

Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом



С. Н. Григорьев,
д. т. н., ректор, профессор кафедры
высокоэффективных технологий обработки,
Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
(МГТУ «СТАНКИН»)
e-mail: rector@stankin.ru



И. Ю. Смуров,
к. ф.-м. н., начальник лаборатории
инновационных аддитивных технологий, до-
цент кафедры высокоэффективных
технологий обработки (МГТУ «СТАНКИН»),
профессор Национальной инженерной школы
Сент-Этьенна (ENISE), директор лаборатории
«Диагностика и инженерия промышленных
процессов»
e-mail: i.smurov@stankin.ru

В статье затрагивается тема инновационного аддитивного производства и перспектив его развития в России и за рубежом. Основное внимание авторы уделяют методу аддитивного производства, основанного на использовании лазерного излучения при спекании металлического порошкового материала (селективное лазерное плавление). Авторами выявлены основные перспективы пути развития данного метода и тенденции отрасли на сегодняшний день. В статье сделаны выводы о возможном развитии технологии с использованием многоматериальных порошковых основ и формирование изделий многолучевой обработкой.

Ключевые слова: перспективы развития, современное аддитивное производство, селективное лазерное плавление, машиностроительные технологии.

Введение

Современная промышленность имеет целью получение прибыли с непосредственным воздействием на эволюцию современных промышленных технологий. Увеличение возможностей промышленной продукции являлось темой многих инженерных исследований. Так, например, тенденцией в разработке авиационных двигателей является увеличение мощности двигателя, что предполагает значительное повышение температуры рабочих узлов и, соответственно, развитие технологии машиностроения для производства деталей сложной геометрии с охлаждающими каналами.

В начале 1980-х гг. начали развиваться новые методы производства деталей, основанные не на удалении материала (как традиционные технологии резания, штамповки,ковки и т. д.), а на послойном выращивании изделия по модели САПР, в том числе, так называемые методы аддитивного производства (Additive Manufacturing, АП). За два десятилетия технология перешагнула изготовление неметаллических изделий и вплотную подошла к непосредственному получению функциональных изделий из металлических порошков

[1, 2]. К настоящему времени технология позволяет получать металлические или неметаллические прототипы или функциональные изделия, которые не требуют механической постобработки, как, например, аддитивное производство методом послойного лазерного сплавления порошка [3–5] (рис. 1).

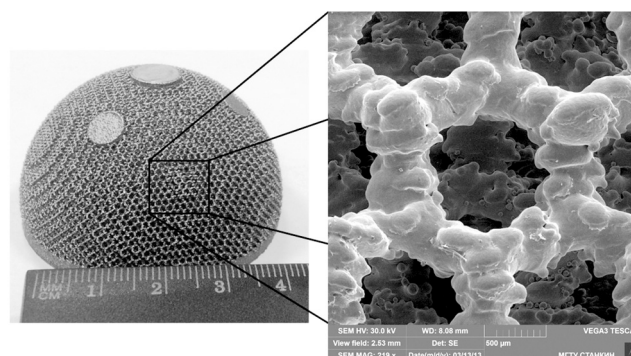


Рис. 1. Готовое функциональное изделие с внутренней сетчатой структурой, изготовленное методом прямого аддитивного производства: изделие типа имплантат ТЗС человека из сплава ВТ6, полученное селективным электронно-лучевым плавлением на Arcat A2 (СЭМ-изображение)

Таким образом, технология АП совершила значительный рывок за последние 30 лет, опираясь на быстрое совершенствование электронной вычислительной техники и программного обеспечения. Современный рынок АП составляет порядка \$1300 млн, включая производство АП- машин и оказание услуг, в соотношении, ориентировочно, 50/50. Доля России среди стран активно развивающих и применяющих технологии АП составляет примерно 1,2% (к сравнению добавим США (39,1%), Японию(12,2%), Германию (8,0%) и Китай(7,7%)) и показывает устойчивый рост [1]. Авторы наблюдают также заинтересованность российской промышленности (в частности, авиастроение и автомобилестроение) в новых технологиях и оборудовании современных методов производства.

Среди применений технологии АП, наиболее востребованным представляется производство функциональных изделий [6]. В случае наиболее заинтересованных отраслей промышленности, таких как авиакосмическая, автомобилестроение, ВПК, биомедицинские приложения, требуются металлические изделия высокой точности. На рис. 2 представлена гамма технологий АП, разделенных по агрегатному состоянию исходного материала.

Технология селективного лазерного плавления (СЛП, SLM) является технологией послойного АП с помощью лазера из металлических порошков, которая удовлетворяет интересам промышленности в части возможностей и точности (рис. 3). На сегодня метод СЛП является наиболее быстро развивающейся технологией среди методов АМ [7, 8]. Это обусловлено, в первую очередь, качеством (например, шероховатостью или минимальной толщиной стенки) получаемых изделий, которые при оптимизации технологических параметров могут применяться без постобработки, что обеспечивается малым радиусом лазерного пятна на поверхности порошкового ложа (до 20 мкм).

Современное состояние

На современном этапе развития аддитивных технологий, производители оборудования предлагают готовое промышленное решение, т. е. оборудование АП, технологию АП для конкретных материалов с гарантией качества полученных изделий. Это стало возможным благодаря многим исследованиям, проведенным в прошедшее десятилетие.

Процесс АП определяется большим количеством факторов, таких как мощность источника энергии, скорость и стратегия обработки, физико-химическими свойствами исходного материала и т. д. Параметрическое исследование позволяет определить оптимальные технологические параметры для изготовления изделия (рис. 4). Следует отметить взаимосвязь факторов, влияющих на процесс, нелинейность процессов, происходящих при лазерном воздействии, а также особенности взаимодействия лазерного излучения с материалами (например, плавление, испарение, образование низкотемпературной плазмы).

Современные исследования проводятся со всеми видами сталей, никелевыми и кобальтовыми порошками, бронзами, а также со смесями сплавов и керамики. Таким образом, АП нарабатывает «кредит» возможностей. Отметим также, что значительная часть исследований проводится над улучшением или совершенствованием методик технологии и методами онлайн контроля и оптической диагностики процессов.

Производство готовых функциональных изделий методами АП еще не стало «технологией одной кнопки», несмотря на быстрое развитие программного обеспечения машин АП: относительная простота изготовления дополняется необходимостью создания трехмерной модели изделия, исправления ошибок построения при обработке модели в САПР и добавления вспомогательных элементов. Кроме

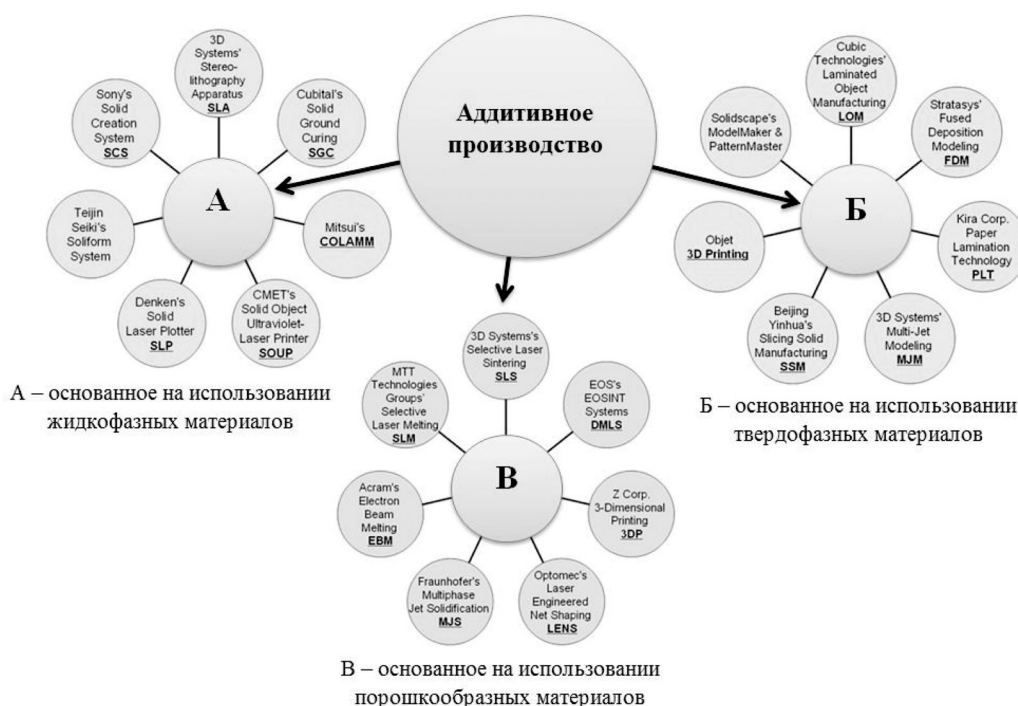


Рис. 2. Классификация технологий аддитивного производства

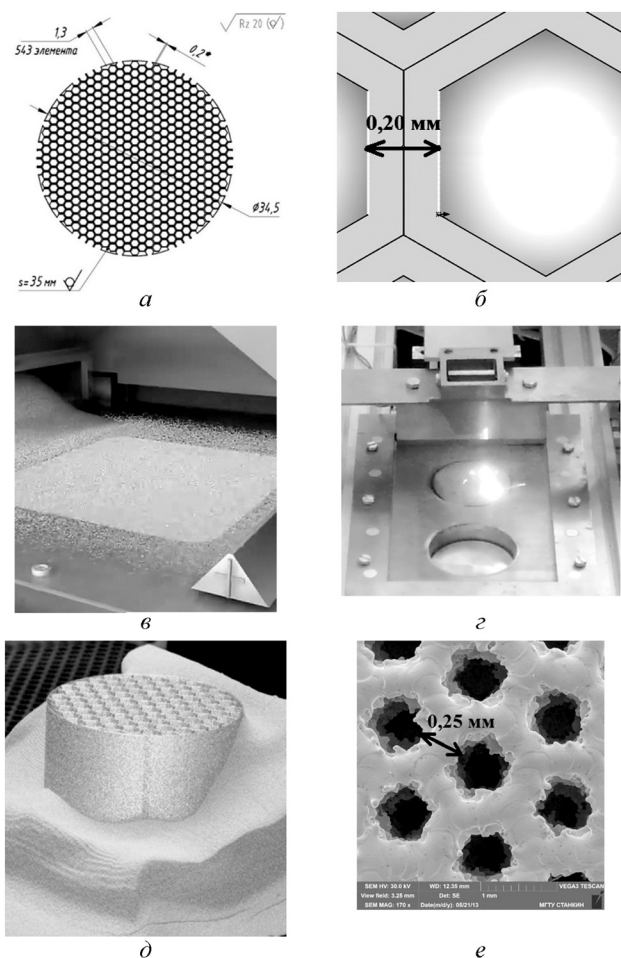


Рис. 3. Этапы технологической подготовки производства и изготовления функциональных изделий методом селективного лазерного плавления (разновидность АП) из порошкового материала: а — эскиз изделия; б — подготовка трехмерной компьютерной модели и расщепление модели на слои; в — послойное изготовление изделия — расстилка порошка на подложке камеры в защитной атмосфере; г — спекание лазером гранул в каждом слое изделия; д — удаление конечного изделия с подложки после изготовления; е — готовое изделие (СЭМ-изображение)

того, программа создания изделия должна содержать данные технологических параметров. Добавим сюда дополнительные операции, такие как необходимость предподогрева рабочей камеры и постобработки (удаление подложки, пескоструйная обработка, продувка сжатым воздухом). Эти операции остаются довольно трудоемкими.

Технологии АП на современном этапе развития позволяют получать функциональные детали для аэрокосмической отрасли, автомобилестроения, биомедицины и химической промышленности (рис. 5).

Для того чтобы стандартизовать методы, используемые в технологии АП, на данный момент образовано несколько организаций: Консорциум аддитивного производства (США), Комитет ASTM F42 (США). В 2009 г. в США было организован конгресс из более чем 60 научных сотрудников, представителей промышленности и правительства для создания Дорожной карты научных исследований в технологии АП на ближайшие

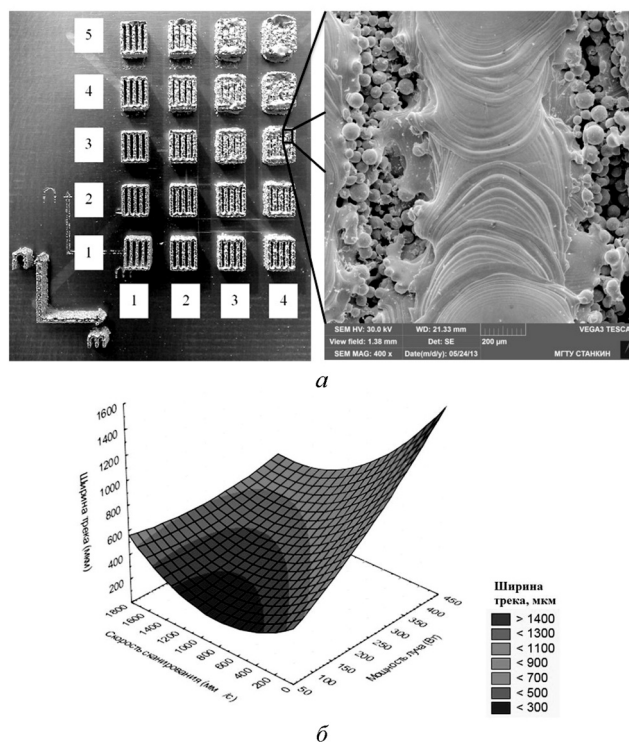


Рис. 4. Параметрические исследования влияния основных технологических параметров селективного лазерного плавления на геометрические характеристики единичного трека: а — изготовление экспериментальных образцов и СЭМ-изображение единичного трека, характеризующееся неравномерностью распределения теплового нагрева в зоне обработки, наличие непереплавленных гранул порошкового материала, неоднородностей, застывший поток материала в зоне плавления; б — линейная аппроксимирующая зависимость между основными технологическими параметрами СЛП и шириной единичного трека

10–12 лет. Основная идея таких объединений — увеличить приток инвестиций в активно развивающуюся молодую технологию [9].

Несмотря на экономическую нестабильность, технологии АП активно развиваются по всему миру. Ведущие мировые экономики вкладывают значительные средства в развитие АП. Так только в 2012–2013 гг. Департамент обороны, энергетики и торговли США совместно с Национальным научным фондом США и промышленными партнерами вложили \$30 млн в развитие Национального института инноваций аддитивного производства, состоящий более чем из 70 организаций, связанных с разработкой технологии АП; правительство Сингапура анонсировало вложение \$403 млн на развитие АП в течение 5 лет; правительство Китая вкладывает \$240 млн в исследования, разработки и коммерциализацию технологии АП [9].

Проблемы технологии

Технологии АП представляют огромное поле для научно-исследовательской деятельности. Во многом этому способствуют нерешенные проблемы технологии, самая главная из которых — низкая производительность и связанные с этим расходы для

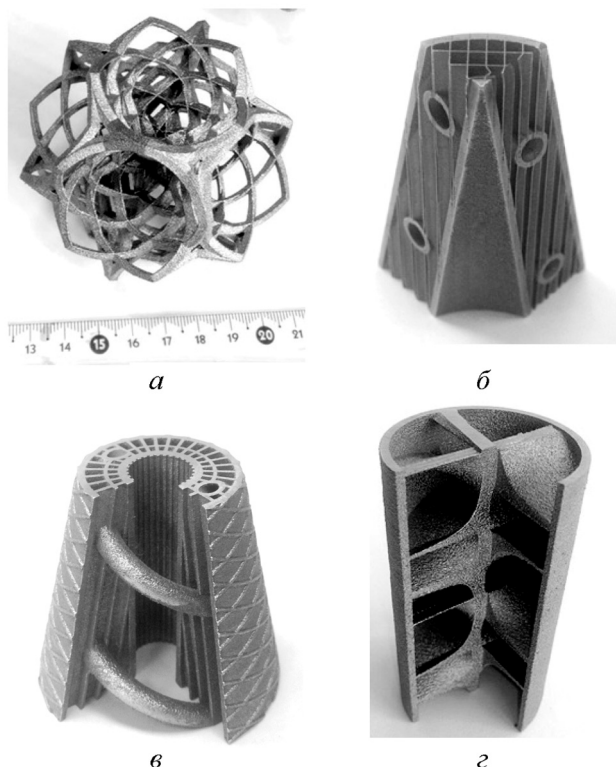


Рис. 5. Изделия аддитивного производства со сложной внутренней структурой, демонстрирующие возможности АП: а — изделие с пространственной сетчатой структурой выполненное из сплава Ti6Al4V; б, в — изделие с внутренними каналами и сетчатой структурой; г — изделие со спиральными внутренними каналами из мартенситно-стареющей стали EOS maraging steel MS1

промышленности. Так, например, кубик 5×5×5 мм для параметрического исследования изготавливается методом СЛП порядка часа, а средняя производительность составляет от 0,2 до 20 см³/ч и зависит обратно пропорционально качеству. Проблема производительности решается усовершенствованием оборудования (источников энергии, оптической системы, систем подачи и/или расстилки исходного материала) или совершенствованием технологии (в том числе увеличения поглощенной исходным материалом энергии и оптимизации геометрических размеров единичных валиков и слоев). В настоящее время производители оборудования и ученые не достигли ощутимых результатов в этом вопросе (табл. 1).

Выброс порошка во время процесса имеет последствиями потерю лазерной мощности, потерю порошка,

уменьшение производительности и общего КПД процесса, а также снижение качества изделия. Согласно последним представлениям, большие градиенты температур между переплавленными и непереплавленными порошками могут быть причиной этой проблемы. Снижение температурных градиентов обеспечивается предподогревом порошка в ложе, однако, проблема не решена до конца.

Перспективные пути развития

На рис. 6 показаны основные перспективные направления развития технологий АП (на примере технологий, основанных на использовании лазерного излучения) в современном машиностроении (развиваемые в МГТУ «СТАНКИН» в рамках ПП № 220 от 09 апреля 2010 г.). Все эти направления сейчас активно развиваются по всему миру.

Технология АП требует также стандартизации, чем, например, сейчас занимается Комитет ASTM F42 (США). Возможно, что стандартизации должны подвергнуться машины АП, программное обеспечение АП, параметры качества изделий и техника безопасности по работе с ними. На данный момент Комитет ASTM F42 разработал пять основных стандартов АП, включая стандартизацию терминологии и спецификации к файлам моделей САПР и материалам, еще более 20 стандартов в настоящий момент разрабатываются [10, 11].

Основные разработки в области оборудования АП ведутся для снижения стоимости машин АМ. Конструкция многих машин АМ может быть оптимизирована по параметру уменьшения стоимости и тем самым большего распространения технологий АП. Одно из возможных решений — стандартизация элементов оборудования и применение модульной системы. В этом случае, стоимость элементов может уменьшиться за счет большего выпуска однотипной продукции. Уменьшения стоимости можно также добиться, если общее количество поставщиков оборудования АП увеличится.

Другой важный аспект — возможность контроля технологического процесса изготовления в режиме онлайн. Развитие технологий и оборудования АП будет идти к разработке адаптивных систем контроля, которые смогут контролировать качество получаемых валиков прямо в процессе изготовления. Это позволит, в перспективе, быстрее проводить оптимизацию геометрических, механических и металлургических свойств валиков и, соответственно, изделий. Развитие

Таблица 1

Основные способы увеличения производительности АП на примере технологической операции селективного лазерного плавления (без снижения качества параметров изделия)

Стадии переноса энергии при СЛП	Возможный способ увеличения производительности	Расчетные данные, %	Экспериментальные данные
Лазерная система	Увеличение производительности лазерной системы	0,3–1	Нет значимого результата
Оптическая система	Улучшение оптической части системы	1–2	Около 0,5%
Абсорбция излучения/ энергии	Улучшение структуры и поверхности порошкового материала	0,4–1	Нет значимого результата
Тепло- и массоперенос в ванне расплава	Улучшение распределения энергии	Около 0,5–2,0	Нет данных



Рис. 6. Перспективные направления развития технологий АП

компьютерных систем может обеспечить дружелюбный интерфейс пользователю и дополнительную функциональность [12, 13].

Развитие оптических систем позволит увеличить размер пятна источника энергии на поверхности порошкового ложа, что в перспективе может развить новый класс методов производства металлических изделий, например, методом СЛП, с помощью масок или с помощью изменяемого поперечного сечения пучка.

Совершенствование оборудования может быть проведено также за счет интеграции нескольких методов АП или других (например, механических) нескольких источников энергии в одну производственную машину. Это позволит создать многофункциональные производственные комплексы и увеличить общую эффективность метода в конкретном приложении (например, при производстве имплантатов).

Перспективы развития технологии АП в основном касаются изучения и исследования методов нанесения валиков и слоев. Так, например, развитие технологических стратегий обработки порошкового материала в ложе при технологии СЛП позволяет получать более равномерные, что увеличивает геометрическую точность изделия [14–16].

Современные источники энергии могут быть весьма мощными. Так, например, электронный луч может обеспечивать мощность 3,5 кВт, а обычные лазерные СЛП-системы только — 2–4 кВт (табл. 2). Для увеличения производительности АП можно применять разделение луча, которые могут работать синхронно, изготавливая несколько изделий одновременно, или совместно, обрабатывая один слой одного изделия (рис. 7). Такой метод позволит также улучшить качество поверхности конечного изделия, если один из лучей будет ее обрабатывать.

Важным аспектом развития технологии является получение металлических многоматериальных изделий (изделие, состоящее из нескольких материалов), производство промышленного оборудования для этих целей и промышленная апробация нового метода [17, 18]. Разработка технологии многоматериального АП потребует разработки более совершенного оборудования АП и программного обеспечения. Развитие многоматериальных технологий АП даст значительное преимущество развитию производства функциональных металлических изделий методами АП (в частности методом СЛП). Разработки такого оборудования сейчас ведутся в МГТУ «СТАНКИН» в рамках ПП № 220 (рис. 8).

Таблица 2

Основные технологические параметры процессов селективного лазерного и электронно-лучевого плавлений на примере конкретного передового оборудования

Технологические параметры процесса	Селективное лазерное плавление (на примере EOS M280)	Селективное электронно-лучевое плавление (на примере ARCAM A2)
Мощность излучения	До 500 Вт	До 3500 Вт
Скорость перемещения луча по подложке	До 10 м/сек	До 8000 м/сек
Диаметр пятна луча на подложке	Мин. 20 мкм	100–1000 мкм (в зависимости от мощности)
Защитная атмосфера	Нейтральный газ (азот или аргон)	Вакуум до 10 ⁻⁵ Па
Материалы	Как проводящие, так и не проводящие; как магнитные, так и не магнитные	Только проводящие, не магнитные
Основное технологическое преимущество	Большая геометрическая точность изделий при меньшей производительности	Большая производительность при меньшей геометрической точности

Примечание: выделены преимущественные технологические параметры процессов при сравнении.



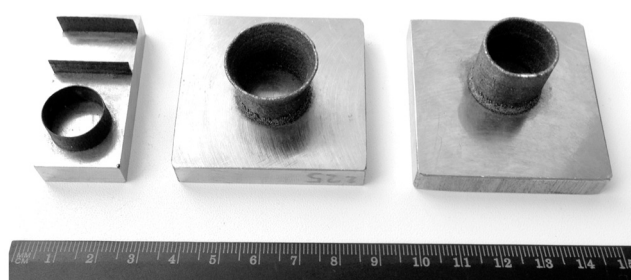
Рис. 7. Изображение, демонстрирующее многолучевую обработку при селективном электронно-лучевом плавлении образца из сплава ВТ6 (прогрев подложки до 750°C): наблюдается прогрев подложки и следы от высокоскоростного движения электронного луча (параметры съемки BCK Photron SA5: разрешение 1024×512 пикселей; частота кадров — 500 кадров в секунду; время выдержки — 1999,75 микросекунд)

Важным направлением разработок также является создание новых материалов специально для технологий АП. Такие материалы должны будут удовлетворять условиям технологии и функционального изделия. Как и сейчас, усилия будут направлены на проведение параметрических исследований, чтобы связать технологические параметры АП и качество полученного изделия: шероховатость, термомеханические, трибологические и электрические свойства. Таким образом, может быть проведен отбор материалов по параметру возможности обработки методами АП.

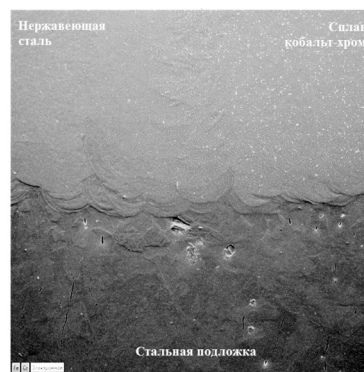
Трудоемкость процессов можно значительно уменьшить, применяя автоматизированные компьютеризированные системы. Развитие программного обеспечения для АП ведется по двум основным направлениям: разработка программного обеспечения машин АП и математическое моделирование процесса АП (физических процессов поглощения). Программное обеспечение машин АП упрощается для конечного пользователя, автоматизирует большую часть работы по компьютерной модели и является интерфейсом сопряжения для систем оптической диагностики. Развитие направлено не только на полную автоматизацию, но и на упрощение создания и обработки модели САПР.

Программного обеспечения моделирования физических процессов ведется по мере расширения знаний и представлений о процессах, происходящих во время изготовления. На сегодня, необходимы математические модели, которые позволили бы предсказывать параметры изготавливаемого изделия. Анализ методом конечных элементов должен заменить другие подходы, как наиболее точный. Интеграция математического моделирования в программное обеспечение машин АП улучшит контроль процесса АП и снизит стоимость работ.

Программное обеспечение экономического обоснования может быть выстроено в виде сравнения методов АП и методов традиционного производства



а



б

Рис. 8. Результаты исследований направленных на разработку экспериментальной многоматериальной СЛП-системы: а — образцы многоматериальных изделий с толщиной стенки в два трека; б — СЭМ-изображение многоматериального образца изделий с границей раздела двух материалов — нержавеющей стали и сплава Co—Cr выращенные с проплавлением подложки из Стали 20

(точение, фрезерование, электроэрозионная обработка и т. д.). Расчеты показывают, что технология АП выгоднее традиционного метода до некоторого значения объемов производства. Однако такие расчеты выполнены для небольшого количества традиционных методик и не учитывают возможность изготовления методом АП нескольких изделий на одной подложке в одном технологическом цикле.

Важным направлением будущего технологий АП является расширение области их применений. Введение новых технологий в промышленность ведет к изменению технологии производства деталей, что имеет сильную инерцию. Решение производственных проблем связанных с АП является довольно трудоемким процессом. В этом направлении сегодня работают ведущие промышленные предприятия (автомобильная промышленность, инструментальное производство, авиа- и ракетостроение, медицинская отрасль, ремонтное производство).

Заключение

Сегодня существует много барьеров для развития инновационных многоматериальной и многолучевой моделей аддитивного производства на основе использования лазерного излучения. В первую очередь, это связано с общей инерцией в современной промышленности при внедрении усовершенствованных технологий. Для ускорения развития и более широкого внедрения инновационных технологий аддитивного производства в России требуется особый подход со стороны руководящего эшелона машиностроитель-

ных предприятий авто- и авиа ракетной индустрий и зачастую изыскания дополнительных источников финансирования, что не всегда возможно в условиях развития современной отечественной машиностроительной области.

* * *

Настоящая работа выполнялась в рамках Постановления Правительства № 220 по государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах.

Список использованных источников

1. С. Н. Григорьев. Проблемы и перспективы развития отечественного машиностроительного производства//Справочник. Инженерный журнал с приложением, № 12, 2011.
2. J.-P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, Annals of the CIRP. Vol. 47/2/1998.
3. И. Ю. Смуров, И. А. Мовчан, И. А. Ядройцев, А. А. Окунькова, Е. В. Цветкова, Н. Ю. Черкасова. Аддитивное производство с помощью лазера//Вестник МГТУ «СТАНКИН» № 4, 2011.
4. И. Ю. Смуров, И. А. Мовчан, И. А. Ядройцев, А. А. Окунькова, С. Г. Конов, Г. В. Антоненкова. Экспериментальное аддитивное прямое производство с помощью лазера//Вестник МГТУ «СТАНКИН», № 2, 2012.
5. И. Ю. Смуров, И. А. Ядройцев, И. А. Мовчан, А. А. Окунькова, Н. Ю. Черкасова, Г. В. Антоненкова. Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ//Вестник МГТУ «СТАНКИН», № 1, 2012.
6. А. П. Назаров, А. А. Окунькова. Технология селективного лазерного спекания//Вестник машиностроения, № 11, 2012.
7. М. А. Волосова, А. А. Окунькова. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом//Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14, № 4, 2012.
8. M. Doubenskaia, M. Pavlov, S. Grigoriev, I. Smurov. Definition of Brightness Temperature and Restoration of True Temperature in Laser Cladding Using Infrared Camera//Surface and Coatings Technology, V. 220, 2013.
9. I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov. Parametric analysis of the selective laser melting process, Applied Surface Science, 253, 2007.
10. I. Yadroitsev, I. Smurov. Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape, Physics Procedia, 5, 2010.
11. I. Yadroitsev, L. Thivillon, Ph. Bertrand, I. Smurov. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder, Applied Surface Science, 254, 2007.
12. G. M. Martinov, A. B. Ljubimov, A. S. Grigoriev, L. I. Martinova. Multifunction numerical control solution for hybrid mechanic and laser machine tool//Procedia CIRP: Fifth Cirp Conference on High Performance Cutting 2012. T. 1, 2012.
13. S. N. Grigoriev, A. A. Kutin, V. V. Pirogov. Advanced method of NC programming for 5-axis machining//Procedia CIRP: Fifth Cirp Conference on High Performance Cutting 2012. T. 1, 2012.
14. M. Doubenskaia, M. Pavlov, S. Grigoriev, E. Tikhonova, I. Smurov. Comprehensive Optical Monitoring of Selective Laser Melting//Journal of Laser Micro Nanoengineering, T. 7, № 3, 2012.
15. I. Smurov, M. Doubenskaia, S. Grigoriev, A. Nazarov. Optical Monitoring in Laser Cladding of Ti6Al4V//Journal of Thermal Spray Technology, T. 21, № 6, 2012.
16. М. Д. Павлов, С. Г. Конов, А. А. Окунькова, А. П. Назаров. Особенности использования средств оптического контроля при изготовлении изделий методом селективного лазерного плавления//Контроль. Диагностика, № 12, 2012.
17. I. Yadroitsev, L. Thivillon, Ph. Bertrand, I. Smurov. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder, Applied Surface Science, 254, 2007.
18. I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava, I. Smurov. Single track formation in selective laser melting of metal powders//Journal of Materials Processing Technology 210, 2010.

Prospects for the development of innovative additive manufacturing in Russia and abroad

S. N. Grigoriev, Doctor of Technical Sciences, professor, rector, professor of advanced processing technology department, MSTU «STANKIN».

I. Yu. Smurov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, head of the laboratory of innovation additive technology, docent of advanced processing technology department, professor of National Engineering School of Saint-Etienne (ENISE), head of the laboratory «Diagnostic et Ingénierie de Procédés Industriels».

The article touches upon the innovative additive manufacturing and the prospects for its development in Russia and abroad. The main attention is paid to the method of additive manufacture based on the use of laser sintering metallic powder material (selective laser melting). The authors identified the main perspectives of the development of methods and trends in the industry today. The article suggests the possibility of the development of technology using multi-material powder foundation and formation of multi-beam processing.

Keywords: development prospects, advanced additive manufacturing, selective laser melting, mechanical engineering.