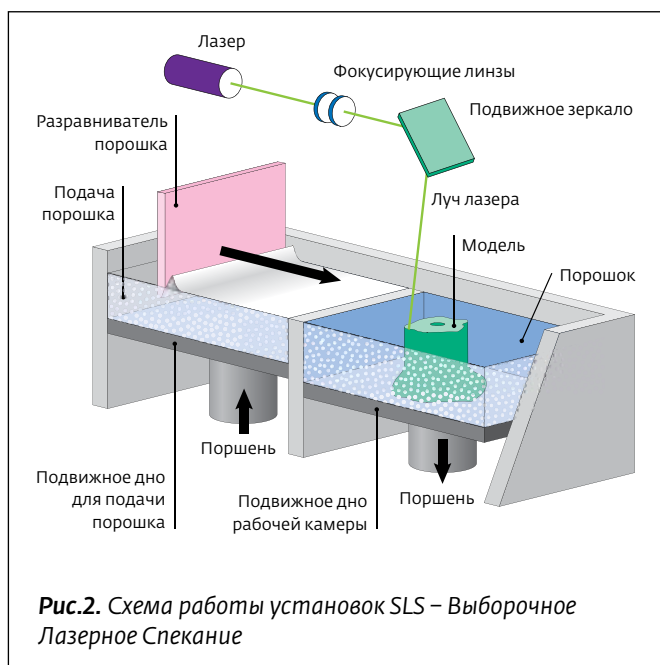
Промышленная 3D-печать, безусловно, была среди технологий, которые вторглись и перевернули привычный мир советских инженеров. Несмотря на огромный скепсис со стороны большинства промышленников, с которым, между прочим, приходится сталкиваться до сих пор, появилась череда "пионеров". Ряд предприятий первыми осмелились закупить инновационное оборудование. Основные приобретения приходились на установки, работающие по технологиям SLA (стереолитография) и SLS (селективное лазерное спекание). Среди первопроходцев здесь можно выделить участников секторов автомобилестроения (АВТОВАЗ, НАМИ и ДААЗ – Дмитровский автоагрегатный завод), авиационного и энергетического двигателестроения (УМПО, ТМЗ – Тушинский машиностроительный завод), а также приборостроения (УОМЗ и "ЦКБ "Точприбор" ныне "Швабе-приборы"). Конечно же, были совершены первые ошибки и просчеты, но это совершенно нормально при осваивании новой стратегии. Сейчас это произносится с высоты прошедших лет без учета того, что технологии существенно шагнули вперед и негативный опыт был уже учтен при принятии последующих решений.

Относительный "аддитивный" бум начался после восстановления экономики от кризиса 2008 года. Можно было наблюдать существенный рост числа закупок АМ-машин. Подъем в этой сфере в основном осуществлялся по инициативе предприятий, так как отрасль 3D-печати еще не обрела поддержку государства. Ключевым объяснением данного тренда является понимание промышленности, что за аддитивными технологиями стоит будущее и требуется начать их освоение до того момента, когда точка невозврата будет уже преодолена и время упущено. Это наложило и на общее развитие технологий. Так в 2008–2010 годах началось удешевление оборудования, и возникла возможность стабильной 3D-печати в металле, путем послойного спекания гранул мелкодисперсных порошков сплавов стали, алюминия, никеля и титана.



"Бум" для России прошел практически незаметно для мирового рынка. Сейчас можно наблюдать следующую картину. Согласно данным аналитической организации Wohlers Associates, которая с 1993 году начала изучать рынок 3D-печати, на протяжении последних четырех лет средний темп годового прироста составлял 32,3%. В 2014 году общий объем рынка 3D-печати достиг показателя в 3,07 млрд. долларов. Исследовательская компания Lux Research прогнозирует увеличение объема мирового рынка аддитивных технологий практически в 4 раза до 2025 года, давая оценку в 12 млрд. долларов. Среди позитивных показателей ситуация с освоением промышленных 3D-принтеров в России смотрится не столь ободряюще. На рис. 1 показано, что доля нашей страны на данном рынке составляет 1,4%, тогда как США занимают 38%, а наш ближайший партнер Китай – 8,7%.

Речь президента Обамы вынудила наше правительство, наконец, начать обращать внимание на сферу аддитивного производства. Глава Министерства промышленности и торговли Денис Мантуров заявил, что "3D-принтинг начинает распространяться в мире, и Россия не должна отставать в этой области. Применение аддитивных технологий позволяет удешевить изделие, ускорить его проектирование и производство. Государство со своей стороны в лице Минпромторга и других участников процесса заинтересовано в развитии этого направления, предоставляя возможность разработчикам наращивать компетенции и в кратчайшие сроки выйти на производство конкурентоспособных российских аналогов".



В свою очередь заместитель Председателя Правительства РФ – Дмитрий Рогозин отметил: "в России дан старт развитию аддитивных технологий". Это высказывание в полной мере олицетворяет ситуацию на рынке. Россия действительно только недавно начала активно заниматься развитием направления промышленной 3D-печати.

Тем не менее, многие предприятия не имеют возможности ждать результата от действий правительства. В условиях быстро меняющихся экономических реалий российские машиностроители вынуждены осваивать аддитивные технологии самостоятельно, чтобы безнадежно не отстать от зарубежных конкурентов.

Но подобный путь таит в себе массу подводных камней, которые далеко не всегда очевидны на первый взгляд. Поэтому в продолжении предлагаемой статьи будут проанализированы все проблемы, преследующие аддитивные технологии в России, и рассмотрены реальные области применения 3D-печать, обеспечивающие положительный экономический эффект для производства.

## СБЫЛАСЬ МЕЧТА... "ТЕХНОЛОГА" – 3D-ПЕЧАТЬ В МЕТАЛЛЕ

Создание 3D-принтеров для печати цельных металлических деталей является "вершиной инженерной научной мысли, – по словам генерального директора ФГУП "ВИАМ" Евгения Каблова. – В этих машинах необходимо соеди-



нить программиста, металлурга, электронщика". Данный раздел будет посвящен описанию АМ-машин, работающих по принципу Bed Deposition, а именно по технологии SLS (Selective Laser Sintering). Системы лазерного спекания формируют изделие путем точечного плавления частиц металлического порошка, расположенных в разравненном слое. В ходе построения платформа, на которой расположена деталь, пошагово опускается вниз. Таким образом, готовая деталь оказывается расположенной внутри бункера с не отвержденным материалом. Рис.2 позволяет ознакомиться с типичной схемой работы установок SLS.

Возможность послойной печати металлических изделий действительно является своеобразной панацеей, охватившей промышленность в последние годы. Этому факту есть целый ряд логичных объяснений, вытекающих из уникальных производственных возможностей АМ-установок.

Прежде всего, аддитивные технологии позволяют создавать изделия с практически любой геометрией сложности. Формирование детали путем последовательного наращивания материала слой за слоем предоставляет возможность воплощать любые задумки конструкторов. Отличительной особенностью, конечно же, является способность изготавливать сложные внутренние структуры, которые нельзя получить традиционной обработкой. На рис.3 показана гомогенная металлическая деталь, которая была получена методом 3D-печати, без стыков и швов. Казалось бы, аддитивные технологии должны иметь бескрайние просторы для применения. Однако на практике их использование наталкивается на

ряд проблем. Первая проблема, с которой сталкиваются конструкторы – ограничение размеров деталей. В настоящее время они ограничены габаритами зоны построения 800×400×500 мм у самой крупной установки X line 2000R производства немецкой компании Concept Laser. На сегодня такая система была поставлена только одному заказчику в США. Большинство же производителей выпускают 3D-принтеры с габаритами рабочей зоны в 250×250×280 мм и лазером мощностью 400 Вт, что считается общерыночным стандартом.

Следующим этапом, на котором начнут возникать вопросы, будет непосредственно методика проектирования. Проблема кажется далеко не очевидной, но с ней повсеместно сталкиваются отечественные предприятия. Практически все инженеры-конструкторы изучали профессию по советско-российским учебникам, что на практике выливается в достаточно одновекторный ход мышления. Иными словами, даже понимая теоретические возможности аддитивных технологий, конструкторам очень тяжело отойти от догм и дать себе простор для творчества.

Третий вопрос кажется еще менее очевидным, но тем не менее, остается не решенным. Ведущие конструкторские бюро, даже такие как "ОКБ им. А.Львюки", сталкиваются с проблемой нехватки специального, пусть даже и зарубежного, программного обеспечения, которое бы облегчило конструктору задачи проектирования деталей для аддитивного производства в 3D-редакторе. Просто отсутствует инструментарий, который позволил бы облегчить процесс создания внутренних сотовых конструкций или сложных гибких соединений.

Четвертая проблема выражается в отсутствии единой системы, на основании которой можно было бы на этапе проектирования закладывать в изделие необходимые физико-механические свойства. Прошедшие стандартные испытания изделий, полученных путем 3D-печати, имеют в большинстве случаев превосходящую плотность, прочность и стойкость, по сравнению с деталями, полученными деформацией или механической обработкой. Но эти показатели получались только в ходе тестирования традиционного набора образцов, которые не учитывают специфику применения 3D-печати, такую как возможность создания бионических структур, имеющих похожую на человеческую кость полую структуру.

Пятая проблема аддитивного производства заключается в наличии традиционных про-



**Рис.4.** Облегчение конструкции детали британского спутника E3000 на 35% при повышении прочности на 40% за счет перераспределения нагрузки на новые ребра жесткости

изводственных проблем. В структуре напечатанных изделий могут возникать раковины, микропоры и оксидные включения. Во многих случаях напечатанное изделие требует дополнительной термической обработки для отпуска и снятия внутренних напряжений. При изготовлении габаритных деталей не редка проблема коробления.

Но несмотря на названные проблемы 3D-печать позволяет значительно облегчить конструкцию изделий. Для целого ряда отраслей, таких как авиа- и ракетостроение, огромную роль играют соотношение весовых и прочностных характеристик изделий. Конструкторы участвуют в непрерывной гонке за достижением максимально эффективного сочетания характеристик этих двух параметров. Аддитивные технологии, так же, как и композитные материалы, стали ключом к решению данной проблемы. На рис.4 можно видеть пример детали для британского спутника E3000. Благодаря использованию технологии лазерного плавления алюминиевых порошков удалось сократить вес изделия на 35%, при этом увеличив прочность на 40% за счет перераспределения нагрузки на новый каркас из ребер жесткости. 3D-печать также позволила значительно сократить необходимый парк оборудования для выпуска изделия. Так, по традиционным технологиям показанная деталь собиралась из четырех частей с использованием 44 заклепок.

По словам директоров ВИАМ Евгения Каблова, "компания Boeing уже ежегодно изготавливает 22 тысячи деталей 300 наименований для десяти военных и коммерческих самолетов". В свою очередь, один из ведущих производителей двигателей ГТД – американская корпорация General Electric полагает, что к 2025 году поло-





вина деталей энергетических турбин и авиационных двигателей будет изготавливаться с помощью АМ-технологий. Перечислять достижения западных авиастроителей в этой области можно довольно долго. А вот отечественные компании еще долго не смогут порадовать ни гражданские авиакомпании, ни российскую армию подобными решениями. Ключевой проблемой является отсутствие сертификации, которая позволяла бы создавать конечные изделия для работы в качестве узлов и агрегатов ответственных деталей. Бюрократизация и регламентизация процесса сильно отодвинет сроки ее получения. К тому же, в России нет единого учреждения, которое могло бы выполнять функции системного интегратора и взять вопрос стандартизации аддитивных технологий как метода производства в свои руки, существенно облегчив последующую сертификацию для конкретных отраслей и типов изделий.

Отдельно хотелось бы выделить возможность создания цельных изделий со сложными внутренними структурами, такими как полости или системы разнонаправленных каналов. Безусловно, с одной стороны может показаться, что аддитивные технологии позволяют решить старые производственные проблемы. Конструктору больше не придется беспокоиться о прочности сварных швов, а технологу о том, как обеспечить надлежащее качество выполнения работ.

Если же копнуть немного глубже, то картина предстает в гораздо более мрачном цвете. При покупке 3D-принтера для спекания металлических порошков стандартный комментарий, который будет дан специалистом по продаже, – следующий: "Оператору лишь требуется загрузить 3D-модель в установку, нажать кнопку старт, и деталь будет автоматически построена". На самом деле, кропотливая работа оператора АМ-машины начинается на так называемом этапе подготовки STL-файла. Автоматическое программное обеспечение любого 3D-принтера действительно сможет самостоятельно разделить модель на слои, просчитает скорость и стоимость построения, согласно заданным параметрам. Но основная задача все равно ложится на плечи оператора – как минимум, задать правильное расположение 3D-модели и спроектировать структуры поддержки.

Обычно поддержки – это сильно перфорированные пластины, которые необходимы для

сохранения геометрической точности итоговой детали. В основном они строятся под нависающими структурами. Насыпная плотность металлического порошка не обеспечивает необходимой поддерживающей силы, так как под воздействием лазерного луча частички металла полностью плавятся, и, соответственно, расплав приобретает текучесть. В случае если какая-либо поверхность изделия находится под углом менее 25–35 градусов по отношению к платформе для построения, то необходимо проектировать структуры поддержки, так как новый слой не может опираться на предыдущий. Указанное правило также справедливо для внутренних каналов диаметром более 6 мм, которые располагаются под меньшим углом. Ради сохранения показателя круглости приходится искать оптимальное положение детали в зоне построения, что, в свою очередь, влияет на эффективность использования пространства в бункере и снижает максимальный объем производства за один рабочий цикл. Если внутренние каналы лежат в разных плоскостях, то могут возникать ситуации, когда поддержки строятся внутри. Наиболее популярное на рынке решение предлагает бельгийская компания Materialise. Она выпускает софт серии Magics, который значительно облегчает процесс подготовки модели к 3D-печати. К примеру, Magics SG+ позволяет в полуавтоматическом режиме генерировать поддерживающие структуры, отталкиваясь от обширной базы данных уже отработанных решений. Но даже данное ПО не может решить все вопросы и гарантировать успешное изготовление детали.

Основные сложности возникают, если поддержки располагаются в сложно доступном месте. В таком случае невозможно обойтись без механической обработки, от которой изначально старались отойти. Но вероятность необходимости дополнительной обработки в любом случае остается на высоком уровне. В зависимости от материала и стратегии спекания поверхностная шероховатость находится на уровне Ra 15–35 мкм непосредственно после завершения процесса построения. С помощью стекло- или дробеструйной обработки поверхность можно довести до показателя в Ra 2,5–7 мкм. Изделие также может обрабатываться на станках с ЧПУ, где поверхность сглаживается до  $Rz < 0,1$  мкм за счет фрезерования или шлифовки. Если необходимо создать точные и ровные внутренние каналы,



то без обработки не обойтись. Таким образом, исчезает преимущество изначального использования технологии 3D-печати, так как инструментом невозможно будет добраться до сложно-доступных участков. В качестве примера можно рассмотреть два типа деталей, а именно топливные форсунки для подачи смеси в ГТД и волноводы. И в том, и в другом случаях применение аддитивных технологий в разы облегчает процесс производства деталей, но несоответствие по качеству поверхности не позволяет печатать их на принтере.

Помимо перечисленных достоинств 3D-печать позволяет снизить издержки, повышая эффективность использования расходных материалов. В авиастроении существует такой показатель, как "but-to-fly-ratio", который в дословном переводе означает отношение количества закупленного для производства материала к массе тех деталей, которые действительно поднимались в небо в качестве узлов самолета. Использование металла при производстве сложных изделий может составлять не более 15-25%. В случае применения данного показателя к другим отраслям отношение может вырастать вплоть до значений 15-25 к 1.

Аддитивные технологии же относят к безотходным методам производства. В производственном процессе используется до 99% приобретенного расходного материала. Промышленные 3D-принтеры работают с мелкодисперсным металлическим порошком в качестве строительного материала. После завершения процесса спекания, согласно техническому процессу, весь не отвержденный порошок проходит процедуру "восстановления", которая заключается в его просеивании через систему сит. Это позволяет отделить огарки, возникшие в ходе разбрызгивания расплава, или непреднамеренно спекшиеся гранулы, находившиеся рядом с траекторией прохождения лазерного луча.

Но и здесь не удалось уйти от скрытых проблем. Они в основном связаны со стоимостью расходных материалов. Среднерыночная цена импортных металлических порошков на условиях DDP в России составляет: сталь инструментальная – 115 долларов/кг, титан (аналог ВТ-6) – 715 долларов/кг, алюминий – 175 долларов/кг, никелевый жаропрочный сплав – 180 долларов/кг. Итоговая цена во многом зависит от объема единовременного заказа. Так, к примеру, разница в стоимости 1 кг Ti-6Al-4V может составлять более



80 долларов при заказах в 50 и 250 килограмм. Надо также учитывать высокую насыпную плотность – от 2,7 гр/см<sup>3</sup> у алюминия и до 8,2 гр/см<sup>3</sup> у никелевого порошка. Себестоимость 1 кубического сантиметра изделия из обыкновенной нержавеющей стали 316L (ближайший аналог в ГОСТ-Р 03X17H14M3) может составлять 0,81 долларов при насыпной плотности 7 гр/см<sup>3</sup> и цены в 117 долларов за кг, что равно 55 рублям при учете курса в 68 руб. за доллар. Операционные издержки производства резко ограничивают спектр применения. Реальная экономия на материале может возникать только в специализированных отраслях, где конечная цена детали высокая.

Помимо возросшей практически в два раза закупочной стоимости расходных материалов из-за девальвации рубля также возникают проблемы с возможностью поставок. Такие материалы, как алюминий и титан, считаются стратегически важными. Зарубежному производителю требуется наличие экспортной лицензии для вывоза их за границу. Соответственно предприятия ВПК и атомной отрасли неизбежно столкнутся с запретами, даже если против них не введены прямые санкции со стороны Евросоюза или США.

Также нельзя не отметить, что большинство производителей систем лазерного спекания стремятся заработать не только на продаже оборудования и его последующем обслуживании, но и на поставке расходных материалов. Немецкий производитель АМ-машин EOS GmbH поставляет системы с закрытыми настройками программного обеспечения. Таким образом, конечный пользователь не может работать с материалами отличными от тех, что поставляет компания-производитель. С другой стороны, за дополнительные средства можно приобрести гибкие системы, в которых можно менять основные настройки. Но в таком случае клиенты не редко получают уведомления о том, что установка будет снята с гарантии в случае использования сторонних материалов.

Отдельным вопросом стоит проблема отличия химического состава зарубежных металлопорошковых композиций от наиболее широко распространенных у нас. Поставляемые иностранные порошки имеют состав, который аналогичен западным стандартам, – ASTM, DIN, UNS и далее. В отечественном же машиностроении используется множество уникальных сплавов, которые разрабатывались еще во времена

СССР. Расходные материалы, поставляемые к АМ-установкам, являются не только слишком дорогими, но и не подходящими по составу. Даже в случае наличия сертификации, которая узаконивала бы лазерное спекание как инновационный метод производства металлических деталей, невозможно было бы начать изготавливать традиционные детали новым способом. Спецификация всех изделий заранее согласовывается в компетентных органах, и различие материалов по химическому составу сделает быстрый перенос производственного процесса по выпуску уже существующих деталей на аддитивные рельсы невозможным.

### **ДОЛГОЖДАННЫЙ ОТВЕТ – РЕАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ В МЕТАЛЛЕ!**

Прочитав и проанализировав вышеизложенный материал, может сложиться впечатление, что 3D-печать в металле – это несбыточная мечта для российских предприятий, и они еще долго не смогут использовать преимущества аддитивного производства, в очередной раз отпуская западных конкурентов далеко вперед. На самом деле это не совсем так. Пришло время ответить на ключевой вопрос статьи и раскрыть области, где аддитивные технологии могут реально применяться в России?

### **НИОКР – СТАРАЕМСЯ ОПЕРЕДИТЬ ВРЕМЯ!**

Эпоха инновационной экономики сделала время ключевым фактором успеха современных предприятий. При разработке и создании новой промышленной продукции особое значение приобретает скорость прохождения НИОКР, которая в свою очередь зависит от возможностей опытного производства. В данном случае во всем масштабе раскрываются преимущества 3D-печати. Конструктору требуется только создать 3D-модель. Далее он сможет быстро получить готовое металлическое изделие. Безусловно, деталь будет не репрезентативной для проведения большинства тестов, если конечное производство планируется по традиционным технологиям. Но она отлично подойдет для временной работы в качестве какого-либо узла или для проведения первичных аэро- и гидродинамических исследований.

В своей деятельности конструкторы не могут полагаться только на симуляторы, которые, пусть и с большой долей вероятности, позволяют проверить созданную 3D-модель, но только в вир-



**Рис.5.** Крышка корпуса, спроектированная для традиционного производства

туальной реальности. Создание же полнофункционального металлического образца требует квалифицированной работы технологов для быстрого написания программы на станок с ЧПУ или высоких навыков оператора для работы на универсальном оборудовании. Установки лазерного спекания являются уникальным реше-

нием данных проблем. Аддитивные технологии позволяют в значительно более сжатые сроки изготовить физический образец и также быстро внести изменения в конструктивные особенности. Цикл НИОКР снижается в десятки раз, позволяя выводить продукцию на рынок быстрее или избегать многомиллионных убытков, отработывая решение, прежде чем ввязываться в технологически сложные проекты или брать трудновыполнимые заказы.

Кажется, что АМ-машины действительно могут стать лучшим другом конструкторов. Но руководство предприятий часто расценивает этот вопрос по-другому. Организации, которые не получают дотации из федерального бюджета, трепетно относятся к вопросам инвестирования. Очень сложно просчитать экономический эффект в денежном выражении, который сможет получить предприятие от ускорения НИОКР после покупки дорогостоящего оборудования.

Аддитивные технологии уже закрепили за собой звание одного из наиболее перспективных направлений развития промышленного производства и будут только развиваться в выбранном направлении. В России пока еще новый метод производства рано или поздно пройдет





**Рис.6.** Пресс-форма с интегрированными конформно охлаждаемыми каналами

сертификацию, будут разработаны стандарты и налажен выпуск отечественных материалов. В недалеком будущем конфликт "конструктора – технолога" с большой долей вероятности сможет быть сильно нивелирован, в том числе за счет решений цифрового производства. Наиболее развитые и инновационные предприятия России уже должны задумываться о начале изучения данного метода производства, чтобы быть во всеоружии к моменту качественного скачка в этой передовой области.

## КОНЕЧНЫЕ ИЗДЕЛИЯ – ВСЕ-ТАКИ МОЖНО?

Разгромное начало статьи практически не оставило шансов на воскрешение темы производства функциональных металлических деталей методом лазерного спекания. Тем не менее, аддитивные технологии, как и любые другие, имеют свою нишу. В России она значительно уже, чем на Западе, но все же она есть. Изначально надо отталкиваться от технологических ограничений процесса, понимая, что для тяжелого машиностроения или крупносерийного производства метод не подойдет. Скорость 3D-печати в металле варьируется от 5 до 20 см<sup>3</sup>/ч в случае работы одного лазера. В ряде АМ-машин установлено 2 или 4 лазера, которые повышают производительность до максимальной, но редко достижимой на практике, т.е. до 75 см<sup>3</sup>/ч, и непропорционально сильно увеличивают стоимость оборудования. Даже используя такую скорость, можно назвать целый ряд деталей, производство которых традиционной механической обработкой занимает больше времени. Такими изделиями могут быть сложные

корпуса приборов. На рис.5 приведен пример 3D-модели крышки корпуса с габаритами более 10 см в диаметре. Подобная категория деталей не всегда требует сертификации, так как они не испытывают сильных механических нагрузок. Требования в поверхностной шероховатости тоже приемлемые. Приведенная модель уже имеет сложную геометрию, даже без специальной оптимизации под 3D-печать, под чем подразумевается облегчение стенок для экономии материала, времени и себестоимости. Ее производство по аддитивному методу получается выгоднее. Время печати должно занять около 1,5–2,5 часов в зависимости от настроек принтера. Себестоимость производства, отталкиваясь от затрат на материал, составит порядка 20 долларов без учета амортизации АМ-машины, электроэнергии, стоимости работы оператора и других операционных расходов. В настоящий момент данная деталь выгрызается из цельного куска алюминия на 5-осевом фрезерном обрабатывающем центре с переустановками, что может в комплексе занимать больше времени, а к издержкам как минимум прибавляется расход на режущий инструмент. Изготовление ее методом литья под давлением также трудоемко и требует отработки конструкции пресс-формы, наличия специального литейного оборудования и все той же финишной обработки на станке. Приведенный пример ярко демонстрирует, что 3D-печать может найти свое применение при переводе на нее производства уже выпускаемых изделий. Желательно помнить следующие условия, которые во многом необходимы для успешного внедрения АМ-машин в производственный цикл:

- не требуется сертификация изделия. В большинстве случаев справедливо для деталей, не работающих под большими нагрузками;
- точности на детали – не основной параметр. Худшее качество, которое выдает принтер, составляет 0,1%/длину. В основном точность не хуже  $\pm 40$  мкм;
- шероховатость не играет ключевой роли, и можно удовлетвориться 3–6 классом чистоты поверхности без механической обработки;
- традиционный процесс получения детали трудоемок и требует загрузки дорогостоящего оборудования, такого как 5-осевые фрезерные станки;
- технологический комплекс производства занимает много времени, как в случае электроэрозионной обработкой.



Даже если конкретная деталь не соответствует какому-то из этих условий, то это не значит, что аддитивный метод производства не подходит. В некоторых случаях требуется дополнительная механическая обработка, которая будет не так продолжительна по времени, но позволит в итоге получить требуемые параметры.

Конечно же, при расчете экономического эффекта от производства деталей новым методом существенную роль играют капитальные издержки на приобретение оборудования. Цена установок лазерного спекания с зоной построения в 250×250×280 мм и дополнительным оборудованием колеблется от 600 тыс. долларов до 1,1 млн. в зависимости от конкретной комплектации. Данные цифры могут быть сравнимы со стоимостью комплекса дорогостоящих станков для многоосевой обработки. Как и везде, каждый технологический проект надо рассчитывать отдельно, но уже существует и российский положительный опыт такого рода технического аудита.

Наиболее успешное применение технологии лазерного спекания металлических порошков проявилось при создании пресс-форм.

Во-первых, процесс изготовления пресс-формы крайне трудоемкий и времязатратный.

Требуется спроектировать все части разъемной формы. Далее их изготавливают методом резания на станках с ЧПУ. Следующим шагом является пробный пролив и опять такой же длительный цикл доработки конструкции. В совокупности все описанные мероприятия могут занимать время от 1 до 3–6 месяцев в зависимости от квалификации персонала и срочности проекта. Аддитивные технологии позволяют в разы быстрее подготовить начало серийного производства отливок. Так как пресс-форма обычно не сертифицируется, а по физико-механическим свойствам, стойкости и времени службы напечатанное изделие не уступает традиционно изготовленным, то ее можно использовать при литье под давлением серийных изделий.

Во-вторых, 3D-печать используется для переделки морально устаревшей оснастки, ее ремонта или упрочнения. Изготовленная традиционным методом деталь может быть помещена и зафиксирована в рабочей камере. Далее платформа построения опускается на длину детали плюс один шаг построения, засыпается материал, и процесс спекания идет в стандартном режиме. Благодаря высокой адгезии нанесенные 3D-печатью слои прочно скрепляются с осно-



ванием. Но для технологии SLS данный процесс является достаточно трудновыполнимым и не во всех случаях может быть успешно реализован. Для нанесения очередного слоя поверхность, на которую наплавляется новый материал, должна иметь гладкую ровную структуру и располагаться параллельно плоскости платформы построения. Для решения задач подобного типа существует отдельный класс систем, функционирующих по принципу Direct Deposition, но в статье речь о них идти не будет.

В-третьих, аддитивные технологии позволяют вырастить деталь с уже заложенными конформно-охлаждаемыми каналами сложной конфигурации, повторяющей форму отливки. На рис.6 можно ознакомиться с примером такой пресс-формы. Исследования, проведенные южнокорейской компаний InssTek совместно с Kia Motors, выявили, что производительность термопластавтоматов может увеличиваться более чем на 50% благодаря качественному охлаждению отливки, которая проводит значительно меньше времени в форме. В случае литья металла под давлением возможность интеграции охлаждения позволяет управлять структурой кристаллизации металла. Таким образом, АМ-машины реально помогают значительно повысить эффективность производства и применяться именно для решения задач по серийному выпуску полимерных, пластиковых и металлических отливок.

Отдельно необходимо рассмотреть вопрос об организации производства нового типа деталей с нуля. Здесь, конечно же, нельзя говорить о высокосерийном производстве. В российских реалиях речь в основном идет о создании деталей нового типа для ВПК или ракетно-космического сектора. Такие изделия характеризуются уникальностью и сложностью, а также высокой конечной стоимостью. Проблемы с сертификацией можно решить двумя путями. Конструктор под свою ответственность заверяет данную деталь, а далее следует выбор заказчика – согласиться с ее использованием или нет. Как пример можно рассмотреть выпуск инновационного вооружения, такого как ракеты, корпуса которых существенно облегчены благодаря использованию сотовых структур или сетчатых конструкций. С другой стороны, в стратегически важных отраслях, таких как космическая промышленность, ряд предприятий имеет достаточно полномочий, чтобы самостоятельно сертифицировать продукт. "ГКНПЦ им. М.В.Хруничева", к примеру, может внедрить аддитивные технологии и ори-

ентироваться на их возможности при проектировании новых изделий. Предприятие имеет достаточный научный и производственный потенциал. Стоимость производства конечного продукта, будь то спутник или часть ракетопостеля, настолько большая, что ради достижения высоких показателей допускается удорожание себестоимости производства, если оно несет технические преимущества конечному продукту.

Можно рассмотреть положительный опыт пермского "Авиадвигателя", который объединился с ВИАМ, образовав научно-производственное партнерство, позволившее в сжатые сроки освоить изготовление фронтового устройства камеры сгорания перспективного авиационного двигателя ПД-14 с применением отечественной металлопорошковой композиции. Полученные завихрители отвечают всем требованиям конструкторской документации. При этом цикл изготовления таких завихрителей сократился более чем в 10 раз – с 2-х месяцев до пяти дней по сравнению с применением технологии литья по выплавляемым моделям.

### **ОШИБКА НОВИЧКА – УЧИМСЯ НА ОПЫТЕ КОЛЛЕГ!!!**

Первое, что стоит сделать прежде чем принимать решение о покупке АМ-машины, – вспомнить изречение, которое все не раз слышали в школе: "Умный учится на чужих ошибках, а дурак – на своих". За последние годы в России накопился приличный опыт использования аддитивных технологий. Хотелось бы рассмотреть несколько наиболее типичных ситуаций, на которых обжигаются многие.

Финансирование – это одна из самых больших тем для российской промышленности. Сокращение бюджетных дотаций в 2015 году коснулось практически всех государственных предприятий. Ресурсов стало меньше, а тратить собственные средства на что-либо не срочно необходимое никто не любит. Но так как правительство стало активно интересоваться аддитивными технологиями, то появились специально выделенные на развитие данной сферы денежные средства. Их распределяют по отдельным программам, и они войдут в стандартно выделяемое предприятию финансирование. Кажется, что выход из ситуации найден, и можно спокойно приобретать АМ-машины. Именно такие рассуждения привели к принятию целого ряда нерентабельных проектов. Промышленные предприятия и научно-исследовательские институты заку-



пили установки лазерного спекания, мало заботясь о том, что они реально будут на них делать и как их окупать?

При расчете данных проектов многие совершают ошибку, ориентируясь просто на себестоимость 1 кг металлического порошка. Необходимо брать в расчет, что эффективность производства напрямую зависит от процента использования пространства построения. К тому же, к примеру, для печати одной детали габаритной по оси Z придется иметь достаточное количество порошка для заполнения необходимой высоты в бункере. Производства одного изделия высотой в 250 мм требует загрузки в стандартную установку от 40 до 100 кг металлического порошка в зависимости от его насыпной плотности. Необходимо постоянно поддерживать значительный запас различных материалов, чтобы быть в состоянии обеспечить гибкость и своевременность производства.

Существенная часть эксплуатационных расходов также приходится на создание внутренней защитной атмосферы. Для работы с порошками стали и никеля используется азот. Инертный газ может производиться из воздуха генератором с чистотой не менее 99,998%. Для получения же

хорошего качества при работе с алюминием и титаном требуется закачка аргона в камеру для построения. Аргон считается дорогим промышленным газом. Даже несмотря на систему его рециркуляции, средний расход при процессе лазерного спекания, а не при первоначальной закачке, составляет около 2-2,5 л/мин.

Европейские производители определяют продажную стоимость установки, руководствуясь в расчетах тем, что она будет практически непрерывно работать в течение 5 лет. Тогда ее можно будет окупить с учетом небольшой маржи на изделиях, выплаты налогов и т. д. От российских заказчиков требуется адекватное понимание того, что оборудование сможет окупить себя в реальном денежном эквиваленте только при правильном подходе. В ином случае придется довольствоваться только слабо измеримым эффектом от оптимизации НИОКР.

Опять поднимая кадровый вопрос, стоит заметить, что учиться надо не только на опыте коллег, но и непосредственно у них самих. В России уже достаточно много пользователей АМ-машин, которые могут поделиться своим опытом. Ряд университетов, таких как ПНИПУ и СПбГПУ, уже разработали собственные программы по обуче-

нию специалистов особенностям проектирования и работы на установках лазерного спекания. Министерство науки и образования также подключилось к вопросу решения кадровой политики для инновационной сферы.

## ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В ДЕЙСТВИИ – СОБСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПОРОШКОВ!

В статье уже был рассмотрен вопрос, связанный с проблемами зависимости от иностранных расходных материалов. Проблемы, безусловно, известны и правительству, и промышленности. Наиболее значимый вклад в развитие отечественного производства металлопорошковых композиций вносит ФГУП "ВИАМ" – Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. Но вначале стоит разобраться в специфике выпуска расходных материалов для 3D-принтеров.

В установках лазерного спекания в основном используются мелкодисперсные порошки с размерами гранул от 10 до 45 мкм. Дополнительным требованием является сферическая форма частиц, которая позволяет обеспечить лучшую насыпную плотность при разравнивании в камере построения. Основной способ получение металлического порошка для аддитивного производства – это "диспергирование расплава" или, другими словами, атонизация. Существуют различные технологии атонизации, такие как газовая, водяная, центробежная, плазменная, ультразвуковая, вакуумная и другие. Каждый из названных подходов имеет свои отличия по производительности, получаемому минимальному размеру частиц и типу перерабатываемых сплавов. Общим неизменно остается подход, который заключается в распылении металлического расплава. Современные атомайзеры – установки для получения порошковых композиций – позволяют получать широкий спектр металлических порошков равномерного химического состава и со стабильной дисперсностью частиц. Рис.7 демонстрирует пример работы газового атомайзера. Производительность атомайзеров сильно зависит от их класса, который, в свою очередь, зависит от объема плавильной камеры или тигля. Так, лабораторные установки могут выпускать от 1-5 кг порошка в день, тогда как промышленные позволяют производить до 5 тонн в зависимости от технологии, требуемой дисперсности и материала. Безусловно, стоит отметить,

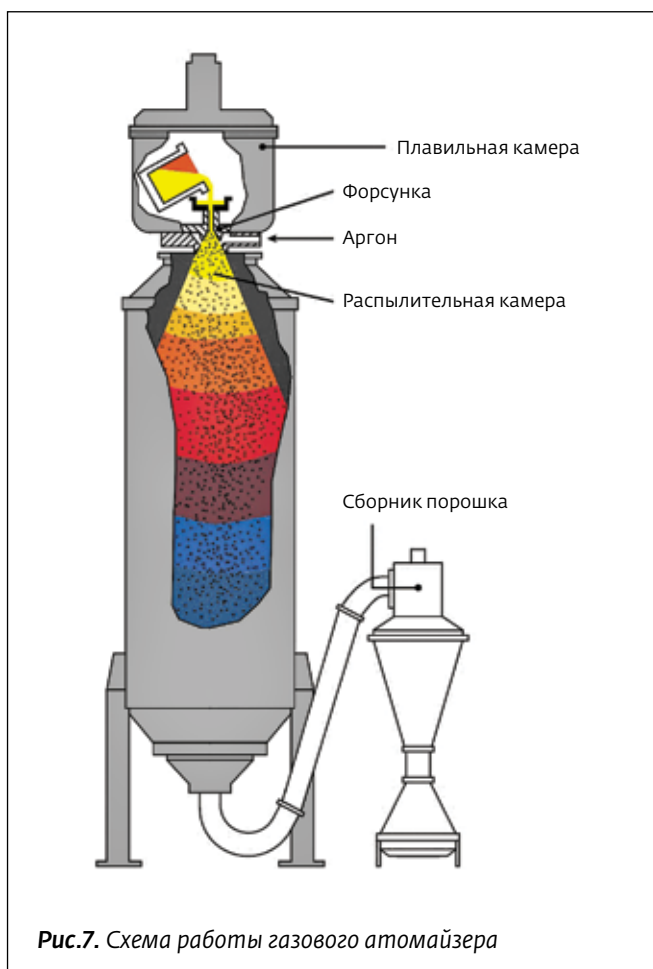


Рис.7. Схема работы газового атомайзера

что процесс производства порошков является трудоемким, требует длительной отладки и подготовки.

Опыт ВИАМ в данной области довольно обширный. Предприятие имеет производственную базу, позволяющую изготавливать металлопорошковые композиции, проверять качество композиций с помощью электронных и оптических микроскопов, отрабатывать режимы спекания на АМ-машине, контролировать внутреннюю структуру на томографе и др. Институт стремится обеспечить своих заказчиков комплексными решениями. Сегодня ВИАМ располагает только лабораторным атомайзером производства фирмы PSI, на котором может получать лишь порошки стальных и никелевых сплавов. Общая производительность остается на низком уровне. В 2014 году была предпринята попытка приобрести промышленный атомайзер VIGA из Германии, но она не увенчалась успехом из-за неполучения экспортной лицензии, после введения первого пакета санкций Евросоюзом.







Помимо ВИАМ различные российские компании делают попытки выйти на данный рынок и стать фактически монополистом в области производства отечественных металлопорошковых композиций. Отдельные успехи демонстрируют ОАО "Композит", Уральский электрохимический комбинат и даже частные компании, такие как "Нормин". Но пока метод 3D-печати не прошел сертификацию, многие предприятия не будут даже задумываться о приобретении АМ-машин. Без наличия спроса отечественное производство порошков не сможет достаточно стабильно развиваться. А без российских порошков будет крайне сложно провести сертификацию. Получается своеобразный замкнутый круг. Разомкнуть его может лишь облегчение и убыстрение процесса стандартизации.

Уже можно видеть первые правильные шаги в этом направлении. Правительство РФ в лице главы Минпромторга Дениса Мантурова планирует создать Специализированный центр материаловедения на базе все того же ВИАМ. Но в действительности радует именно то, что центр возьмет на себя роль системного интегратора, который объединит и скоординирует все исследования в данной области, а не только профильные – авиационные.

### **ЗАПАДНЫЕ САНКЦИИ НЕ ПОМЕХА – ОРИЕНТАЦИЯ В СТОРОНУ КИТАЯ!**

Статья постепенно стала обретать все более позитивный тон. Но остался не обсужденным еще один вопрос, связанный с санкциями, которые ввели Европейский союз и США. Под запрет экспорта в Россию попало все оборудование, которое можно приравнять к технологиям двойного назначения. Установки лазерного спекания, безусловно, были отнесены к данной категории. В большинстве случаев 3D-принтеры, работающие с металлическими порошками, применяются в аэрокосмическом секторе, микроэлектронике и ВПК – все опасные для Запада отрасли. Основные же производители АМ-установок являются резидентами Соединенных Штатах Америки или Германии. Так, если действовать по правилам, то ни один конечный пользователь, даже пусть и НИИ, не сможет официально стать правообладателем данных систем.

Даже модный в последнее время тренд импортозамещения не сможет решить эту трудную проблему, поскольку, просто-напросто, в России не производятся установки лазерного спекания металлических порошков. Множе-

ство предприятий стремятся начать разработки в данной области. Но к сожалению, самой большой мотивацией является стремление получить дополнительное финансирование под предлагаемый проект и скорее вывести хоть какой образец на рынок. А уж далее политика импортозамещения сделает свое дело и поспособствует продвижению АМ-машины. Но есть и отдельные довольно успешные попытки МГТУ "Станкин", Томского политехнического (ТПУ) и Уральского федерального университетов (УрФУ), но они либо еще находятся на стадии чертежей, либо представляют интерес сугубо для научных целей.

На самом деле, выход из данной ситуации есть, и он очень простой. Наше государство не зря берет курс на более тесную экономическую интеграцию с азиатскими партнерами, в том числе и с Китайской Народной Республикой. В настоящее время в Китае работают более двадцати исследовательских организаций и 45 университетов по проблеме аддитивных технологий. Их изыскания не проходят без следа. При поддержке правительства в Китае образовался целый ряд коммерческих компаний, которые развивают культивированные в научных стенах разработки. В этом отношении хотелось бы выделить компанию Hunan Farsoon High-tech Co. Ltd, основатель которой является также директором института AMTRI (Additive Manufacturing Technology Research Institute). Hunan Farsoon в апреле 2015 года представила на рынок систему лазерного спекания FS271M, которая работает с широким спектром металлических порошков. В таблице приведено сравнение основных технических параметров системы FS271M с наиболее популярными моделями, производимыми в Германии. Даже в ходе поверхностного анализа можно выявить, что оборудование, сделанное в КНР, по характеристикам не уступает аналогичным европейским образцам.

Единственным препятствием, которое может помешать массово переключиться на закупку промышленных 3D-принтеров в Китае, является предвзятое отношение со стороны технологов и инженеров. Специалисты не раз сталкивались с производственным браком, завышением характеристик и откровенной халтурой при приобретении китайского оборудования, такого как станки, термопластавтоматы или промышленные компьютеры. АМ-машины нельзя отнести к данной категории, так как, в отличие от практически всех других сфер, китайские ученые не повторяли за Западом, а шли параллельно





Сравнение ходовых моделей систем лазерного спекания металлических порошков (SLS)

|                              | FS271M      | EOS M290    | Concept Laser M2         | SLM Solutions 280HL |
|------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| Страна-производитель         | Китай       | Германия    | Германия                 | Германия            |
| Габариты зоны построения, мм | 275×275×320 | 250×250×325 | 250×250×280              | 280×280×350         |
| Мощность лазера, Вт          | 500         | 400         | 200/400<br>(2×200/2×400) | 400<br>(400+1000)   |
| Толщина слоя, мкм            | 20–100      | 20–40       | 20–80                    | 20–40               |
| Скорость сканирования, м/с   | до 15       | до 7        | до 7                     | до 20               |
| Диаметр фокуса луча, мкм     | 100         | 100         | 50                       | 70–130              |

с ним. Многие технические решения выгодно отличают китайские системы. Так, компания Farsoon разработала уникальное программное обеспечение ALL STAR V1.0, позволяющее в автоматическом/ручном режиме контролировать системные параметры и визуализировать процесс построения в режиме реального времени. Производитель также создал и запатентовал систему управления лазером FS DLEC 100, обеспечивающую высокую точность и повторяемость позиционирования лазерного луча, а также стабильность работы лазера. В качестве основных рабочих элементов в FS271M используются генератор лазера и оптическая система производства США и Германии. Таким образом, наиболее важные и дорогостоящие элементы установки имеют высочайшее качество, что обеспечивает надежность ее работы.

В отличие от немецких установок, FS271M имеет открытые рабочие параметры, что позволяет оператору полностью контролировать работу системы, изменяя и настраивая:

- мощность и пятно фокуса лазера,
- скорость сканирования и штриховки,
- температуру платформы для построения,
- толщину наносимого слоя и т.д.

Farsoon стремится обеспечить своих заказчиков максимальной гибкостью производства и может продать как готовое решение под ключ, так и универсальное оборудование, которое можно адаптировать под работу с российскими материалами. Но в таком случае перед оператором будет стоять задача в подборе оптимального соотношения параметров настроек системы с учетом химического и фракционного состава порошка, для обеспечения максимально качественного построения с минимальной шероховатостью и высокой плотностью.

Отдельную роль, конечно же, играет цена. Китайское оборудование продается в диапазоне от 600 до 750 тыс. долларов, что примерно на 25% дешевле европейских аналогов. Приобретение системы производства КНР позволит существенно сократить затраты на покупку АМ-машин и сохранить рентабельность их использования, что особенно важно в условиях слабого курса рубля и сокращения бюджетного финансирования.

### ПОКА ЕЩЕ НЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ – ВЫВОДЫ ПО ТЕМЕ

3D-печать в металле – одно из наиболее перспективных направлений развития промышленного производства. Как и при освоении любых новых технологий, его продвижение скрепит и буксует, на каждом шагу натываясь на непонимание и бюрократические проблемы. Но когда было по-другому? В статье раскрыты подводные камни, которые ожидают каждого технолога или конструктора, думающего о приобретении АМ-машин для спекания металлических порошков. Несмотря на все препятствия, аддитивные технологии уже можно успешно применять в промышленности, повышая эффективность работы предприятия. Так что на вопрос, как и где применять, ответ уже дан!

### ПРОДОЛЖЕНИЕ СЛЕДУЕТ – ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ НА ПОДХОДЕ

С продолжением статьи, в котором будет раскрыта специфика модернизации литейного производства с помощью 3D-принтеров, а также рассмотрен вопрос прототипирования в пластике, можно будет ознакомиться в следующем номере журнала "Фотоника". ●