



# НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

## ЧТО СДЕРЖИВАЕТ РАЗВИТИЕ ПРОГРЕССИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИИ?

– Евгений Николаевич, в современном материаловедении все более значимую роль играют аддитивные технологии (АТ), благодаря которым открываются новые возможности в деле прогнозирования и конструирования материалов с заданными свойствами. Каково, на ваш взгляд, подлинное место АТ в современном инновационном процессе и глобальном научно-технологическом развитии?

– По мнению экспертов, аддитивное производство (которое еще называют 3D-Printing, учитывая сам процесс создания трехмерных объектов) можно рассматривать как ответ на вызовы научно-технического развития в эпоху перехода от индустриального уклада к постиндустриальному. Этот переход характеризуется кардинальным сокращением участия человека в производственных процессах, вплоть до полной автоматизации производства продукции. Важным условием становится организация товарного производства на новой, постиндустриальной базе с использованием гибких технологий, оборудования, инструментов. Так как рынок постепенно уходит от массовой продукции и все больше ориентируется на удовлетворение специфических запросов потребителя, особую ценность приобретает возможность организации мелкосерийного или, как еще говорят, кастомизированного (от англ. Customization) производства.

Кастомизация предполагает глубокие изменения, связанные как с ускорением и удешевлением разработки новых моделей и типов продукции, так и с организацией гибких производственных систем, оперативно реагирующих на изменение рыночных потребностей. Такие возможности открываются благодаря освоению



3D-печати, параллельного удаленного проектирования объектов с использованием облачных технологий и т.д., а также внедрению передовых бизнес-моделей. Бизнес в сфере высокотехнологичного производства – это восходящий тренд современного технического и экономического прогресса.

Уже сегодня в ряде отраслей аддитивное производство становится

**Евгений Каблов**  
Генеральный директор  
Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ), академик РАН, профессор

предпочтительнее традиционного. Например, при изготовлении небольших партий уникальных деталей и в тех случаях, когда стоимость станочной обработки слишком высока, либо такая обработка в принципе невозможна. Также растет потребность в ремонте и восстановлении сложных деталей методами АТ.

– В чем принципиальное отличие АТ от традиционных технологий и какие преимущества может дать их практическое использование?

– Можно указать на несколько очевидных преимуществ. Во-первых, преодолевается извечный конфликт между конструктором и технологом, так как предельно сокращается дистанция между появлением замысла и воплощением идеи в готовое изделие. Возникает новая концепция проектирования: можно фан-

Рис. 1. Рынок аддитивных технологий (мировой опыт)



тазировать, придумывать, пробовать – и все это будет материализовано буквально на глазах конструктора.

Во-вторых, скорость действия современных 3D-устройств такова, что позволяет существенно опережать традиционное производство при организации выпуска продукции мелкими сериями. Снижается себестоимость. Намного меньше становится проблем в отношениях заказчика и исполнителя: последний по желанию первого может оперативно «вырастить» десятки или даже сотни изделий, выпустить небольшую партию микроэлементов, не обращая при этом к смежникам. А скорость и оперативность выполнения поставок в современных условиях, как известно, становятся важнейшими факторами конкурентоспособности товара.

В-третьих, меняется взгляд на промышленное производство. Исчезает необходимость создавать заводы для массового выпуска запчастей, формировать дистрибьюторские сети, развивать логистику поставок и т.д. Достаточно иметь региональный инженеринговый центр, оснащенный компактной 3D-установкой, который будет оперативно производить нужные детали по мере надобности. По мнению ряда экспертов, в ближайшие 20 лет подобные универсальные мини-заводы заменят массовое производство продукции с высокой конечной стоимостью. Фактически начинается новая промышленная революция, знаменующая появление шестого технологического уклада. Добавьте сюда экономию материалов, которая в каждом конкретном случае может быть достаточно существенной: коэффициент использования материалов возрастает практически до единицы. В принципе, применяя аддитивные технологии, можно изготовить детали любой формы и сложности, в том числе решетчатые пространственные облегченные неразборные детали или изделия с внутренними каналами для охлаждения, произвести которые традиционными методами невозможно.

И наконец, трехмерные компьютерные модели деталей можно передавать с помощью Интернета в любую точку мира, где в данную минуту требуется их производство. Уже появились идеи производства, сосредоточенного в fablabs (цифровых фабриках-лабораториях), которые реализуют совместные проекты, передавая друг другу данные в электронном виде. Появление таких центров в местах, максимально близких к потребителю, кардинально изменит под-



**Уже сегодня в ряде отраслей аддитивное производство становится предпочтительнее традиционного. Например, при изготовлении небольших партий уникальных деталей и в тех случаях, когда стоимость станочной обработки слишком высока, либо такая обработка в принципе невозможна.**

ход к экономике и логистике, позволив полностью реализовать принцип «производство по запросу» и максимально сократив при этом затраты времени и ресурсов.

**– Как вы оцениваете текущее состояние аддитивного производства в мире?**

– Существует довольно много технологий, которые можно назвать аддитивными. Их объединяет одно: создание изделия происходит путем добавления материала (от англ. add – добавлять) в отличие от удаления «лишнего» материала, как это имеет место в традиционных технологиях. И еще один принципиальный момент: процесс осуществляется по данным 3D-моделирования.

Сегодня аддитивные технологии переживают бум, хотя объемы мирового рынка АТ сравнительно скромны – около 2,7 млрд долл. выручки в 2013 году, из которых 54% приходится на услуги, 27% – на оборудование, 19% – на материалы. Но рынок этот быстро растет: среднегодовые темпы за период 2007–2013 годов составили около 19%, а по

прогнозам компании Wohler Associates, в 2013–2021 годах они ускорятся до 32% (рис. 1). В сегменте оборудования быстрее всего сейчас растут производство и продажи персональных 3D-принтеров. Более половины рынка материалов занимают фотополимеры, еще четверть – полимеры для лазерного спекания. Доля металлов в объеме продаж материалов для 3D-печати невелика – около 6%.

Основная сфера использования АТ – производство единичных и мелких партий уникальных деталей из дорогих материалов. Но производить этим методом можно практически все что угодно. Например, компания Local Motors представила на автосалоне в Чикаго в 2014 году первый пригодный для поездок электромобиль, изготовленный с помощью лазерной системы по технологии FDM: печать автомобиля из термопластика, усиленного углеродными волокнами заняла около 44 часов. А компания FOS (Нидерланды) с помощью технологии LS производит из нейлонового порошка предметы обстановки (абжуры, стулья и пр.), заказы на которые собирает через Интернет.



Обширное поле применения АТ открывается в медицине, где они востребованы для изготовления специального хирургического инструмента, индивидуальных протезов, имплантов, тканей и органов из клеток человека. Сегодня благодаря этим технологиям уже появились и успешно имплантированы персональные сердечные клапаны, искусственные челюсти, части суставов и т.д.

Особый интерес к аддитивным технологиям проявляет авиационно-космическая промышленность, что и понятно: именно здесь более всего востребованы мелкие серии высокотехнологичных деталей ответственного назначения. Корпорация Boeing с помощью АТ ежегодно изготавливает для самолетов 22 тыс. деталей 300 наименований. General Electric заявила о готовности начать производство топливных форсунок для турбовинтового двигателя LEAP. Компания Airbus намерена за счет использования 3D-печати снизить к 2020 году вес каждого самолета более чем на тонну. Очень перспективны эти технологии в сфере ремонта и восстановления деталей, особенно таких сложных, как турбинные лопатки.

Около 38% рынка аддитивных технологий занимают США, примерно 9% приходится на долю Германии, третью позицию занимает Китай с долей 8,7%. В 22 странах созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс GARPA – Global Alliance of Rapid Prototyping Associations. Этот альянс создал международный комитет, который утверждает нормативные документы и обеспечивает кооперацию членов альянса в деле разработки 3D-моделей. В США действует национальный научный центр по аддитивным технологиям – NAMP, включающий 15 государственных институтов. В последние десять лет американские специалисты активно занимаются разработкой программируемых материалов – с того времени, как в 2007 году Управление перспективных исследований Министерства обороны США начало финансировать соответствующий проект под названием «Программируемый материал» (Programmable Material).

Динамику развития АТ можно представить с использованием схемы трех уровней (этапов) – производство моделей, прототипов, а также деталей и сложных технических систем, в создании которых оптимально реализуется известный принцип единства: «материалы – технологии – конструкции». Повидимому, только освоив первые два

Рис. 3. Оснащенность и области компетенции



уровня и получив надлежащие результаты, можно перейти к производству опытных и серийных партий деталей, полностью отвечающих требованиям конструкторской документации по физико-механическим свойствам. По данным PrisewaterhouseCoopers, сегодня в аэрокосмической отрасли США с применением АТ производится 70% моделей и прототипов и 30% конечных продуктов, используемых в конструкциях (III уровень). В Китае и Германии аналогичное соотношение составляет 85:15. США ставят задачу к 2020 году довести долю деталей III уровня до 80% (рис. 2).

**– Как на этом фоне выглядит наша страна?**

– Более чем скромно. Доля России на мировом рынке аддитивных технологий – около 1,5%. В общем объеме научных публикаций вклад нашей страны занимает примерно 0,8%, и в основном это работы в области лазерной стереолитографии, выполненные еще в Советском Союзе под руководством академика Владислава Панченко в Институте проблем лазерных и информационных технологий (ныне – ИПЛИТ РАН). За последние 15 лет в России был выдан 131 патент по различным аспектам аддитивного производства – это 0,14% от мирового количества. Для сравнения: США, Китай, Южная Корея владеют 90% патентов в этой сфере. Развитием и использованием АТ в нашей стране, к сожалению, пока занимается сравнительно небольшое количество исследовательских центров. Еще меньше предприятий, обладающих мощностями для производ-

ства функциональных комплектующих из материалов с хорошими эксплуатационными характеристиками. Анализ показывает, что сегодня мы находимся на начальной стадии компетенций в сфере аддитивных технологий, если исходить из вышеописанной схемы трех уровней. При этом серьезные проблемы связаны с высоким уровнем капитальных затрат на АТ-оборудование, учитывая, что оно приобретает исключительно по импорту. Отечественное производство промышленных 3D-принтеров и других установок практически отсутствует (рис. 3).

**– Какое участие в разработке АТ для отечественного рынка принимает ВИАМ?**

– По мнению многих специалистов, ВИАМ является одним из отечественных лидеров в развитии аддитивных технологий. Мы уверены, что именно эти технологии позволят в полной мере реализовать основные принципы создания материалов и технологий нового поколения, как это предусмотрено в Стратегических направлениях развития материалов и технологий на период до 2030 года – документе, который основан на результатах фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследований, проведенных ВИАМ совместно с ведущими научными организациями страны. Необходимо следовать упомянутому принципу триединства аддитивного производства («материалы – технологии – конструкции») и больше ориентироваться на использование «зеленых» технологий при создании материалов

и комплексных систем защиты. Особое значение при этом имеет реализация на базе цифровых технологий полного жизненного цикла, включающего процесс создания материала, его последующую эксплуатацию в конструкции, диагностики, ремонт, продление ресурса и, наконец, утилизацию.

Серьезным достижением ВИАМ можно считать разработку аддитивного производства полного цикла и изготовление на этой базе с помощью 3D-технологии сложной детали – завихрителя фронтального устройства камеры сгорания перспективного авиационного двигателя ПД-14, предназначенного для нового гражданского самолета МС-21. Эта деталь внесена в конструкторскую документацию и пошла в производство. Благодаря АТ цикл производства завихрителя сократился более чем в 10 раз (рис. 4).

Специалисты нашего института совместно с Фондом перспективных исследований впервые в России изготовили прототип малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) для беспилотных летательных аппаратов. Мы применили технологию послойного лазерного сплавления с использованием металлопорошковых композиций жаропрочного и алюминиевого сплавов, ко-

торые созданы специалистами института. В результате изготовить деталь можно в 30 раз быстрее, чем традиционными способами. При этом использование 3D-печати позволило получить стенку камеры сгорания двигателя толщиной всего 0,3 мм (рис. 5).

Конечно, ВИАМ не претендует на охват всего многообразия методов аддитивного производства. Мы сосредоточились на технологии «селективного синтеза» или лазерного сплавления (SLS – Selective Laser Sintering) и, кроме того, используем прямое лазерное спекание металлов (DLNS – Direct Metal Laser Sintering). В обоих случаях процесс изготовления детали начинается с построения компьютерной модели, которая затем виртуально рассекается на тонкие слои для получения информации о контуре каждого слоя. Исходными материалами служат металлопорошковые композиции. Применяется математическое моделирование технологических процессов, в основе которого лежит знание физико-химических процессов, протекающих в ходе изготовления деталей.

**– Какие препятствия стоят на пути развития аддитивного производства в российской промышленности?**

– К числу проблем, решению которых следует уделить особое внимание, я бы отнес, во-первых, отсутствие промышленных 3D-печатающих установок; во-вторых, дефицит материалов для АТ, разработка которых сама по себе является сложной междисциплинарной задачей; в-третьих, отсутствие инфраструктуры (стандартов, инструментов управления жизненным циклом продукции и т.п.) и, в-четвертых, дефицит квалифицированных кадров.

В настоящее время наметились позитивные сдвиги. Активизировались работы по различным аспектам АТ. Например, в Санкт-Петербургском политехническом университете при участии ВИАМ разрабатывается оборудование для аддитивных технологий и программное обеспечение по управлению им. В этих же направлениях работают специалисты Роскосмоса и компании ТВЭЛ. Стоит отметить работу Объединенной двигателестроительной корпорации, Уральского федерального университета, научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс» и др. Но надо признать, что российские специалисты пока решают эти задачи в партнерстве с иностранными компаниями или тиражируют зарубежный опыт.

**– В свое время порошковая металлургия и производство металлических порошков получили значительное развитие в нашей стране. Можно ли опереться на этот опыт в создании современных материалов для аддитивных технологий?**

– Мы исходим из того, что в этом разделе материаловедения ВИАМ может эффективно реализовать колоссальный опыт отечественных научных школ. Проблема эта весьма актуальна, поскольку на рынке мелкодисперсных порошков разворачивается жесткая конкуренция. Каждая компания – производитель АТ-машин, как правило, предлагает покупателю набор порошков и подробную инструкцию для настройки машины под каждый вид материалов, состав которых, так же как и режимы сплавления, держится в секрете. Для полноценного развития АТ в России необходимо не только устранить зависимость от зарубежных поставщиков, но и создать условия для развертывания собственного производства порошковых композиций, постоянно расширяя ассортимент материалов. Мы уже организовали производство порошков и металлопорошковых композиций определенных видов стабильного качества методом газового распыления расплава.

**Особый интерес к аддитивным технологиям проявляет авиационно-космическая промышленность, что и понятно: именно здесь более всего востребованы мелкие серии высокотехнологичных деталей ответственного назначения.**



Рис. 4. Завихрители фронтального устройства камеры сгорания перспективного авиационного двигателя ПД-14



Рис. 5. Двигатель для беспилотника

**Несмотря на все проблемы, у нас есть достаточная база для роста этого сектора. Ресурсы и вектор развития АТ в целом определены. Изучив опыт конкурентов, в том числе негативный, не повторяя их ошибок, вполне возможно выйти в лидеры там, где мы до последнего времени не обладали заметными достижениями.**

Особо надо сказать о требованиях, предъявляемых к характеристикам порошковых материалов для аддитивных технологий. В первую очередь это обеспечение сферичности, определенного гранулометрического состава с высоким выходом годного, высокая химическая однородность, пониженное содержание газовых примесей. Одним из важных параметров, характеризующих порошок, является  $d_{50}$  – средний диаметр частиц. Например, если  $d_{50}$  равен 40, это означает, что у 50% частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм. Чем больше частиц одного диаметра в партии порошка, тем выше качество получаемых из него металлопорошковых композиций. Задача исследователя состоит в определении оптимальной взаимосвязи таких параметров, как мощность лазера, фракционный и химический состав порошка, шаг и скорость сканирования лазерным лучом, температура плавления материала, а также режимы термической обработки и газостатирования. Это имеет определяющее значение для производства деталей III уровня. И наконец, наиболее существенный момент – создание АТ-машины. В целом мы определили, что

принципиальными для АТ-устройства являются лазер в качестве источника энергии и программное обеспечение по управлению машиной. Эти параметры были выданы изготовителям оборудования.

**– Каковы на сегодня основные результаты развития АТ в нашей стране и какими вам видятся ближайшие перспективы?**

– Исходя из опыта и практики ВИАМ я бы отметил следующие позитивные моменты:

– решена проблема разработки отечественных металлопорошковых композиций;

– создано малотоннажное производство металлопорошковых композиций;

– разработаны технологии селективного лазерного синтеза и проведен комплекс исследований синтезированных материалов;

– на базе ВИАМ организовано опытное аддитивное производство полного цикла, которое включает производство шихтовых заготовок и порошковых композиций, разработку 3D-моделей деталей, разработку технологии лазерного

синтеза, горячее изостатическое прессование и термообработку, контроль качества и свойств;

– начаты работы по стандартизации, для чего создан технический комитет ТК182 и представлен на обсуждение предложенный ВИАМ проект первого ГОСТа «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы – часть 1. Термины и определения» в качестве базового документа по АТ для всех отраслей России.

Если говорить о первоочередных мерах для развития этой сферы в стране, то они подробно изложены в решении представительного круглого стола «На перекрестке науки, образования и промышленности», проведенного в ВИАМе в январе 2016 года. В частности, подчеркивается необходимость кооперации в форме консорциумов, объединяющих институты РАН, федеральные и национальные исследовательские университеты, государственные научные центры, промышленные предприятия и бизнес-структуры. Руководителей этих консорциумов предлагается наделить необходимыми финансовыми и организационными полномочиями и возложить на них персональную ответственность за результаты каждого конкретного проекта.

Сегодня наша страна и ее экономика проходят сложную фазу. Падение цен на углеводороды, объявленные и необъявленные санкции, нерешенность вопросов технологической безопасности вынуждают государство и общество по-новому взглянуть на, казалось бы, примелькавшие темы диверсификации, импортозамещения, несырьевого экспорта и другие проблемы, которые, судя по всему, еще долго будут ограничивать нам доступ к мировым достижениям в области высоких технологий. Поэтому я считаю, что настало время не просто учитывать эту новую реальность, но исходить из нее при составлении дальнейших планов научно-технологического развития России.

Этот подход в полной мере должен быть применен и в области развития аддитивных технологий. Я уверен, что, несмотря на все проблемы, у нас есть достаточная база для роста этого сектора. Ресурсы и вектор развития АТ в целом определены. Изучив опыт конкурентов, в том числе негативный, не повторяя их ошибок, вполне возможно выйти в лидеры там, где мы до последнего времени не обладали заметными достижениями. ■

Беседу вел Юрий Адно