

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ



Юрий Михайлович Михайлов

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННОЙ КОМИССИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – ЗАМЕСТИТЕЛЬ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ КОЛЛЕГИИ ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННОЙ
КОМИССИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ИСПОЛНЯЮЩИЙ ОБЯЗАННОСТИ ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, АКАДЕМИК

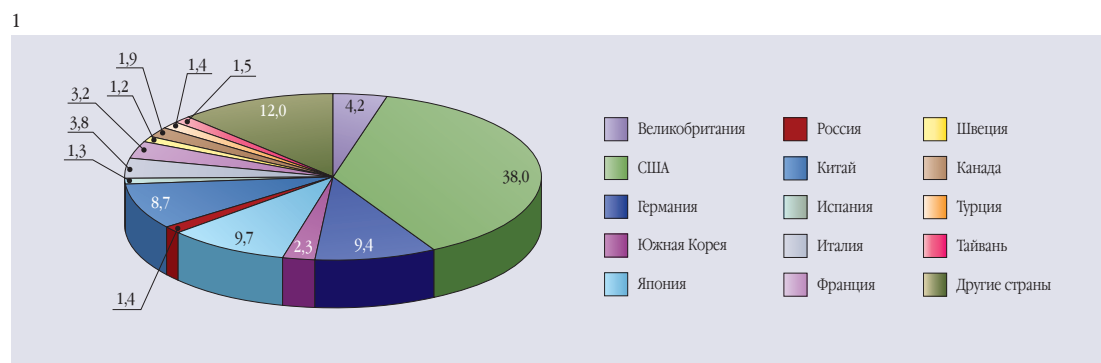
Об аддитивных технологиях в последнее время много пишут и говорят. Этому направлению современного промышленного производства, принадлежащему шестому технологическому укладу, посвящены многие публикации в мировых и отечественных специальных и научно-популярных изданиях.

Аддитивное производство (англ. – additive manufacturing) представляет собой класс перспективных технологий производства деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала (как правило, послойного) – в противоположность так называемому вычитающему производству (например, традиционной механической обработке).

Процессы, используемые в аддитивном производстве, определяются состоянием применяемых материалов:

- жидкое (полимеры) – стереолитография, послойная наплавка, струйная печать;
- порошкообразное (полимеры, керамика) – 3D-печать, селективное лазерное спекание, селективная лазерная плавка;
- порошкообразное (металлы) – прямое лазерное спекание металлов, электронно-лучевая плавка, прямое нанесение металлов, точное лазерное формование;
- твердое (полимеры, металлы, керамика, композиционные материалы) – послойное изготовление объектов из листового материала (листы), произвольное экструзионное формование (проволока).

Указанные технологические процессы к настоящему времени освоены рядом зарубежных компаний. Так, компания Boeing в последние годы изготавливает более 22 тыс.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА УСТАНОВЛЕННОГО АДДИТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО СТРАНАМ МИРА, %

Источник: данные ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация».



деталей 300 наименований для 10 типов военных и коммерческих летательных аппаратов, включая Dreamliner, а по заявлению представителя компании General Electric через 10 лет примерно половина изготавливаемых ими деталей будет получена с помощью аддитивных технологий.

Мировой рынок аддитивных технологий с 2010 по 2014 год прирастал в среднем на 27% в год и достиг объема в 3 млрд долларов, из которых примерно 40% приходится на оборудование и материалы, а 60% – на инженеринговые услуги (разработка математических моделей, технологий и синтез деталей). Распределение количества установленного аддитивного оборудования по странам мира показано на рисунке 1. Американские аналитики прогнозируют, что в 2021 году объем мирового аддитивного производства составит около 10,8 млрд долларов.

Уникальные возможности аддитивного производства обеспечивают не только повышение коэффициента использования материалов и высокую точность размеров изготавливаемых изделий без их механической обработки, но и следующие основные преимущества:

- переход от массового производства к массовой кастомизации (возможность удовлетворения как можно большего числа индивидуальных заказчиков), увеличение номенклатуры изделий;
- возможность создания изделий со сложной формой или даже невозможной в обычном производстве конфигурацией (рис. 2);
- сокращение производственных издержек: себестоимости при малых партиях, затрат на электроэнергию, уменьшение размеров производственных площадей за счет исключения ряда технологических операций;

- существенное сокращение длительности производственного цикла, сроков и стоимости запуска изделия в производство благодаря отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке;
- резкое повышение гибкости производства, отсутствие необходимости переналадки оборудования под новое изделие;
- упрощение логистики и уменьшение объемов складских запасов;
- персонализация дизайна изделий.

Научно-технические проблемы развития аддитивных технологий в России неоднократно рассматривались научно-техническим советом Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, мероприятия по развертыванию аддитивного производства и развитию системы непрерывного образования в этой области закреплены решением Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России (протокол заседания президиума Совета от 16 сентября 2014 года №5).

Основными направлениями развития аддитивных технологий в России являются:

- создание исходных материалов и оборудования для их производства;
- разработка комплексных технологий аддитивного производства изделий;
- формирование сети центров коллективного пользования, в том числе для проведения испытаний, сертификации и стандартизации материалов и изделий аддитивного производства.

Работы по освоению аддитивных технологий активно развиваются организациями и предприятиями Минпромторга России, Минобрнауки России, Роскосмоса, Государственной корпорации «Ростех», Госкорпорации «Росатом», ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация», ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация», научными организациями ФАНО России.

ФГУП «ВИАМ» создан научно-производственный технологический комплекс с замкнутым циклом аддитивного производства деталей для авиационных двигателей, включающий изготовление расходуемой шихтовой заготовки, мелкодисперсных металлических порошков различных сплавов и разработку технологий селективного лазерного спекания деталей из этих порошков с последующей газостатической обработкой. Среди его основных заказчиков ОАО «Авиадвигатель» и ОАО «НПО «Сатурн».

ОАО «Национальный институт авиационных технологий» разработано несколько типов экспериментальных лазерных установок послойного синтеза, освоены технологии производства сложнопрофильных деталей из закупаемых в Германии металлических, полимерных и керамических порошков для авиационной техники как на установках собственной разработки, так и на оборудовании, приобретенном за рубежом. Кроме того, в этой организации созданы технологические комплексы аддитивного производства изделий из композитных материалов, песчаных форм и стержней, литейных моделей и оболочковых керамических форм. ОАО «НИАТ» поставляет свои изделия ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова», ОАО «Климов», ОАО «ЦКБ морской техники «Рубин», ОАО «МПП имени В.В. Чернышева», ОАО «Кузнецов», ОАО «Энергомаш».

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» осуществляет работы по внедрению технологий послойного синтеза сложнопрофильных и крупногабаритных деталей из металлических порошковых композиций, а также по выращиванию полимерных моделей для фасонного литья в оболочковые формы. Это предприятие работает в интересах ОАО «Калужский турбинный завод», ОАО «Климов», ОАО «Композит».

ОАО «Композит» в рамках выполнения заданий Роскосмоса проведены исследования по получению методами центробежного распыления порошков заданного фракционного состава из различных сплавов на основе никеля и титана.

Наряду с прикладными задачами, в развитии аддитивного производства заметное место должны занять следующие направления фундаментальных и поисковых научных исследований:

- разработка требований к материалам, используемым в послойном синтезе;
- создание установок с требуемыми параметрами (по типу и мощности лазеров, допустимым температурам и давлениям, размерам рабочей зоны);

- оптимизация технологических процессов изготовления деталей (спекания, термообработки, контроля);
- исследования основных физико-механических характеристик и конструкционной прочности деталей, изготовленных с использованием послойного синтеза;
- разработка методов проектирования деталей с учетом возможностей аддитивных технологий.

Фундаментальные и поисковые научные исследования в области развития технологий послойного синтеза выполняются ИФХЭ РАН, Институтом металлоорганической химии имени Г.А. Разуваева РАН, Самарским филиалом Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, Институтом теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН, а также Московским государственным технологическим университетом «СТАНКИН», Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом, Национальным исследовательским Томским государственным университетом, Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ», Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики и другими научными организациями.

Основными путями развития аддитивных производственных процессов являются:

- объединение компетенций научно-исследовательских и научно-производственных организаций с целью реализации единой научно-технической политики;
- формирование базы данных потребностей организаций различной отраслевой принадлежности в изделиях, функциональные характеристики которых достигаются использованием аддитивных технологий;
- формирование базы данных материалов, используемых в аддитивных производственных процессах;
- разработка принципов, методик и стандартов проектирования изделий, изготавливаемых с использованием аддитивных технологий;
- создание специализированного программного обеспечения для разработки изделий сложной геометрии, изготавливаемых аддитивными методами;
- организация системы сертификации и стандартизации изделий, технологий и материалов для аддитивного производства;
- разработка методик метрологического контроля и испытаний изделий, изготовленных послойным синтезом;
- организация обучения специалистов в области аддитивного производства на базе ведущих технических университетов.

Реализация указанных путей развития аддитивного производства связана с необходимостью разрешения ряда научно-технических и организационных проблем.

Во-первых, это недостаточное количество действующих производств отечественного оборудования. На сегодняшний день промышленное производство установок для послойного синтеза или 3D-принтеров освоено рядом фирм Германии, Швеции, США, Франции, Великобритании и Бельгии. Однако в силу известных ограничений лучшие образцы зарубежного оборудования не всегда доступны, а те, что предлагаются к приобретению, в ряде случаев отличаются недостаточной производительностью и не имеют требуемых характеристик. Так, шведская установка Arcam A2 является одним из лучших решений в классе аддитивных технологий для аэрокосмической продукции, однако предназначена только для изготовления изделий, имеющих размеры 200 × 200 × 350 мм.

Во-вторых, проблемы производства отечественных расходных материалов требуемого качества. В частности, это необходимость разработки технологий производства порошков требуемых размеров и состава, их последующей сертификации. Сегодня решение этой проблемы находится в начальной стадии. Технологии послойного синтеза требуют использования порошков, которые должны обладать комплексом свойств, включая их фракционный состав. Общим требованием к порошкам является сферичность частиц. Такие частицы более компактно укладываются в определенный объем и обеспечивают необходимую

Таблица 1

**КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ, ФОРМИРУЕМЫХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Физические принципы неразрушающего контроля	Профиль, толщины	Сплошность, пористость	Модули	Адгезия
Оптический	+	-/+	-	-
Тепловой	+/-	+/-	-	-/+
Рентгеновский	+	+	-	-
Ультразвуковой	+	+	+	+/-

«текучесть» порошковой композиции с минимальными сопротивлениями в системах подачи материала. Чем меньше характерный размер порошка, тем меньший шаг построения может быть задан, тем более рельефно могут быть проработаны мелкие элементы деталей и тем более гладкую поверхность построенной детали можно получить. В то же время, если порошок будет иметь слишком малый размер частиц, то в процессе синтеза легкие частицы будут «вылетать» из зоны контакта, что приведет к повышенной шероховатости детали, ее микропористости. Кроме того, необходимо учитывать и процессы комкования, приводящие к проблемам хранения порошков, в том числе при их транспортировке. С учетом указанных особенностей производители оборудования для послойного синтеза, как правило, поставляют сертифицированные порошки, специально разработанные для конкретного станка и соответствующего программного обеспечения. При этом использование других порошков не рекомендуется или даже запрещается.

В-третьих, необходима разработка отечественных программных кодов для обеспечения работы установок аддитивных технологий. При разработке технологии послойного синтеза создается цифровая 3D-модель с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР). В свою очередь использование САПР иностранного производства связано со всеми проблемами, обусловленными информационной безопасностью как непосредственно разработки, так и последующей передачи информации к месту производства деталей.

В-четвертых, чрезвычайно важно осуществлять контроль деталей, формируемых с использованием аддитивных технологий, на наличие дефектов. В силу особенностей физических процессов, происходящих при формировании таких изделий, в них могут возникать не только дефекты, обычно свойственные применяемым материалам, но и поля механических напряжений. Для этих целей может быть использована совокупность различных методов достоверного неразрушающего контроля, общая характеристика которых приведена в таблице 1.

В-пятых, необходимо создать систему национальных стандартов для аддитивного производства – по общей и специальной квалификации материалов, по конструкциям, технологиям, оборудованию, контролю качества.

Несмотря на наличие серьезных научно-технических и организационных проблем, развитие аддитивного производства в России является крайне важным безотносительно к тому, где они применяются: в оборонно-промышленном комплексе или в сфере гражданского производства, поскольку эти технологии легко адаптируются в зависимости от стоящих задач. Вместе с тем прогноз об аддитивном производстве свидетельствует о его исключительной значимости в военно-технической области. Так, по мнению аналитиков ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация», динамика развития аддитивного военного производства будет характеризоваться следующими показателями:

- сегодня скорость изготовления одного изделия (прототипы, тестовые модели, детали авиационно-космической техники) составляет несколько дней, объем их производства характеризуется десятками изделий;
- через 3–5 лет скорость изготовления одного изделия (детали военных самолетов, двигателей военной техники, сложных систем вооружения) будет составлять часы, объем их производства будет характеризоваться сотнями изделий;

- через 5–10 лет скорость изготовления одного изделия (компоненты боеприпасов, детали оружия массового производства) будет составлять минуты, объем их производства будет характеризоваться тысячами изделий.

Достижение указанных показателей, в частности, обусловлено тем, что в рамках развития аддитивного производства наряду с технологиями послойного синтеза усилиями ученых Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и специалистов ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация» разрабатывается технология гетерофазной порошковой лазерной металлургии. В таком технологическом процессе перенос порошка организуется таким образом, что отдельные порошинки подлетают к форми-

3

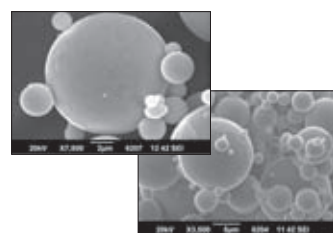
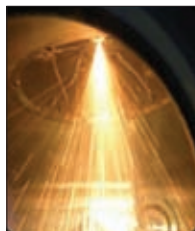


3. Процесс изготовления деталей по технологии гетерофазной порошковой лазерной металлургии
4. Производство сверхчистых сферических порошков, припоев и порошковых композиций

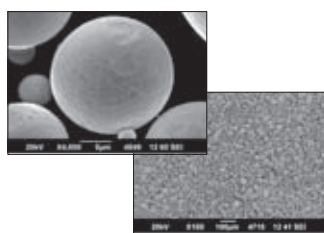
4



АТОМАЙЗЕР
HERMIGA 10/100



ПОРОШКОВЫЕ КОМПОЗИЦИИ НИКЕЛЕВЫХ
СПЛАВОВ И ПРИПоеВ НА ОСНОВЕ NI



ПОРОШКИ ПРИПоеВ
НА ОСНОВЕ TI

ОБЪЕМ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКОВ ПРИПоеВ
И ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ
ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ДО 10 Т/ГОД
ТЕКУЩАЯ ПОТРЕБНОСТЬ – 5 Т/ГОД

РАЗМЕР ЧАСТИЦ ПОРОШКА – 40–50 МКМ,
ВЫХОД ГОДНОЙ ОСНОВНОЙ ФРАКЦИИ – 85%



ПРИПОИ
ПОСТАВЛЯЮТСЯ В ВИДЕ
ПОЛУФАБРИКАТОВ:
САМОКЛЕЯЩИХСЯ
ДВУХСТОРОННИХ ЛЕНТ
И ПАСТ НА ОРГАНИЧЕСКОМ
СВЯЗУЮЩЕМ

ФГУП «ВИАМ»
СОЗДАНО ПРОИЗВОДСТВО
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ
ПОРОШКОВ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ
АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ ДИСПЕРСНОСТЬЮ
10–80 МКМ
(В МИРЕ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНО-
ЛОГИЙ ПРИМЕНЯЮТ
СПЛАВЫ
Al-Si И Al-Mg-Si)

ФГУП «ВИАМ» РАЗРАБОТАНЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОРГАНИЗОВАНО СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПОРОШКОВ, ПРИПоеВ И ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СПЛАВОВ (25 МАРОК) С ВЫПУСКОМ ПОЛНОГО КОМПЛЕКТА НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

руемой поверхности с твердым «холодным» ядром и расплавленной оболочкой вокруг него, то есть в двухфазном (гетерофазном) состоянии (рис. 3). Такая технология обеспечивает следующие преимущества:

- производительность примерно в 1 тыс. раз выше, чем при лазерном послойном спекании;
- минимальную пористость детали или ее отсутствие, вплоть до «гелиевой» герметичности;
- структуру материала и его прочностные характеристики на уровне ковального материала;
- возможность получения изделий с градиентными свойствами;
- использование до 8 материалов одновременно;
- возможность выращивания изделий без ограничений формы и размеров, например к 2017 году планируется создание технологического оборудования с размером рабочей зоны 2500 × 2500 × 1000 мм.

Проблемные вопросы развития аддитивного производства в России были обсуждены в феврале 2015 года на научно-практической конференции «Аддитивные технологии в российской промышленности», проведенной на базе ФГУП «ВИАМ». Оргкомитетом конференции, сформированным научно-техническим советом Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, было привлечено к участию в ее работе более 700 специалистов, представлявших организации оборонно-промышленного комплекса, научные учреждения ФАНО России и образовательные организации высшего образования. В пленарном заседании приняли участие руководители коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, федеральных органов исполнительной власти и субъектов Российской Федерации, руководители головных организаций



5. Оборудование для селективного лазерного сплавления металлических порошков. Установка УРАМ-550

6. Образец беспилотного летательного аппарата, планер которого изготовлен с использованием аддитивных технологий

оборонно-промышленного комплекса, Фонда перспективных исследований, Российского фонда фундаментальных исследований, Фонда «Сколково», ряда научных организаций.

Более 40 предприятий и организаций представили экспонаты и стенды на выставку, которая была приурочена к проведению конференции. Наиболее заметные результаты были представлены ФГУП «ВИАМ», ОАО «Региональный инжиниринговый центр» (Свердловская область) и Государственной корпорацией «Ростех».

ФГУП «ВИАМ» было продемонстрировано аддитивное производство полного цикла, включающее установки:

- производства заготовок под распыление;
- производства порошковых композиций (рис. 4);
- рассева и газодинамической сепарации порошков;
- разработки 3D-моделей деталей и моделирования генерации слоев;
- разработки технологий послойного синтеза;
- горячего изостатического прессования;
- термической обработки;
- контроля качества и свойств деталей.

Указанное оборудование позволило осуществить исследования и разработки экспериментальных аддитивных технологий для изготовления и ремонта сложнопольных деталей газотурбинных двигателей с использованием металлических порошков жаропрочного сплава на основе никеля. Указанные технологии внесены в конструкторскую документацию авиационного двигателя ПС-90А.

Региональным инжиниринговым центром Свердловской области, акционерами которого являются Правительство Свердловской области, Уральский федеральный университет, ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина» и АО «ОКБ «Новатор», продемонстрирован комплексный подход к организации и сопровождению аддитивного производства, включающий:

- освоение аддитивных технологий, оказание производственных и инжиниринговых услуг;

- разработку установок по изготовлению порошков на основе сплавов алюминия, легированной стали и бронзы, производство металлических порошков (реализуется совместно с ОАО «ТВЭЛ» и научными организациями Уральского отделения РАН);
- разработку и организацию производства установок послойного синтеза, в том числе установки УрАМ-550 (рис. 5) для селективного лазерного сплавления металлических порошков с размером рабочей камеры $500 \times 500 \times 500$ мм (реализуется совместно с ОАО «ТВЭЛ» и ООО «НТО «ИРЭ-Полюс»);
- участие в разработке методик и нормативных документов для формирования стандартов в области аддитивного производства, создание центра сертификации;
- организацию обучения специалистов предприятий, студентов вузов и технических колледжей (для студентов Уральского федерального университета открыта специальность «Лазерные технологии и оборудование»).

ОАО «КБ «Луч», входящим в состав Государственной корпорации «Ростех», представлен экспериментальный образец беспилотного летательного аппарата, планер которого изготовлен с использованием аддитивных технологий (рис. 6). Возможности аддитивного производства обеспечили значительную экономию финансовых средств и времени на создание финального образца авиационной техники, а также перспективы его изготовления (восстановления повреждений) непосредственно в районе боевых действий.

Ходом дискуссий, состоявшихся в ходе пленарного и секционных заседаний научно-практической конференции «Аддитивные технологии в российской промышленности», еще раз подтверждена актуальность межведомственной координации работ в области аддитивного производства.

В целях выполнения этой задачи представляется целесообразным разработать ряд документов программно-целевого планирования развития аддитивного производства, в том числе предусмотренных решением Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России, включая:

- межведомственную координационную программу мероприятий в области развития аддитивного производства, включающую всю гамму работ, выполняемых научными организациями и организациями промышленности по заказам государственных заказчиков, государственных корпораций, государственных фондов и интегрированных структур;
- подпрограмму развития аддитивных технологий государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»;
- предложения по организации на территории Российской Федерации производства новых материалов, используемых для изготовления изделий с помощью аддитивных технологий;
- предложения по развитию системы непрерывного образования в области аддитивных технологий и материаловедения.

Осуществление указанных предложений станет одним из значимых направлений реализации национальной технологической инициативы – задачи, поставленной в Послании Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации в 2014 году, обеспечивающей переход отечественной промышленности на следующий уровень развития в рамках шестого технологического уклада и лидерство России в прорывных наукоемких направлениях.