

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

В.С. Антонова, И.И. Осовская

НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Санкт-Петербург
2019**

УДК 678:681.3(075)
ББК 35.71я7
А 724

Антонова В.С., Осовская И.И. Новейшие достижения аддитивных технологий: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. – 59 с.

В пособии рассмотрены методы современных аддитивных технологий, материалы для 3D-печати, основные разработки аддитивных технологий в российской промышленности и Федеральная целевая программа «Исследования и разработки 2014 - 2020» по развитию отечественных аддитивных технологий. Представлены тезисы докладов круглого стола «Индустрия 4.0. Аддитивные технологии» XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии.

Предназначено для студентов всех форм обучения, проходящих подготовку по направлениям 18.03.01 и 18.04.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.04 «Управление в технических системах», 54.03.01 «Дизайн».

Рецензенты:

Ю.Г. Тришин, д-р хим. наук, зав. кафедрой органической химии ВШТЭ СПбГУПТД;

А.Н. Евдокимов, канд. хим. наук, зав. кафедрой материаловедения и технологии машиностроения ВШТЭ СПбГУПТД

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

© Высшая школа технологии и
энергетики СПбГУПТД, 2019

© Антонова В.С., Осовская И.И., 2019

Оглавление

Введение.....	4
История развития аддитивных технологий.....	5
Классификация аддитивных технологий.....	9
Методы аддитивных технологий.....	11
Материалы для 3D-печати.....	19
Характеристика рынка аддитивных технологий.....	29
Основные разработки аддитивных технологий в российской промышленности.....	34
Федеральная целевая программа «Исследования и разработки 2014 - 2020" по развитию отечественных аддитивных технологий.....	37
Задания для самостоятельной работы студентов.....	42
Заключение	43
Библиографический список.....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ	48

Введение

В недалеком прошлом аддитивные технологии использовались преимущественно в традиционно технологически продвинутых отраслях – автомобильной, авиационной и аэрокосмической промышленности, а также в приборостроении и медицине, где тандем "время – деньги" всегда имел особое значение.

Еще несколько лет назад российские специалисты сетовали на крайне неблагоприятную ситуацию, складывающуюся с внедрением аддитивных технологий (АФ-технологий) в российскую промышленность. Рынок аддитивных технологий, конечно, развивался, но происходило это очень медленно: Россия практически не участвовала в международных организациях, оказывающих значительное влияние на развитие АФ-технологий в мире, у нас не было ни дорогостоящего высокотехнологичного оборудования, способного обеспечить высокое качество изделий, ни материалов для 3D-машин, ни квалифицированного, специально обученного персонала. То есть в целом отсутствовала 3D-среда для аддитивного производства.

Очевидно, эта проблема могла быть решена только при условии целенаправленного взаимодействия высшей школы, академической и отраслевой науки. Наконец в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки 2014 - 2020" стартовали сразу три проекта по развитию отечественных аддитивных технологий: "Разработка нового поколения жаропрочных материалов" (Национальный исследовательский технологический университет "МИС и С"), "Разработка технологий для изготовления и ремонта сложнопрофильных деталей газотурбинных двигателей" (ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов" — ВИАМ), "Разработка производства легких и надежных композитных конструкций для высокотехнологичных отраслей промышленности" (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет — СПбПУ).

История развития аддитивных технологий

Аддитивные технологии (AF — Additive Fabrication), или технологии послойного синтеза, — одно из наиболее динамично развивающихся направлений "цифрового" производства. AF — Additive Fabrication (или AM-Additive Manufacturing), принятая в англоязычной технической лексике аббревиатура словосочетания, означающего изготовление изделия путем "добавления" (additive) материала, в отличие от традиционных технологий механообработки, в основе которых лежит принцип "вычитания" ("лишнего") материала из заготовки. Суть AF-технологий состоит в послойном построении (синтезе) изделий – моделей, форм, мастер-моделей и так далее путем фиксации слоев модельного материала и их последовательного соединения между собой различными способами: спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией - в зависимости от нюансов конкретной технологии. Иначе говоря, аддитивные технологии предполагают формирование детали путем последовательного "наращивания" материала слой за слоем. Они позволяют на порядок ускорить научно-исследовательские разработки и изготовление опытных образцов, а в некоторых случаях — и производить готовую продукцию, когда нужна высокая точность деталей и важно уменьшить вес изделия. Кроме очевидных преимуществ в скорости и, зачастую, в стоимости изготовления изделий, эти технологии имеют важное достоинство с точки зрения охраны окружающей среды и, в частности, эмиссии парниковых газов и «теплового» загрязнения. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических затрат на создание самых разнообразных видов продукции.

Современные аддитивные технологии сформировались, в первую очередь, в результате попыток обойти ограничения традиционных методов формообразования в плане сложности создаваемых объемных изделий, т.е. изначально аддитивные технологии были нацелены на создание прототипов. Во многом такая направленность сохраняется и поныне. Современный вид

аддитивные технологии приобрели к 1980-м годам с появлением новых способов изготовления объемных изделий.

Предшественниками современных АФ-технологий считают две оригинальные технологии, появившиеся в XIX в. В 1890 г. Дж. Е. Блантер предложил способ изготовления топографических макетов – трёхмерных карт поверхности местности [1]. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались одна на другую в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой. Практическое применение эта идея нашла в LOM-технологии – послойное ламинирование (Lamination Object Manufacturing) или склеивание тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051-0,25 мм. В 1979 г. профессор Накагава из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов.

Вторая технология – фотоскульптура (Photosculpture) была предложена французом Ф. Виллемом в 1890 г. [2, 3]. Суть её состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры (Виллем использовал 24 камеры с шагом 15 градусов) и производили одномоментное фотографирование на все камеры. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину, в соответствии с профилем текущего контура.

Для уменьшения трудоемкости данного процесса немец К. Бэйз в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при

обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – экспозиции [4].

В 1935 г. И. Мариокой предложен способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру [5]. Способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набор контуров. Контурные линии затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким способом формировался трёхмерный образ объекта. Или же, как и у Ф. Виллема, контурные линии могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трёхмерного образа с помощью режущего инструмента.

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея О. Дж. Мюнца (1956 г.), который предложил способ селективной (последовательной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии [6]. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве платформы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установленный в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень перемещали на определенную величину (т.е. с определенным шагом) и сверху наносили слой эмульсии, проецируя на него изображение, после чего наносили слой фиксирующего реагента. И так каждый фрагмент построения детали: поршень перемещали вниз, наносили фотоэмульсию, засвечивали, наносили слой фиксирующего реагента и т. д. Фиксирующий состав наносился на весь слой – и на засвеченные участки, и на незасвеченные, в результате: внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, оказывался заключенным образ трёхмерного объекта.

В 1968 г. У. К. Суэйнсон предложил способ получения трёхмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей [7]. Примерно в это же время начинает появляться технология последовательного синтеза спеканием порошковых материалов (П. А. Л. Сиро, 1971) [8, 9].

В 1981 г. Р. Ф. Хасухолдер предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала нанесением его на плоскую платформу [10]. Далее производилось разравнивание до определенной величины по высоте с последующим спеканием слоя. Полученный патент послужил прообразом для будущих технологий селективного лазерного спекания (SLS) и послойной экструзии (FDM). В том же году Х. Кодама опубликовал результаты работы с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера [11]. В 1982 г. была опубликована работа Э. Дж. Херберт по созданию трёхмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал [12].

В 1985 г. И. Марутани получил патент на способ оптического формообразования [13], который по своей сути аналогичен стереолитографии.

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х годов прошлого века. Родоначальником отрасли стал Ч. Халл [14], основатель фирмы 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза. В 1986 г. Ч. Халл предложил способ послойного синтеза посредством ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонком слое фотополимерной смолы. Он же и ввел в оборот термин «стереолитография». В этом же году инженер собрал первый в мире стереолитографический 3D-принтер – SLA (Stereolithography Apparatus), благодаря чему цифровые технологии сделали огромный рывок вперед. Приблизительно в то же время Скотт Крамп, позже основавший компанию Stratasys, выпустил первый в мире FDM-аппарат. С тех пор рынок трехмерной печати стал стремительно расти и пополняться новыми моделями уникального печатного оборудования.

В 1987 г. был запатентован метод печати баллистическими частицами (Ballistic Particle Manufacturing), заключающийся в распылении термопластичных полимеров. В 1988 г. были получены патенты на LOM-технологии и технологию объемной наплавки. В 1989 г. К. Декард получил патент на способ селективного лазерного спекания.

В 1990-е гг. было разработано еще несколько десятков различных способов технологии аддитивного формообразования. Значительная часть способов не получила коммерческого распространения в связи с выявившимися принципиальными недостатками и чрезмерной дороговизны. В 1995 г. назрел перелом, сделавший аддитивные методы изготовления продукции общедоступными. Студенты Массачусетского технологического института, Джим Бредт и Тим Андерсон, внедрили технологию послойного синтеза материала в корпус обычного настольного принтера. Именно так была основана компания Z Corporation, долгое время считавшаяся лидером в сфере бытовой печати объемных фигур. Разработка новых технологий аддитивного формообразования и совершенствование существующих активно ведутся и в настоящее время.

Классификация аддитивных технологий

В международном сообществе так же, как и в России, устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято. Различные авторы подразделяют их по следующим методам:

1. По методу формирования слоя:

- 1.1. Bed Deposition;

При использовании данной технологии сначала формируют слой, например, насыпают на поверхность рабочей платформы дозу порошкового материала и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», формируя ровный слой материала определенной толщины. Затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом, скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной трёхмерной компьютерной модели.

Эта технология, называемая в англоязычной традиции «Bed Deposition», предполагает наличие некой поверхности («bed»), на которой сначала формируют слой, а затем в этом слое выборочно отверждают

(фиксируют) строительный материал. В процессе отверждения положение плоскости построения неизменно, при этом часть строительного материала (в данном случае – порошка) остается в созданном слое нетронутой. Указанной технологии достаточно точно соответствует термин «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание» (SLS – Selective Laser Sintering), если «отверждающим» инструментом является лазер, который здесь, в отличие от лазерной стереолитографии (SLA-технологии), применяется в качестве источника тепла, а не ультрафиолетового излучения. После завершения построения платформа-«bed» перемещается в вертикальном направлении на величину шага построения, на ней формируют новый слой – и процесс повторяется до полного построения модели.

1.2. Direct Deposition.

Термин на русский можно перевести как «прямое или непосредственное осаждение материала», т. е. направление энергии и осаждение материала в конкретную точку построения.

Иными словами, в отличие от первого вида, здесь не формируется слой строительного материала на поверхности платформы, а материал подается в конкретное место, куда в данный момент времени подводится энергия и где идет процесс формирования детали. Подобно тому, как сварщик подводит электрод к месту, где за счет электрической дуги формируется зона расплава.

2. По методу фиксации слоя:

2.1. Фотополимеризация;

2.2. Сплавление;

2.3. Склеивание.

3. По типу строительных материалов:

3.1. Жидкие:

3.1.1. Фотополимеры (акриловые, эпоксидные).

3.2. Сыпучие:

3.2.1. Полимеры (полиамид, полистирол, полиметилметакрилат);

3.2.2. Пески (кварцевые, циркониевые);

- 3.2.3. Металлопорошки (Al, Cu, Ti-Al, Ti, Ag, Au, Co-Cr, Ni-Fe, инструментальные стали).
- 3.3. Нитевидные, прутковые:
 - 3.3.1. Полимеры (ABS-пластик, PLA-пластик);
 - 3.3.2. Металлы (feedstock в виде прутка или проволоки).
- 3.4. Листовые, пленочные:
 - 3.4.1. Полимеры (ПВХ-пленки);
 - 3.4.2. Металлы (фольга, листовой прокат).
- 4. По ключевой технологии:
 - 4.1. Лазерные (SLA-технология, SLS-технология, LOM-технология, LENS-технология, DMD-технология, Laser based wirefeed process);
 - 4.2. Нелазерные (DLP-технология, Ink-Jet-технология, LOM-технология, PolyJet-технология, FDM-технология).

Методы аддитивных технологий

Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, но объединяет их одно: построение модели происходит путем добавления материала (от англ. add – "добавлять") в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления "лишнего" материала.

Классической и наиболее точной технологией является *SLA-технология* (StereoLithography Apparatus), или стереолитография, – метод поэтапного послойного отверждения тонкого слоя жидкого фотополимера лазерным лучом.

Типичная установка стереолитографии работает следующим образом (рис. 1) [15]. В емкости, наполненной жидким фотополимером, находится платформа, способная перемещаться в вертикальном направлении. При формировании первого слоя платформа поднимается на высоту, при которой расстояние от нее до поверхности составляет величину, достаточную для

отверждения слоя. Луч от УФ-лазера посредством сканатора направляется в требуемую точку на поверхности полимера. Под действием излучения локальный участок полимеризуется (отверждается), образуя некоторый объем создаваемой модели. Луч лазера, проходя по заданной траектории, формирует единичный отвержденный слой, соответствующий сечению формируемого изделия. Для отверждения следующего слоя платформа опускается на величину толщины слоя, над поверхностью фотополимера проходит специальная планка (лезвие), выравнивающая его поверхность. Далее процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено изделие целиком.

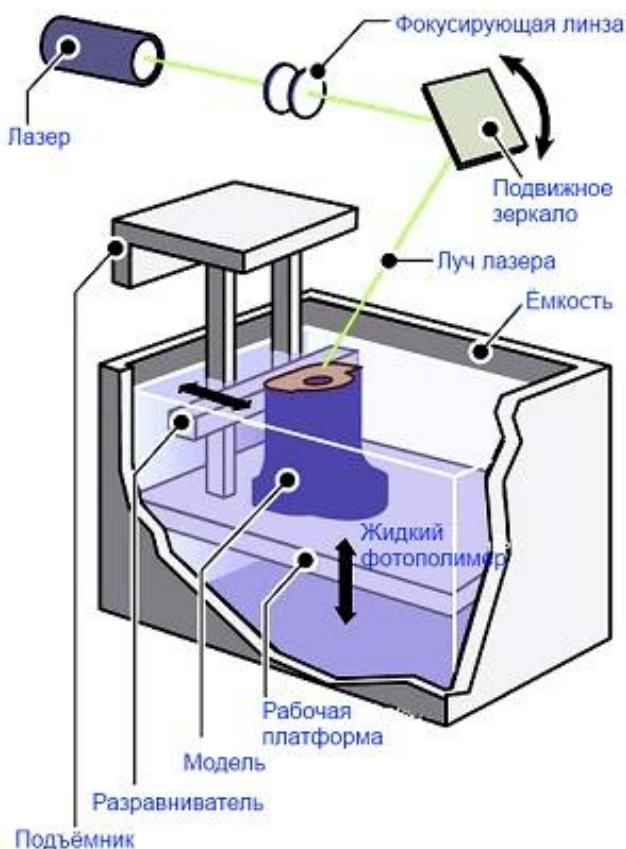


Рис. 1. SLA-принтер

Существует много видов фотополимерных композиций, поэтому спектр применения прототипов, полученных по SLA-технологии, очень широк: макеты и масштабные модели для аэро- и гидродинамических испытаний, литейные и мастер-модели, дизайн-модели и прототипы, функциональные модели и дизайнерские компоненты повышенной точности с высоким уровнем детализации.

Наиболее активно развивается сейчас *SLS-технология* (Selective Laser Sintering) – метод послойного селективного плавления порошкового материала (пластика или смеси с металлическим порошком) под термическим воздействием луча лазера. Принцип работы этой технологии заключается в выборочном плавлении тонкого слоя порошка лучом лазера в соответствии с геометрией сечения детали, соответствующей каждому слою порошка. Селективное лазерное спекание изначально появилось, как усовершенствованный метод отверждения жидкого фотополимера. Здесь строительным (модельным) материалом являются сыпучие, порошкообразные материалы, а лазер является не источником света, как в SLA-машинах, а источником тепла, посредством которого производится сплавление частичек порошка. В качестве модельных материалов используется большое количество как полимерных, так и металлических порошков.

Типичная схема SLS-установки приведена на рис. 2. Изделие формируется в емкости на подвижной платформе. Строительный материал (порошок) хранится в картриджах, с перемещением поршней которых порошок подается на стол установки. При создании первого слоя платформа перемещается в положение, при котором расстояние от края емкости до платформы равно толщине слоя. Выравнивающий ролик наносит слой порошка на платформу. После чего луч лазера, проходя по заданной траектории, спекает участки порошка, формируя единичный слой изделия. Для формирования следующего слоя платформа опускается, и указанные действия повторяются. Для данного процесса не требуется создание поддерживающих структур, поскольку их роль выполняет неспеченный порошок. Перед спеканием порошковый материал может подогреваться посредством ИК-излучения. Процесс обычно реализуется в защитной среде. Современные SLS-принтеры способны работать с керамической глиной, металлическим порошком, цементом и сложными полимерами.

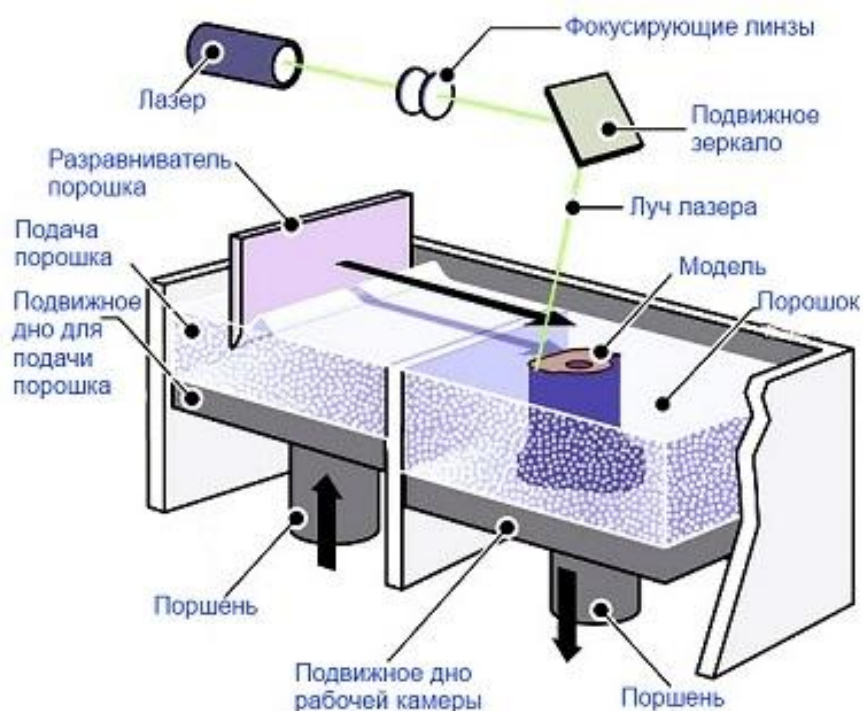


Рис. 2. SLS-принтер

SLM-технология (Selective Laser Melting) – разновидность SLS-технологии, послойное лазерное плавление металлопорошковых композиций.

DMLS-технология (Direct Metal Laser Sintering) – разновидность SLS-технологии, послойное лазерное спекание металлопорошковых композиций; иногда также называют DMF (Direct Metal Fabrication).

EBM-технология (Electron Beam Melting) – формирование слоя за счет расплавления порошкового материала пучком электронов. При торможении ускоренных электронов вблизи поверхности металлического тела их кинетическая энергия преобразуется в тепловую, в результате чего на поверхности порошка возникает локальный источник тепла. Схема установки в целом аналогична SLS-принтеру, за исключением источника воздействия и системы сканирования слоя (рис. 3). Процесс реализуется в техническом вакууме. Для удаления побочных газообразных продуктов процесса через камеру прокачивают небольшое количество инертного газа. Сканирование слоя осуществляется отклонением пучка электромагнитным полем без использования механических систем, что обуславливает отсутствие

вызванных инерцией ограничений к скорости сканирования и обеспечивает ее высокие значения.

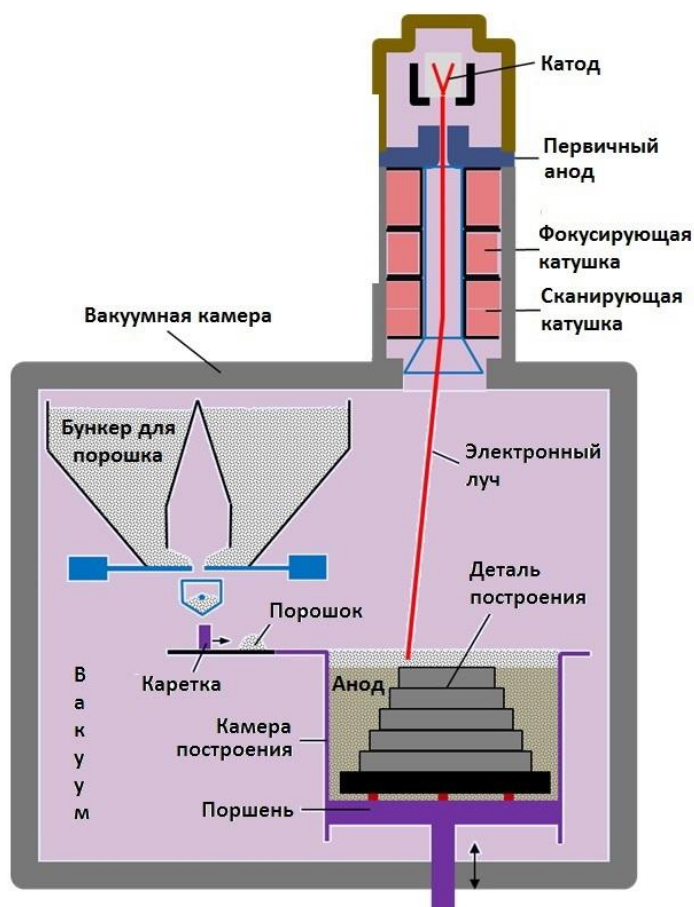


Рис. 3. EBM-принтер

SGC-технология (Solid Ground Curing) – масочная стереолитография, технология отверждения материала целыми слоями на твердом основании. Схема установки приведена на рис. 4. Платформа из крайнего правого положения перемещается в зону экспонирования. При ее прохождении под фильерой 1 на платформу наносится фотополимер. На прозрачной пластине методом электростатического переноса формируется маска, представляющая собой негативное изображение сечения текущего слоя формируемой модели. Пластина с маской помещается в зону экспонирования. Открывается затвор. Излучение от УФ-лампы, проходя через маску, падает на поверхность фотополимера, отверждая его участки в соответствии с формой текущего сечения модели. Затвор закрывается. Пластина с маской выходит из зоны экспонирования, маска уничтожается. Платформа начинает перемещаться в крайнее правое положение. При ее прохождении под эвакуатором с

поверхности аэродинамическим методом удаляются остатки жидкого полимера. При прохождении платформы под фильерой 2 на поверхность наносится расплавленный воск, использующийся в качестве поддерживающей структуры. Далее опускается охлаждающая пластина, воск застывает. Фрезерная головка срезает излишки воска и отвержденного фотополимера, обеспечивая точность толщины слоя. Далее платформа перемещается в обратном направлении. При прохождении под эвакуатором с поверхности удаляются остатки срезанного воска и фотополимера. Для формирования следующего слоя цикл повторяется. После завершения процесса полученное тело извлекается, воск вытапливается в ванне с горячей водой. Постобработка излучением или нагревом не требуется.

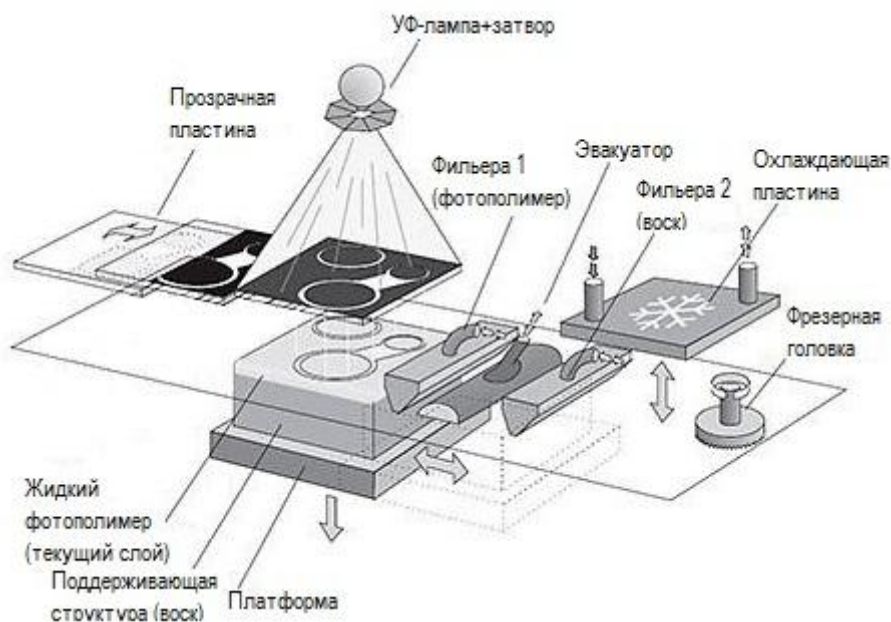


Рис. 4. Схема установки SGC

ЛОМ-технология (Laminated Object Manufacturing) – способ послойного склеивания пленочных материалов с помощью лазерного луча или режущим инструментом. В качестве строительного материала при формировании изделий используется рулонный листовый материал из бумаги или пластмассы. Схема реализации процесса приведена на рис. 5. Полоса рулона подается на принимающий барабан с подающего таким образом, чтобы лист вплотную прилегал к платформе. Горячий ролик поджимает лист и прикрепляет его к ранее нанесенным слоям или платформе. Скрепление

листов осуществляется за счет расплавления нанесенного на поверхность листа покрытия из термопластичного полимера. Далее луч лазера прорезает в листе контур слоя изделия, прорезает два прямоугольных контура, образующих обойму, и разделяет область внутри нее на прямоугольные сегменты – «черепички» («bricks»). Затем барабаны установки перематывают материал в рулоне далее, при этом он отделяется от прикрепленного слоя по наружному контуру обоймы. Использованная часть рулона сматывается на принимающий барабан, а с подающего в рабочую зону перемещается свежий участок материала. Перед нанесением следующего слоя платформа опускается на величину толщины листа. Процесс повторяется до тех пор, пока изделие не будет сформировано полностью.

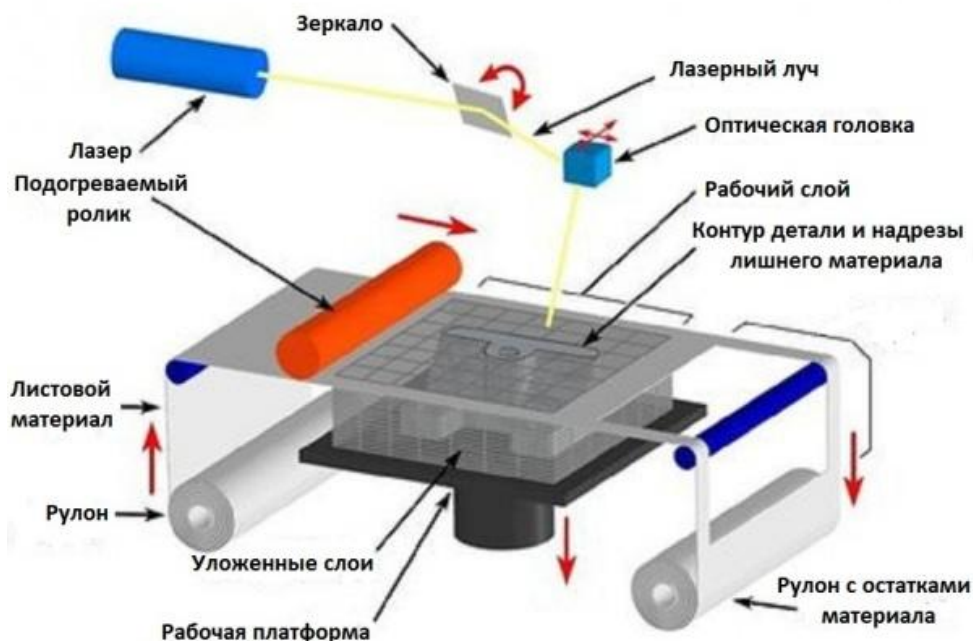


Рис. 5. Схема технологии LOM

FDM-технология (Fused Deposition Modeling) – заключается в формировании слоев изделий путем подачи строительного материала в твердой фазе, дальнейшем его расплавлении и экструзии расплава, который при отверждении образует единицу объема изделия. Способ моделирования нанесением расплава является наиболее известным способом послойной

экструзии и одной из наиболее коммерчески успешных технологий аддитивного формообразования.

Схема процесса FDM приведена на рис. 6. Установка содержит платформу, способную перемещаться в вертикальном направлении, на которой формируются изделия. Над платформой находится экструдер, содержащий одну или несколько экструзионных головок, в которых между подающими роликами заправлена нить с основным материалом или поддерживающим материалом. Нити хранятся намотанными на специальные картриджи. Цикл работы FDM-установки состоит в следующем. Экструдер совершает движения в различных направлениях, обеспечивая перемещение экструзионной головки в соответствии с формой текущего слоя изделия. Одновременно с этим подающие ролики перемещают нить, проталкивая ее в нагреватели. В последних материал нити расплавляется и под воздействием давления со стороны нити экструдируется через печатающие сопла на поверхность изделия. Таким образом, экструдируемый расплав укладывается на поверхность и, застывая, создает слой изделия. В качестве строительного материала используются термопластичные полимеры, технический воск, эластомеры. Далее платформа со сформированными слоями опускается и процесс повторяется.

Процесс FDM требует создания поддерживающих структур. Вторая экструзионная головка может быть использована для нанесения материала поддержки или другого вида строительного материала, например, для получения разноцветных изделий.

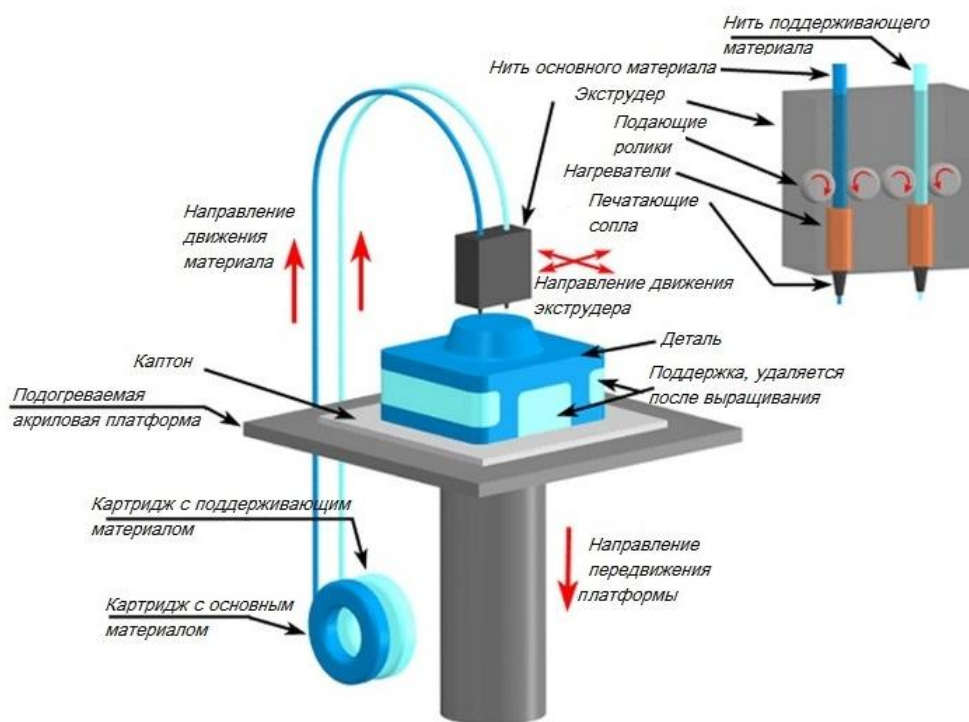


Рис. 6. Схема FDM-установки

Материалы для 3D-печати

К материалам для 3D-машин предъявляются высокие требования, которые лишь отчасти обусловлены желанием получить модели с высокими механическими качествами. В первую очередь, эти требования вытекают из условий нормального протекания и стабильности чувствительных к любым нарушениям процессов изготовления. Нужна высокая стабильность свойств используемых модельных материалов. Поэтому необходимы специальные, сертифицированные фирменные материалы определенных марок, с очень низкими уровнями примесей, чистые по химическому составу, однородные, твердые (порошки) с определенными размерами и массами частиц и т.п. Как правило, в существующих установках 3D-машин предусматривается защита от использования посторонних, нефирменных, более дешевых материалов, которые могут не только ухудшать свойства изготавливаемых объектов, но и испортить установку.

В начальных версиях для каждой из установок 3D-машин разрабатывался и выпускался один, свой определенный материал. Но теперь фирмы-производители машин расширяют сферу применения и предлагают

все новые и новые материалы с различными свойствами: прозрачностью, цветом, жесткостью, температурной стойкостью, прочностью и т.д.

Несмотря на то, что рынок материалов регулярно пополняется новыми, пластик и его различные сплавы до сих пор занимают лидирующие позиции. Дело не только в том, что львиную долю оборудования для трехмерной печати составляют FDM-принтеры. Производство и последующее использование «полимерных» чернил обходится в разы дешевле, нежели использование металлоглины или фотополимеров.

ABS пластик для 3D-принтера. ABS-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол, химическая формула $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$) – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Пропорции могут варьироваться в пределах: 15—35 % акрилонитрила, 5—30 % бутадиена и 40—60 % стирола.

Производство одного килограмма ABS требует эквивалента примерно 2 кг нефти в виде материалов и энергии. Также он может быть повторно переработан.

Некоторые виды ABS могут разрушаться под воздействием солнечного света. Это стало причиной одного из самых обширных и дорогостоящих отзывов автомобилей в истории США.

Свойства:

- Непрозрачный (хотя есть и прозрачная модификация — MABS) материал желтоватого оттенка. Окрашивается в различные цвета.
- Нетоксичность в нормальных условиях.
- Долговечность в отсутствие прямых солнечных лучей и ультрафиолета.
- Стойкость к щелочам и моющим средствам.
- Влагостойкость.
- Маслостойкость.
- Кислотостойкость.

- Теплостойкость 103 °С (до 113 °С у модифицированных марок).
- Широкий диапазон эксплуатационных температур (от –40 °С до +90 °С).

- Растворяется в сложных эфирах, кетонах, 1,2-дихлорэтано, ацетоне.
- Плотность 1.02-1.06 г/см³.

Применение. АБС-пластик используется как один из самых практичных материалов для 3D-печати.

Используется для изготовления:

- крупных деталей автомобилей (приборных щитков, элементов ручного управления, радиаторной решётки);
- корпусов крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры, деталей электроосветительных и электронных приборов, пылесосов, кофеварок, пультов управления, телефонов, факсовых аппаратов, компьютеров, мониторов, принтеров, калькуляторов, другой бытовой и оргтехники;
- корпусов промышленных аккумуляторов;
- спортивного инвентаря, деталей оружия;
- мебели;
- изделий сантехники;
- выключателей, переключателей;
- канцелярских изделий;
- музыкальных инструментов;
- настольных принадлежностей;
- игрушек, детских конструкторов;
- чемоданов, контейнеров;
- деталей медицинского оборудования, медицинских принадлежностей (гамма-стерилизация);
- смарт-карт;

- как добавка, повышающая теплостойкость и/или улучшающая перерабатываемость композиций на основе ПВХ, ударопрочность полистирола, снижающая цену поликарбонатов.

ABS стал первым материалом, из которого начали изготавливать пластиковую нить для домашних настольных аддитивных принтеров. К его недостаткам принято причислять стойкий пластмассовый запах, выделяющийся во время печати. С другой стороны, модели, напечатанные из ABS, отличаются прочностью и износостойкостью. Готовые детали часто получают немного смазанными, из-за чего нуждаются в корректировочных и восстановительных работах. Шлифовка и обработка наждачной бумагой сводят данную проблему на нет.

Материал способен выдержать высокие температуры, поэтому рекомендуется для применения в процессе изготовления долговечных конструкций и комплектующих, регулярно подвергающихся физическому износу.

PLA пластик для 3D-принтера. Полилактид (ПЛА) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов.

Свойства и структура. Как молочная кислота, так и лактид, проявляют оптическую активность, то есть существуют в виде двух L- и D-стереоизомеров, являющихся зеркальным отображением друг друга. Варьируя относительное содержание этих форм в полилактиде, можно задавать свойства получаемого полимера, а также получать различные классы полилактидных материалов. Полилактид из 100 % L-лактида (L-ПЛА) имеет высокую степень стереорегулярности, что придает

ему кристалличность. Температура стеклования L-ПЛА: 54—58 °С, температура плавления 170—180 °С, скачок теплоёмкости 100 % аморфного ПЛА 0,54 Дж/(г·К). Используя при полимеризации смесь D- и L- форм лактида, получают аморфный полилактид (L,D-ПЛА), температура стеклования которого составляет 50—53 °С, плавление отсутствует, так как нет кристаллической фазы.

Самая высокая температура плавления у стереокомплекса, состоящего из чистого L-ПЛА и чистого D-ПЛА. Две цепочки сплетаются, и образующиеся дополнительные взаимодействия между ними ведут к повышению температуры плавления (до 220 °С).

Применение. Полилактид применяется для производства экологически чистой биоразлагаемой упаковки, одноразовой посуды, средств личной гигиены. Биоразлагаемые пакеты из полилактида используются в таких крупных торговых сетях как Wal-Mart Stores и Kmart. Ввиду своей биосовместимости полилактид широко применяется в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов, а также в системах доставки лекарств. Полилактид отвечает концепции устойчивого развития, так как для его синтеза используются ежегодно возобновляемые природные ресурсы. Упаковочные изделия из полилактида — экологически чистая альтернатива традиционной бионеразлагаемой упаковке на основе нефти.

Полилактид также применяется в 3D-принтерах в качестве исходного материала для печати. PLA пластик сегодня рассматривается, как альтернатива ABS-сплавам. Полилактид изготавливается из натурального сырья, поэтому принадлежит к узкой группе биоразлагаемых полимеров. Во время печати сплав почти не выделяет неприятных токсичных испарений, что многими пользователями воспринимается исключительно положительно. Кроме того, состав сравнительно легко утилизируется.



Рис.7. Изделия из полилактида

Используя PLA, можно добиться более высокой скорости и точности печати. С другой стороны, даже широкий ассортимент цветовых исполнений не скрашивает тот факт, что изделия, изготовленные из данного материала отнюдь недолговечны, не отличаются высокой прочностью и хорошей термоустойчивостью. Использовать его рекомендуется преимущественно в декоративных целях. Усовершенствованные материалы на основе классических сплавов помимо PLA и ABS, представленных в чистом виде, на рынке трехмерной печати можно купить их усовершенствованные сплавы. Пионером и флагманом в данном направлении является компания Formfutura. На сегодняшний день ассортимент компании насчитывает несколько вариантов катушек с пластиковой нитью.

EasyFil HIPS – это материал (нить), разработанный на основе PLA-пластика. Его структура усилена высокопрочным полистиролом, что позволило приблизиться к показателям прочности и термоустойчивости классической ABS пластмассы, сохранив при этом преимущества базового состава.

EasyFil PLA



Рис.8. Нить из полилактида

EasyFil ABS предназначен для создания деталей и комплектующих для сложных механизмов. Состав может похвастаться завидной ударопрочностью и высокой крепостью. Его сложно сломать или надломить. Такой пластик для 3D-печати определенно понравится изобретателям и инженерам-любителям, которые задействованы в прототипировании инновационной продукции. Производитель KeyTech решил не оставаться в стороне и разработал собственный вариант усиленного PLA. Филамент получил название PLA LAYER. Настоящую популярность новинка получила после того, как стало известно о присвоении ей сертификата безопасности для изготовления пищевой утвари. Отмечается, что биоразлагаемый пластик способен продержаться под воздействием погодных факторов до 60 дней, без потери базовых характеристик прочности и термоустойчивости.

Другие материалы для 3D-печати. Если пластик для 3D-принтера можно смело назвать обкатанным и проверенным материалом, то фотополимеры, керамический порошок и металлическая глина только начинают свой путь на стези домашней печати. В промышленности все вышеперечисленные материалы используются сравнительно давно. В быту можно встретить только картриджи с фотополимерной смолой для стереолитографических аппаратов.

Фотополимер — вещество, изменяющее свои свойства под воздействием света, чаще ультрафиолетового. До светового воздействия в

основном мягкий и светочувствительный материал. Фотополимер применяется в стоматологическом протезировании для заполнения форм, в изготовлении типографских клише для штампов (печатей), микросхем и печатных плат и в других областях.

Процесс изготовления при использовании одного из популярных фотополимеров:

- фотополимер в виде мономера или низкомолекулярного полимера, как правило, находящихся в жидком состоянии, подвергается активному световому воздействию с длиной волны около 365 нм (при облучении ртутной кварцевой лампой), при этом засвеченные зоны мономера полимеризуются;

- после воздействия света неполимеризованные участки смывают с помощью подходящего растворителя, полимеризованные участки в подобранном растворителе не растворяются;

- на завершающем этапе производят сушку изготовленного изделия от остатков растворителя.

Иногда, для придания большей прочности изделию, после сушки, его снова подвергают воздействию полимеризующего излучения, при этом повышается степень полимеризации, и, соответственно, прочность и стойкость к растворителям.

Для некоторых фотополимеров возможен процесс фотодеполимеризации, при этом, полимеризованные участки снова переходят в исходный мономер, который далее может быть смыт растворителем. Как правило, для деполимеризации используется излучение с более короткой длиной волны, например, порядка 254 нм.

Используется широкая номенклатура порошковых материалов, которые делятся на три группы: металлы, полимеры и керамика. Также используются композиционные порошки, главным образом полимеры, наполненные металлом, стекло- и углеволокнами. Среди полимеров наиболее распространены порошки из полиамида, отличающиеся умеренной ценой и

позволяющие получать изделия со свойствами, близкими к изделиям из конструкционных пластмасс.



Рис. 9. Предметы из фотополимерной смолы

Порошкообразный полиамид применяется в основном для функционального моделирования, макетирования и изготовления контрольных сборок.

Развитие SLS-технологии стимулировало развитие технологий получения порошков металлов. На сегодняшний день спектр металлических порошков достаточно обширен. Широко представлены порошки из нержавеющей стали, титановых, никелевых и никель-хромовых, кобальтовых сплавов. Производятся порошки бронз, специальных сплавов, а также драгметаллов – главным образом для нужд дентальной медицины.

Из металлических порошков «выращивают» заготовки пресс-форм, специальные инструменты, оригинальные детали сложной конфигурации, которые затруднительно или невозможно получить литьем или механообработкой, импланты и эндопротезы и многое другое. Уже сейчас при штучном и мелкосерийном производстве зачастую становится экономически выгодным «вырастить» небольшую партию деталей на SLS-машине, чем изготавливать литейную или штамповую оснастку. В сочетании

с HIP (Hot Isostatic Pressing – горячее изостатическое прессование) и соответствующей термообработкой такие детали не только не уступают литым или кованным изделиям, но и превосходят их по прочности на 20–30 %. Металлопорошковые композиции находят применение в таких высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетика, военная и космическая техника, судостроение, приборостроение.

Керамические порошки применяются в первую очередь для непосредственного изготовления литейных форм и стержней. Материалом служат различные пески: силикатный, кварцевый. Керамические изделия формируются косвенным спеканием, а частицы порошков покрывают термопластичными полимерами.

Керамический порошок и металлическая глина имитируют характеристики металлических сплавов и натуральных глиняных смесей, которые используются в промышленности. Пока они не подходят для печати методом послойного наплавления, но принтеры, поддерживающие технологию селективного лазерного спекания, отлично справляются с ними. Говорить о том, что данные материалы вскоре появятся на вашем столе – еще рано.

Полистирол используется для изготовления литейных выжигаемых моделей. Однако в связи с бурным развитием технологий послойного синтеза приобрел особую популярность в области прототипирования, а также для промышленного изготовления штучной и малосерийной продукции. Полистирольный порошок с размером частиц 50-150 мкм используется на SLS-установках.

При работе с полистирольными моделями выделяются требующие нейтрализации горючие газы: материал частично выгорает в самой форме, в результате чего возникает опасность образования золы и засорения формы, поэтому необходимо предусмотреть возможность стекания материала из застойных зон. Безусловным требованием является использование

прокалочных печей с программаторами. При определенном навыке и опыте литье по выжигаемым полистирольным моделям дает хороший результат.

В результате того, что порошок полистирола не сплавляется, как например, порошки полиамида или металла, а именно спекается: структура модели – пористая, похожая на структуру пенопласта. Это в дальнейшем облегчает удаление материала модели из формы с минимальными внутренними напряжениями при нагревании. Построенная модель требует весьма аккуратного обращения при очистке и при дальнейшей работе в подготовке к формованию.

Характеристика рынка аддитивных технологий

Аддитивные технологии – наиболее динамично развивающаяся отрасль материального производства. В своем ежегодном докладе в Wohlers Report (2013) Terry Wohlers – основатель одноименной консалтинго-аналитической компании, отмечал, что АМ-рынок¹ в 2012 г. вырос на 28,6% по отношению к предыдущему году и общий объем достиг отметки \$2,2 млрд. В 2013 г. рост составил 34,9%, а общий объем – \$3,07 млрд. Ожидается, что к 2020 г. рынок увеличится не менее чем в 5раз.

Terry Wohlers пишет: «Рынок АМ-индустрии по-прежнему содержит огромный неиспользованный потенциал, особенно в части производства товаров широкого потребления и товаров с быстро меняющимся дизайном. Компании тратят 5 – 10% на отработку дизайна в прототипах, а остальные 90 – 95% расходуют на основное производство товара. Именно по этой причине так много компаний хотят занять этот сегмент рынка. Реальные деньги не в дизайне и не в прототипах, реальные деньги в производстве. Поэтому изготовители АМ-систем и фирмы, оказывающие услуги, всё чаще предлагают решения для производства конечных изделий. Однако, этот моделей и прототипов. По мере развития, рост в секторе АМ-технологий

¹АМ-рынок включает в себя продажу 3D-принтеров, изготовление моделей (деталей) для собственных нужд и на заказ, сервис (обслуживание машин), программное обеспечение, модельные и вспомогательные материалы, рекламу и консалтинг

рынок достаточно сложен для АМ-технологий по сравнению с рынком достигнет впечатляющего уровня. В 2011 г. увеличение показателей было достигнуто за счет роста именно на этом быстро растущем и захватывающем сегменте рынка» (Wohlers Report, 2012).

Западные аналитики рассматривают степень внедрения АМ-технологий в материальное производство как надежный индикатор реальной индустриальной мощи государства. Соединенные Штаты Америки были и остаются крупнейшим потребителем АМ-технологий. Около 40% от общего числа проданных машин приходится на США, для сравнения: доля Японии составляет примерно 10% (второе место); Германии – 9,4% (третье); Китая – 8,7%; Великобритании – 4,2%. Россия разделяет с Турцией 12-е место.

Характерной тенденцией последних лет является постоянное увеличение доли деталей, изготавливаемых по АМ-технологиям, в качестве конечных («готовых») изделий –direct manufacturing. Доля доходов от продаж «готовых» деталей (и машин для их «выращивания») от общего объема АМ-рынка составила 34,7%. Доходы от продажи АМ-машин и изготовления конечных деталей в 2013 году увеличились на 64,5% по сравнению с доходами 2012 года и впервые превысили \$1,0 млрд (\$1065 млн.).

По заявлению Christine Furstoss, руководителя группы производства и технологии материалов компании General Electric, через 10 лет примерно половина деталей энергетических турбин и авиационных двигателей будет изготавливаться с помощью АМ-технологий.

Чрезвычайно важной тенденцией развития рынка является заметный прогресс в наиболее сложном и инновационном секторе АМ-индустрии, связанным с непосредственным «выращиванием» изделий из металла.

В 2013 г. число проданных машин увеличилось на 75,8% и достигло 348 единиц (в 2012 г – 198 единиц).

Большое количество машин используется в аэрокосмической отрасли для тестирования изделий непосредственно в рабочей обстановке и

последующего решения вопросов сертификации деталей, изготовленных с использованием АМ-технологий.

В последние годы компания Boeing значительно увеличила номенклатуру деталей, изготавливаемых по АМ-технологиям. Сейчас таким образом изготавливается более 22 тысяч деталей 300 наименований для 10 типов военных и коммерческих самолетов, включая *Dreamliner*.

По сообщениям представителей компании Boeing, компания планирует производить новый беспилотный самолет практически полностью по АМ-технологиям. В 2014 г. специалисты Шеффилдского университета продемонстрировали свою версию беспилотного самолета, построенного по технологии FDM (рис. 10).



Рис. 10. Беспилотный самолет, построенный по АМ-технологиям

Особенностью современного рынка АМ-технологий является его консолидация – объединение бывших конкурентов.

Компания Envisiontec заключила соглашение с ZCorporation о совместном продвижении принтеров Ultra на мировых рынках. (Позже сама ZCorporation вошла в состав 3D Systems). В апреле 2012 г. было объявлено о слиянии двух крупных компаний – Stratasys (США) и Objet (Израиль). Hewlett-Packard имеет реселлерское соглашение с Stratasys. Компания по производству металлопорошковых машин MTT Technologies (Великобритания) объединилась с Renishaw, рассчитывая эффективно использовать дилерскую сеть компании Renishaw для продвижения своей продукции.

Компания 3D Systems в течение последних лет купила более 20 фирм, работавших в области производства 3D-принтеров, программных продуктов, материалов и в сфере оказания услуг. Наиболее крупной сделкой была покупка в январе 2012 г. компании ZCorporation за \$135 млн.

Практически ежегодно на рынке появляются новые компании, новые технологии. Часть из них не выдерживает конкуренции и исчезает, часть уходит под защиту крупных компаний, часть пытается занять свою нишу.

С другой стороны, продолжается демократизация рынка 3D-принтеров, 3D-принтеры перестали быть недоступной роскошью, символом технологической продвинутой фирмы, как Мерседес и Роллс-Ройс – символы престижа. Создаются новые модели, появились принтеры стоимостью до \$1500, которые может позволить себе купить не только университет или колледж, но и обычная семья, в которой увлекаются моделированием и макетированием, изготовлением «солдатиков» и персонажей из «Звездных войн» или эксклюзивных уловистых блесен для спиннинговой рыбалки. Например, компания Buildatron Systems с сентября 2011 г. выпускает 3D-принтер в виде kit-набора стоимостью \$1200. Тот же принтер в сборе можно приобрести за \$2000. Другая американская компания Solidoodle в августе 2011 г. выпустила принтеры на базе известной модели RepRap за \$699, но уже через пять месяцев обновила модель и снизила цену до \$499. Самым дешевым на сегодняшний день является принтер MOD-t компании New Matter (США), которая через краудфандинговый² проект предлагает настольные принтеры с рабочей зоной XYZ=150x100x125 мм за \$149.

В 2009 г. истек срок действия базовых патентов компании Stratasys на технологии FDM, и этим в первую очередь объясняется стремительный рост числа малых и микро-фирм, предлагающих различные вариации простых и дешевых настольных принтеров для домашнего творчества, школьных

²Краудфандинг (от англ. crowd-funding) — способ финансирования проектов, при котором средства на создание нового продукта поступают от его конечных потребителей посредством предоплаты

кружков моделирования и т. д. Статистика производства 3D-принтеров резко пошла вверх.

Крупные фирмы, такие как 3D Systems, Stratasys, не желая упускать доходы и от этой части рынка, покупают наиболее удачливые малые компании из «потребительского» сектора и выпускают на рынок разнообразные модели настольных принтеров.

Однако здесь необходимо провести принципиальное разграничение. Рынок АМ-технологий, в частности 3D-принтеров, разделяется на два уровня: «любительские» и «профессиональные». Разделение условное, но можно ввести критерий разделения – деньги: «любительские» - это потребительский товар (для собственного потребления), на который денег не заработать; «профессиональные» – это средство производства, на котором зарабатывают деньги.

«Любительская» категория включает в себя принтеры и сферу услуг (расходные материалы, сервис, программное обеспечение и т. д.), которые используются для самореализации отдельных творческих личностей, для обучения в школах, колледжах и университетах (важнейшая сфера применения!), в качестве хобби, иногда для визуализации каких-то идей и облегчения коммуникации на начальной стадии развития нового бизнеса.

«Профессиональные» принтеры – это относительно дорогие АМ-машины, способные решать задачи расширенного воспроизводства. Они отличаются (от «любительских»), большей зоной построения, производительностью, более высокой точностью построения, надежностью, расширенным ассортиментом модельных материалов. Это на порядок более сложные машины, требующие освоения специальных навыков работы как с самими машинами, так и с модельными материалами и программными продуктами. Как правило, операторами профессиональных машин становятся специалисты с высшим техническим образованием.

В англоязычной литературе принято негласное терминологическое разделение 3D-принтеров на категории: термин 3D-printing обычно

используют, когда речь идет о настольных, «любительских» принтерах; если же в тексте используется словосочетание Additive Manufacturing, то, как правило, имеются в виду «профессиональные» принтеры и технологии.

По сути, рынок АМ-технологий разделен на два рынка, которые развиваются самостоятельно и практически независимо друг от друга. Иногда принтеры из потребительской части рынка появляются в «индустриальной» зоне, но, в основном на ранней стадии бизнеса для приобретения некоторого опыта и изучения потенциальных возможностей АМ-технологий.

В России рынок АМ-технологий остается слабо развитым. Отдельные ведущие отечественные предприятия авиационной, автомобильной промышленности, энергетики, предприятия Росатома и др. имеют опыт практического использования АМ-технологий, однако широкого распространения эти технологии не получили. Тогда как они, по мнению ведущих мировых экспертов, являются стратегически значимыми, и именно с развитием АМ-технологий связывают дальнейшее инновационное развитие машиностроения.

Основные разработки аддитивных технологий в российской промышленности

Сегодня в России существует множество компаний, оказывающих услуги по прототипированию, однако в основном это небольшие предприятия, обладающие одним-двумя недорогими 3D-принтерами, способными выращивать несложные детали. Связано это с тем, что высокотехнологичное оборудование, способное обеспечить высокое качество изделий, стоит дорого и требует для работы и обслуживания квалифицированного, специально обученного персонала. Далеко не каждая компания может себе это позволить, ведь для покупки необходимо четко понимать, каким образом и насколько эффективно это оборудование будет использоваться, будет ли оно загружено работой. Слабостью таких компаний

является отсутствие комплексности решения задач. В лучшем случае дело ограничивается оказанием достаточно простой услуги – изготовлением прототипа или модели тем или иным способом. Тогда как АF-технологии – это не только и не столько 3D-принтер, но важная часть 3D-среды, в которой происходит рождение нового продукта – от замысла конструктора до материализации его идей в серийном производстве. Среда, в которой новый продукт создается, "живет", эксплуатируется, ремонтируется вплоть до завершения "жизненного цикла" этого продукта.

Поэтому для полноценного использования АF-технологий нужно создать эту среду: освоить 3D-проектирование и моделирование, САЕ- и САМ-технологии, технологии оцифровки и реинжиниринга³, сопутствующие технологии, включая и вполне традиционные, но переформатированные под 3D-среду. Причем освоить не в отдельно взятом университете или крупном заводе – такие есть промышленностью в целом на всех уровнях – этого нет даже в отдельно взятой, например, авиационной или автомобильной промышленности. Тогда и АF-технологии будут выглядеть не экзотическими изысками, а вполне естественным и эффективным звеном общей 3D-среды создания, производства и жизненного цикла изделия. Существуют на рынке и крупные компании, обладающие оборудованием высокого уровня, которые, как правило, решают достаточно сложные производственные задачи и оказывают более широкий спектр полезных услуг, сопутствующих прототипированию, способных от начала до конца провести НИОКР и проконтролировать качество работ на каждом этапе.

К таким предприятиям можно отнести ФГУП "НАМИ", АБ "Универсал", НПО "Салют", ОАО "НИАТ" (Москва), УМПО (Уфа), НИИ "Машиностроительные Технологии", (СПбГПУ), ОАО "Тушинский машиностроительный завод" и ряд других. Однако такой комплексный подход по силам далеко не каждому предприятию, особенно в условиях

³Реинжиниринг — это фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование бизнес-процессов для достижения существенных улучшений в ключевых для современного бизнеса показателях результативности.

безучастной позиции со стороны государства.

В целом ситуация с внедрением АF-технологий в российскую промышленность остается крайне неблагоприятной. Ученые, инженеры и технологи не нашли нужных слов, чтобы привлечь внимание государства к опасному отставанию в абсолютно необходимой для отечественной промышленности инновационной сфере. Не нашли аргументов, чтобы убедить власти в необходимости разработки национальной программы развития аддитивных технологий, создания отечественной индустрии АF-машин. Россия практически не участвует в международных организациях, оказывающих значительное влияние на развитие АF-технологий в мире.

Ключевыми проблемами при внедрении АF-технологий в первую очередь являются кадры, которые, как известно, решают все; собственно 3D-машины, высококлассное АF-оборудование, которое невозможно приобрести и невозможно создать без целевой поддержки со стороны правительства в той или иной форме (что, кстати, и делается за рубежом в подавляющем большинстве случаев); материалы – отдельная и сложная проблема междисциплинарного характера, решение которой опять-таки целиком и полностью зависит от качества управления процессом со стороны государства. Это неподъемные для отдельной отрасли задачи. Это проблема, которая может быть решена только при условии целенаправленного взаимодействия высшей школы, академической и отраслевой науки.

Прекрасным примером "рыночного вмешательства" государства в решение сложных технологических задач является литейный завод АСТech, построенный во Фрайбурге (недалеко от Дрездена) в конце 90-х годов в период ренессанса Восточных территорий. Завод совсем небольшой по нашим меркам – всего 6500 кв. метров общей площади, построен с иголки, в чистом поле и был оснащен самым передовым технологическим оборудованием, главной фишкой которого были АF-машины для выращивания песчаных форм (от компании EOS, Мюнхен). Это был, пожалуй, первый пример комплексного подхода – завод был оснащен

современным оборудованием для реальной работы в 3D-среде: АФ-машины, измерительная техника, ЧПУ-станки, плавильное, литейное и термическое оборудование. Теперь там работают около 230 чел., 80 % которых – ИТР и менеджмент. Сейчас это один из самых известных заводов с мировым именем, клиентами которого являются практически все ведущие автомобильные компании Германии, многие европейские и американские авиационные фирмы. На завод достаточно передать 3D-файл будущего изделия и описать задачу: материал, количество, желательные сроки изготовления и что вы хотите получить – отливку или полностью обработанную деталь, от этого зависят сроки выполнения заказа – от 7 дней до 8 недель. Примечательно, что около 20 % заказов – это единичные детали, около 40 % составляют заказы на 2–5 деталей. Почти половина отливок – чугун; примерно треть – алюминий; остальное – сталь и другие сплавы. Специалисты завода активно сотрудничают с фирмами – изготовителями АФ-оборудования, ведут совместные НИР с университетами, завод является и успешным коммерческим предприятием, и полигоном для отработки новых технологических процессов.

Рынок аддитивных технологий в России развивается, но происходит это очень медленно, поскольку, чтобы вывести эти технологии на должный уровень, необходима поддержка государства. При должном внимании к внедрению АФ-технологий они могут значительно повысить скорость реагирования на потребности рынка и экономическую эффективность многих отраслей промышленности.

Федеральная целевая программа «Исследования и разработки 2014 - 2020" по развитию отечественных аддитивных технологий

Одна из задач консорциума во главе с ВИАМ (куда также входят Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ОАО "Авиадвигатель" и Институт проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук — ИПЛИТ РАН) — это создание технологий для аддитивного производства и ремонта деталей авиационных

газотурбинных двигателей. То есть "выращивание" методом послойного селективного лазерного сплавления сложнопрофильных деталей горячего тракта газотурбинного двигателя: деталей камеры сгорания, сопловых и рабочих лопаток турбин высокого и низкого давления и теплозащитной панели методом селективного лазерного сплавления металлических порошков.

Кроме того, для решения этой задачи параллельно необходимо научиться получать сами исходные порошки заданной дисперсности из жаропрочных и жаростойких сплавов на основе никеля. При этом необходимо добиться, чтобы металлопорошковые композиции обеспечивали при послойном нанесении максимальную плотность упаковки гранул. А для снижения пористости и повышения однородности структуры нужно также разработать технологии термической и газостатической обработок материала, синтезированного из металлического порошка.

На первом этапе в ИПЛИТ РАН уже разработали электронные модели деталей горячего тракта для их последующей "заливки" в программу, генерирующую слои и поддерживающие элементы для построения. Специалисты ФГУП "ВИАМ" тем временем получили лабораторные партии порошков выбранных марок и совместно с СПбПУ провели исследования их микроструктуры и технологических характеристик, что в будущем поможет сформировать требования к порошкам для аддитивных технологий.

Группа, работающая над созданием системы компьютерного проектирования и инжиниринга для аддитивного производства композитных конструкций, поставила перед собой амбициозную задачу: создать оптимальную конструкцию из оптимального материала с помощью оптимальных технологий. В консорциум, возглавляемый СПбПУ, входят Сколтех, Томский политехнический университет, МИС и С, Институт физики прочности и материаловедения РАН, Институт проблем машиноведения РАН. Индустриальный партнер консорциума — Объединенная ракетно-космическая корпорация.

Чтобы создать оптимальную конструкцию, инженеры уже на этапе проектирования должны учесть требования жесткости, устойчивости, прочности (статической, циклической, вибрационной, динамической и т.п.), обеспечить долговечность конструкции. Причем необходимо просчитать все возможные вариации эксплуатационных режимов.

При разработке и создании новой промышленной продукции приходится тестировать много различных вариантов опытных образцов. Изготовление литейных деталей в этом процессе — одна из наиболее дорогостоящих и трудоемких частей проекта: необходимо изменять конструкции, корректировать технологическую оснастку. Причем эта оснастка по сути одноразовая — в ходе итераций происходит существенное изменение конструкции изделия, и подгонка предыдущего варианта изделия под новый либо чересчур трудоемка, либо вообще невозможна.

Важный момент при изготовлении деталей ракетно-космической техники — добиться снижения весовых характеристик конструкций. Для этого применяются композиционные материалы (композиты), сложность которых заключается в том, что, во-первых, они состоят из разных по физико-механическим свойствам компонентов (волокна, матрица и т.д.), а во-вторых, для них характерны высокие удельные жесткостные и прочностные характеристики, усталостные характеристики и др.

Для начала разработчики сосредоточились на параметрах, которые позволяют проектировать, а затем с помощью аддитивных технологий изготавливать элементы ракетно-космической техники. Эти параметры таковы: плотность — не более $1,5 \text{ г/см}^3$, теплопроводность в направлении оси армирования — не менее $1,5 \text{ Вт/мК}$, коэффициент линейного теплового расширения в направлении оси армирования — не более $2,5 \cdot 10^{-5}$, разрушающие напряжения при растяжении в направлении оси армирования — не менее 250 МПа , разрушающие напряжения при сжатии в направлении оси армирования — не менее 200 МПа , разрушающее напряжение при поперечном изгибе — не менее 25 МПа , модуль упругости при растяжении в направлении

оси армирования – не менее 30 ГПа, модуль упругости при поперечном изгибе – не менее 15 ГПа.

При этом конструкция должна сохранять работоспособность в широчайших диапазонах: температурный диапазон эксплуатации – от -120 °С до +120 °С, вакуум – 10-13 мм рт. ст., диапазон частот синусоидальных и случайных вибраций – от 5 до 2500 Гц.

Классический подход к оптимизации в данном случае не годится, поскольку оптимальная микроструктура композитов может быть определена лишь на основе построения полномасштабных математических моделей на микро-, мезо- и макроуровнях. В своих исследованиях группа применяет основной численный метод решения нестационарных нелинейных 3D-уравнений в частных производных — метод конечных элементов. Причем, и это принципиально важно, он позволяет решать задачи с моделями, содержащими миллионы и десятки миллионов степеней свободы, необходимых для обеспечения высокого уровня адекватности математических моделей реальным композиционным материалам, физико-механическим и технологическим процессам, реальным промышленным конструкциям.

В 3D-задачах оптимизации механики деформируемого твердого тела, сформулированных для реальных конструкций и описываемых уравнениями в частных производных, целевой функцией, как правило, выступает вес конструкции (критерий — минимизация веса), а переменные проектирования (их десятки или сотни) — геометрические характеристики конструкции (форма, размеры и т.д.).

Для аддитивного изготовления композиционных материалов был выбран метод послойного наплавления и разработана конструкция экструдера, обеспечивающая непосредственное "смешивание" волокна и матрицы в экструдере.

Полученный на первом этапе двухкомпонентный композиционный материал состоит из ABS-пластика, армированного непрерывными

углеволокнами марки Toray T300 вдоль одного направления. Высоких механических характеристик образцов удалось достичь за счет высокого уровня адгезии полимерной матрицы и армирующего углеволокна (для этого производится специальная химическая обработка углеволокон и исключается прямой контакт между ними, приводящий к их взаимному контактному проскальзыванию под нагрузкой) и повышения прочностных свойств полимерной матрицы путем введения дисперсных частиц.

Экспериментальные образцы показали стойкость к использованным маслам, спирту и бензину. Дефекты типа расслоения и непроклеи, а также дефекты поверхности и неоднородности микроструктуры идентифицировались и оценивались методом лазерной доплеровской виброметрии. А конечно-элементные исследования микро- и макронапряжений и нелинейного деформирования с прогрессивным накоплением повреждений и закритическим деформированием, вплоть до разрушения образцов, были проведены на основе математических 3D-моделей.

Задания для самостоятельной работы студентов

1. Особенности аддитивных технологий? Преимущества и недостатки.
2. История создания послойного синтеза.
3. Аддитивные технологии для оборонной промышленности.
4. Аддитивные технологии для судостроения.
5. Особенности материалов для аддитивного формообразования.
6. Полимеры для послойного синтеза.
7. Металлы в аддитивных технологиях.
8. Способы получения порошков для 3D-печати.
9. Ограничения применения аддитивной технологии.
10. Рынок продуктов аддитивных технологий.
11. Экологические аспекты аддитивных технологий.

Заключение

Руководитель проекта, начальник лаборатории ВИАМ, кандидат технических наук Александр Евгенов очерчивает круг проблем, с которыми сталкиваются исследователи. Прежде всего, они касаются 3D-сектора в целом: "В настоящее время в России широкое освоение аддитивных технологий сдерживается следующими проблемами: отсутствием собственного промышленного производства порошков сплавов отечественных марок (сферической формы, высокой чистоты по газовым примесям), отсутствием порядка квалификации синтезированных материалов и сертификации аддитивных установок. Зарубежные порошки неприменимы в отраслях, связанных с обороноспособностью нашей страны, кроме того, из-за санкций часть порошковых материалов зарубежного производства уже запрещена к поставке в Россию"⁴.

Научный руководитель работы, проректор по перспективным проектам СПбПУ, профессор Алексей Боровков: "Аддитивные технологии в сочетании с композитами, пространственно-армированными много направленными непрерывными высокопрочными и высококомодульными волокнами — это новое научное направление, которое находится в самом начале своего развития. 3D-принтинг объектов из композиционных материалов с оптимальной микроструктурой позволит решить недостижимые сегодня задачи в различных отраслях, в первую очередь, это ракетно-космическая техника, авиа- и вертолетостроение, автомобилестроение"¹.

Исследователи надеются, что их разработки интегрированной технологии проектирования, аддитивного производства и многомасштабного моделирования позволят создать перспективные космические аппараты и обеспечить мировой уровень эксплуатационно-технических характеристик отечественных космических средств.

⁴<https://www.kommersant.ru/doc/2678720>. Безотходное производство, на котором можно выполнять прежде невероятные задачи, — скорое будущее российских аддитивных технологий.

На данный момент рынок трехмерной печати далек от перенасыщения. Аналитики отрасли сходятся во мнении, что аддитивные технологии ждут радужное будущее. Уже сегодня научно-исследовательские центры, занимающиеся АF-разработками, получают огромные финансовые вливания от оборонного комплекса и медицинских государственных институтов, что подтверждает обоснованность экспертных прогнозов.

В эпоху инновационной экономики время, затраченное на производство товара, является важнейшим фактором успеха или неуспеха бизнеса. Даже качественно произведенный товар может оказаться невостребованным, если рынок к моменту выхода новой продукции уже насыщен подобными товарами компаний-конкурентов. Поэтому все больше направлений промышленности активно осваивают АF-технологии. Все чаще их используют научно-исследовательские организации, архитектурные и конструкторские бюро, дизайн-студии и просто частные лица для творчества или в качестве хобби. Во многих колледжах и университетах аддитивные машины, или, как их часто называют, 3D-принтеры являются неотъемлемой частью учебного процесса для профессионального обучения инженерным специальностям.

Библиографический список

1. Пат. 0473901 США. Manufacture of Contour Relief Maps / Blanthier J.E. Заявлено 24.01.1890. Оpubл. 03.05.1892. – 3 с.
2. Newhall B. Photosculpture // Image. – 1958. – Vol. 7. – No. 5. – pp. 100-105.
3. Sobieszek R.A. Sculpture at the Sum of Its Profiles: Francois Willeme and Photosculpture in France, 1859-1868 // The Art Bulletin. – 1980. – Vol. 62. – No. 4. – pp. 617-630.
4. Пат. 774549 США. Photographic Process for the Production of Plastic Objects / Baese C. Заявлено 17.05.1902. Оpubл. 08.11.1904. – 3 с.
5. Пат. 2015457 США. Process for Manufacturing a Relief by the Aid of Photography / Morioka I. Заявлено 20.02.1933. Оpubл. 24.09.1935. – 4 с.
6. Пат. 2775758 США. Photo-Glyph Recording / Munz O.J. Заявлено 25.05.1951. Оpubл. 25.12.1956. – 3 с.
7. Пат. 4041476 США. МКИ G11C 13/04. Method, Medium and Apparatus for Producing Three-dimensional Figure Product / Swainson W.K. Заявлено 23.07.1971. Оpubл. 09.08.1977. – 18 с.
8. Пат. 2263777 ФРГ. МКИ B05B 13/02; B05B 15/04; B05B 7/22; B05D 3/03; B22F 3/105; B29C 67/00; C23C 24/10; C23C 4/18. Verfahren und Vorrichtung zur herstellung beliebiger Gegenstaende aus beliebigem schmelzbarem Material / Ciraud P.A.L. Оpubл. 28.12.1972. – 14 с.
9. Пат. 2166526 Франция. МКИ B22F 3/00; B29C 13/00; C09F 3/00. Procédé pour la fabrication de pieces quelconques en matiere également quelconque mais fusible / Boudet J.L.M. Заявлено 28.12.1971. Оpubл. 23.07.1973. – 11 с.
10. Пат. 4247508 США. МКИ B29C 1/02. Molding Process / Householder R.F. Заявлено 03.12.1979. Оpubл. 27.01.1981. – 15 с.
11. Kodama H. Automatic Method for Fabricating a Three-dimensional Plastic Model with Photo-hardening Polymer // Review of Scientific Instruments. – 1981. – Vol. 52. – No. 11 – pp. 1770-1773.

12. Herbert A.J. Solid Object Generation // Journal of Applied Photographic Engineering. – 1982. – No. 8. – pp. 185-188.
13. Пат. 60247515 Япония. МКИ В29С 39/02; В29С 39/22; В29С 39/42; В29С 67/00; С08G 59/18; С08G 59/40; С08J 5/00; В29К 105/24; С08G 59/00. Optical Shaping Method / Marutani Y. Оpubл. 23.05.1984. – 8 с.
14. Пат. 5630981 США. МКИ В29С 35/08; В29С 41/02. Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Stereolithography / Hull C.W. Заявлено 06.06.1995. Оpubл. 20.05.1997. – 17 с.
15. Liou F. Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development / Liou F. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008. – 568 p.
16. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. - 220 с.
17. Вальтер А.В. Технологии аддитивного формообразования. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 171 с.
18. Сухочев Г.А. Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий / Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, Е.Г. Смольяникова – Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2013. – 222 с.
19. Ерин С.В. Перспективы 3D-печати детекторов частиц: Препринт ИФВЭ 2014–11. – Протвино, 2014. – 13 с.
20. Дьяченко В.А. Материалы и процессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование) / В.А. Дьяченко, И.Б. Челпанов, С.О. Никифоров, Д.Д. Хозонхонова.– Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2015. – 198 с.
21. Антонова В.С., Осовская И.И. Аддитивные технологии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017.-30 с.

22. XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: сборник тезисов докладов круглого стола «Индустрия 4.0. Аддитивные технологии» – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 16 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Тезисы докладов круглого стола «Индустрия 4.0. Аддитивные технологии» XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – АКТУАЛЬНЫЕ РАЗРАБОТКИ И ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

Рудской А.И.

*Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
e-mail: rector@spbstu.ru*

В рамках реализации «Индустрии 4.0» аддитивные технологии занимают ключевое место, поскольку обладают необходимой гибкостью, быстрым переходом от изготовления одного типа изделия к другому, высоким уровнем автоматизации и контроля, возможностью массового цифрового производства индивидуализированных продуктов, способностью взаимодействовать в рамках концепций Интернета вещей и услуг.

В докладе представлены актуальные разработки в области изготовления аддитивными технологиями сложнопрофильных изделий для медицины, авиации, космической промышленности. Данные разработки проведены совместно с ведущими институтами РАН, отраслевым институтом ФГУП «ВИАМ», индустриальными партнерами, а также иностранными университетами TU Delft (Нидерланды) и Пекинским университетом Цинхуа (КНР). Приведены перспективы развития в области аддитивных технологий, функционально-градиентных материалов и структур, бионического дизайна и гибридных технологий.

Совместно с РНИИТО им. Р.Р. Вредена проведена работа по разработке подхода для изготовления аддитивными технологиями индивидуальных конструкций эндопротезов. Подход реализован согласно концепции полностью цифрового производства и создания кастомизированных продуктов. Результатом является эндопротез из титанового сплава изготовленный по технологии селективного лазерного плавления, который был успешно установлен пациенту в ходе операции.

В рамках взаимодействия с ФГУП «ВИАМ» проводятся исследования порошковых материалов отечественных жаропрочных никелевых сплавов, их использования для аддитивного производства деталей ГТД для нового ближне-магистрального самолета МС-21, ведется работа по разработке российских стандартов на исходные материалы, оборудование, испытания изделий, выполненных по аддитивным технологиям.

В докладе представлены результаты взаимодействия с ОАО «РКК «Энергия» по применению аддитивных технологий для изготовления сложнопрофильных изделий космической индустрии. Проведенная работа позволила изготовить опытные образцы внутренней камеры сгорания перспективного многофункционального кислородно-углеводородного ЖРД.

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Бузник В.М., Морозов Е.В., Новиков М.М.

ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов ГНЦ РФ, 105005, Москва,
ул. Радио 17, e-mail: bouzник@ngs.ru

Аддитивные технологии (АТ) представляют собой направление, активно проникающее в науку и производство¹. Надежность и долговечность АТ-изделий определяется качеством их изготовления, формируемого составом сырья и технологическими параметрами. Большое значение имеет неразрушающий контроль АТ-изделий с целью выявления дефектов, роли технологических параметров в обеспечении эксплуатационной стабильности². Эффективным методом в выявлении отмеченных факторов является магнитно-резонансная томография (МРТ), хорошо зарекомендовавшая себя при исследовании полимерных композиционных материалов³.

При исследовании полимерных АТ-изделий МРТ позволила выявить формирование объемных и локальных дефектов и выбрать оптимальный способ изготовления АТ-изделий⁴. МРТ исследования в условиях влажностного старения показали ключевую роль объемных дефектов в разрушении изделий. Проведенный комплекс исследований продемонстрировал полезность и эффективность МРТ контроля полимерных АТ-изделий.

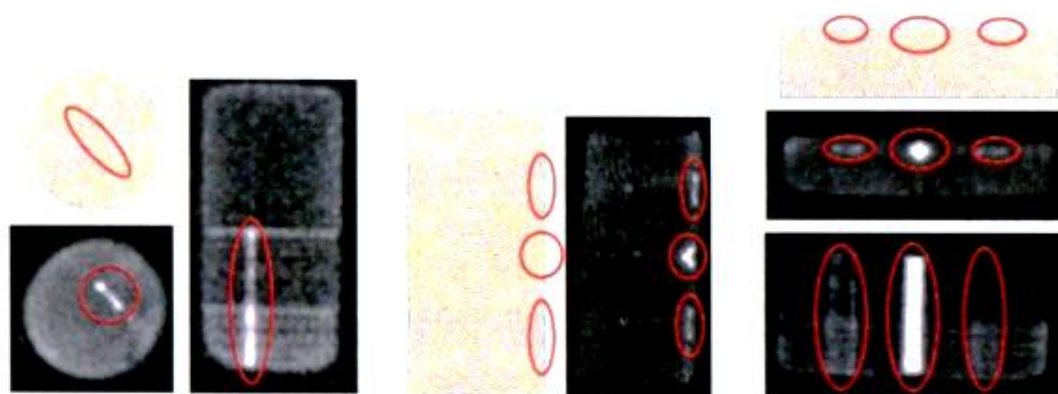


Рисунок 1. МРТ изображения изделий с дефектами, обусловленными разрывами сплошности круговой штриховки, используемой в лазерной стереолитографии

Литература

1. Каблов Е.Н. *АМТ*, 2015, 1, 3.
2. Puebla K., Arcaute K., Quintana R., Wicker R.B. *Rapid Prototyping*, 2012, 18, 374.
3. Морозов Е.В., Коптюг И.В., Бузник В.М. *АМТ*, 2014, 5, 17.
4. Morozov E.V., Novikov M.M., Bouzник V.M. *Additive Manufacturing*, 2016, 12, 16.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 14-29-10178 офи_м.

НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБОРОНЫ СТРАНЫ (ПО РАБОТАМ ИХС РАН)

Шевченко В.Я.

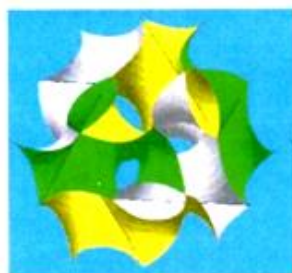
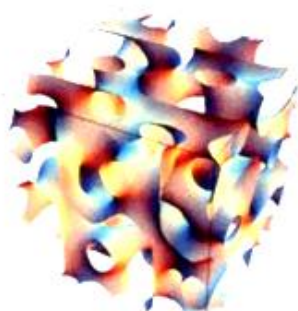
*Институт химии силикатов им. И.В.Гребенщикова Российской Академии
Наук, 199034, Санкт-Петербург, наб.Макарова 2,
e-mail: shevchenko@isc.nw.ru*

Средства бронезащиты персонала и военной техники. На основе «диссоциативной» теории, разработанной советскими учеными (химиками), показано, что в условиях сверхвысоких скоростей нагружения наиболее эффективна керамика. Эта концепция в тот момент абсолютно отсутствовала в западной литературе. Была предложена схема «двуслойки», при которой керамические преграды использовались наиболее эффективно и разработана конструкция бронеплитки (элемент К-139), организован выпуск на ряде оборонных предприятий СССР. Построен «Ряд» веществ по их стойкости к высокоскоростному нагружению, и, задолго до работ западных ученых, предложен набор преград для кумулятивной струи по убыванию «упругого импеданса». На Западе такую броню называют «Чобхем».

Эти работы в области керамической брони опередили работы западных ученых на несколько лет. В настоящее время зарубежные специалисты не только успешно освоили изделия из композиционной бронекерамики на основе гидродинамической и диссоциативной теории, но выдвигают и новые принципы бронезащиты персонала и военной техники.

Сейчас рынок переполнен различными моделями бронежилетов на основе самых разнообразных материалов, которые являются либо моделями старых разработок, либо конструкциями, не имеющими серьезной научной базы, и не стандартизированными.

Для преодоления наметившегося отставания необходимо проводить систематические фундаментальные и прикладные исследования. Речь идет прежде всего о создании изделий на основе абсолютно новых принципов. Это идея трижды периодической поверхности минимальной энергии (ТППМЭ).



Современные технологии позволят получать бронеконструкции со значительной диссипацией энергии на единицу объема, превышающей

известные образцы. Создание таких бронеконструкций станет возможным с использованием современных аддитивных технологий.

Еще одно важное применение идеи о ТППМЭ – это использование композитов для покрытия судов и, возможно, летательных аппаратов с целью достижения ламинарного обтекания или ламинизировать турбулентный пограничный слой при сверхкритических числах Рейнольдса. Одновременно будет решаться проблема гидроакустических покрытий на основе полиуретанов, в том числе с переменной пористостью. Это также предмет аддитивных технологий.

ПОЛУЧЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

**Цветков Ю.В., Самохин А.В., Фадеев А.А., Синайский М.А.,
Алексеев Н.В.**

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской
Академии Наук, 119334, Москва, Ленинский проспект 49,
e-mail: tsvetkov@imet.ac.ru*

Термическая плазма, генерируемая в электроразрядных плазмотронах, является эффективным инструментом получения сферических порошков металлов и сплавов используемых в аддитивных технологиях. За рубежом созданы установки на базе высокочастотных плазмотронов мощностью до 200 кВт, обеспечивающие сфероидизацию металлических порошков с производительностью до десятков килограммов в час. Несмотря на то, что исследования и разработки по сфероидизации порошковых материалов в б. СССР проводились в 70-х – 80-х годах прошлого века, в настоящее время в РФ отсутствуют промышленные плазменные технологии и оборудование по получению сферических порошков.

В настоящее время ИМЕТ РАН является ведущей организацией в РФ, где проводятся активные исследования и разработки процессов и аппаратуры для получения сферических порошков различных материалов, включая наноструктурные металломатричные композиты, в потоках термической плазмы, генерируемой в электродуговых плазмотронах. Электротехническое оборудование, используемое для генерации термической плазмы в электродуговых плазмотронах, имеет меньшую стоимость по сравнению с оборудованием для получения ВЧ плазмы, кроме того электродуговые плазмотроны обладают большей единичной мощностью и коэффициентом полезного действия.

В результате выполненных исследований показана возможность сфероидизации металлических порошков неправильной формы (титан и титановый сплав, железо и нержавеющая сталь, сплавы на основе вольфрама и молибдена, многокомпонентные сплавы на основе никеля и ниобия), полученных различными методами.

Предложены подходы к созданию плазменных технологий получения сферических порошков металломатричных композитов с армирующими тугоплавкими наночастицами, а также сферических наноструктурных порошков псевдосплавов на основе вольфрама. В настоящее время подобные порошки не производятся и разработка технологий их получения является одной из важнейших и определяющих задач для реализации современных высокотехнологичных производств.

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ИНЖИНИРИНГОВЫЙ ЦЕНТР – ВНЕДРЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Кортов С.В., Фефелов А.С., Меркушев А.Г.

*ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
620019, Екатеринбург, улица Мира 19,
e-mail: info.rec@mail.ru*

Одной из основных задач создания РИЦ, как структурного подразделения УрФУ, является внедрение аддитивных технологий в промышленность Свердловской области. Выполнение поставленной задачи осуществляется следующими путями:

1. Образовательная деятельность – создание учебных курсов для студентов ВУЗов и курсов повышения квалификации для специалистов предприятий; проведение семинаров, конференций и презентаций.
2. Создание технологии и оборудования для получения отечественного сырья для аддитивных технологий. Разработана конструкторская документация на установку УР-9 газового распыления расплавов на основе алюминия, меди, стали. Получена экспериментальная партия порошкового материала на основе алюминия для использования в аддитивных машинах с технологией селективного лазерного сплавления. Технология и документация переданы для реализации предприятию структуры РОСАТОМА, г. Новоуральск.

3. Разработка и изготовление аддитивной машины УрАМ 150D для исследования процессов селективного лазерного сплавления металлических порошковых материалов и изготовления функциональных деталей. Презентация машины состоялась на выставке ИННОПРОМ 2016.

4. Решение инжиниринговых задач по заказу предприятий реального сектора экономики, в том числе и медицинских центров. Это не только срочное изготовление деталей, но и совместная разработка конструкции деталей, позволяющих значительно улучшить прочностные и эксплуатационные характеристики, при этом уменьшая массу и себестоимость изготовления.

Преимущество проекта РИЦ заключается именно в комплексном подходе к решению поставленных задач в области аддитивных технологий, имеющим значение не только в плане получения научных знаний, но и в их прикладном использовании.

Работа выполнена в рамках реализации пилотного проекта по созданию и развитию в Российской Федерации инжиниринговых центров на базе ведущих технических вузов страны, согласно плана мероприятий («дорожной карты») в области инжиниринга и промышленного дизайна, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 июля 2013 г. № 1300-р Минобрнауки России реализуемом совместно с Минпромторгом России.

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОЛУЧЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ С ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫМ И КАРБИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

**Карпов М.И., Санин В.Н., Колобов Ю.Р., Самохин А.В.,
Костылев В.А., Светлов И.Л., Попович А.А.**

*Институт физики твердого тела РАН, 142432 г. Черноголовка,
Московская обл., ул. Академика Осипьяна, 2, karpov@issp.ac.ru*

Для решения комплексной проблемы создания металлургического сырья для аддитивных технологий изготовления изделий из ультравысокотемпературных композиционных материалов на основе тугоплавких металлов (Nb, Mo, Hf), упрочненных силицидами, боридами и карбидами, для работы при температурах 1300–1600°C создается консорциум из коллективов высококвалифицированных представителей организаций,

включающий: ИФТТ РАН (г. Черноголовка), ИПХФ РАН (г. Черноголовка), ИСМАН (г. Черноголовка), ВИАМ (г. Москва), ИМЕТ РАН (г. Москва), ИМЕТ УрО РАН (г. Екатеринбург), Санкт-Петербургский национальный государственный исследовательский политехнический университет имени Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

Исследования будут включать разработку технологических принципов получения металлургического сырья для аддитивных технологий изготовления изделий из ультравысокотемпературных композиционных материалов, определение параметров 3D технологий для получения изделий из них и 2D технологий для создания жаростойких покрытий.

Исследования создаваемого консорциума является первым шагом в разработке всего технологического алгоритма, включающего: разработку составов и эффективных технологий получения новых ЖМ, способных работать при температурах 1300–1600 °С. В основу технологии получения металлургического сырья из этих материалов заложены метод СВС-металлургии для получения исходных порошков сплавов, плазменная обработка порошков с целью получения гранул требуемой дисперсности для последующего изготовления изделий методами аддитивных 3d- технологий, холодного аэрозольное напыление из сверхзвуковой струи в вакууме для создания теплозащитных и стойких к высокотемпературной коррозии покрытий.

ЛАЗЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Григорьянц А.Г., Третьяков Р.С., Шиганов И.Н., Шишов А.Ю.

*Московский Государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105007, Москва, 2я Бауманская ул.д.5,
e-mail: mt12@bmstu.ru*

В МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся крупномасштабные исследования по созданию технологий и оборудования для лазерных аддитивных процессов, внедряемых в отраслях машиностроения. Исследуются три основных процесса: лазерная стереолитография, прямое лазерное нанесение порошков и селективное лазерное плавление.

Разработана и изготовлена интегрированная производственная система на базе отечественного оборудования и оригинальных технологий получения сложных изделий от компьютерного проектирования до изготовления изделия в виде отливки. Форма для отливки изготавливается на, созданном нами,

лазерном стереолитографе оригинальной конструкции. В качестве среды отверждения создан специальный фотополимер под излучение 0,53 мкм. Установка позволяет получать формы высокой точности. Подготовка компьютерной модели и её обмеры после изготовления осуществляются разработанной системой бесконтактного формометрирования. Созданы технологии центробежного литья по стереолитографическим моделям.

Разработка процессов прямого нанесения материала основана на исследованиях газодинамических потоков порошков и газов при вылете из сопла, а также их взаимодействие с подложкой. На этой основе созданы оптимальные конструкции сопел и выбраны научно-обоснованные технологические режимы выращивания деталей. Для реализации этого процесса впервые в отечественной практике нами разработан и изготовлен, и введен в эксплуатацию комплекс прямого выращивания деталей из порошковых материалов методом послойной лазерной наплавки. Комплекс позволяет выращивать детали размером 400x400x400 мм, максимальным весом до 500 кг из различных порошковых материалов и создавать новые композиционные материалы.

Для получения более точных деталей используется процесс селективного лазерной плавления. Проведённые нами исследования позволили создать новую установку для реализации этого процесса. Установка позволяет изготавливать детали в объёме 110x110x110 мм со скоростью построения 10 см³ в час. Точность построения составляет 0,1мм при толщине слоя от 20 до 100 мкм.

Все разработанные технологии и оборудование опробованы при изготовлении конкретных деталей по заказам машиностроительных предприятий.

ПОЛУЧЕНИЕ И СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СПЛАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ

Лыков П.А., Байтимеров Р.М., Сапожников С.Б.

*ФГАОУ ВО Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет), 454080 Челябинск, проспект Ленина, 76,
e-mail: Pavel2504@ya.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных работ по производству металлических порошков методом распыления расплава¹ в

газовой струе, последующей модификации поверхности порошков² и селективного лазерного сплавления³ полученных порошков.

Экспериментальные работы по распылению металлов производились на установке УРМ-001⁴. Модификация поверхности порошков производилась методом: 1) обработки в планетарной мельнице mixer KURABO Mazerustar kk250; 2) осаждения металла из газовой фазы в магнетронном распылителе РИТМ-СП). Соответствие получаемых металлических и композиционных порошков требованиям, предъявляемым к материалам, используемым в селективном лазерном сплавлении, определялось с использованием оптического анализатора Occhio500nano и растрового электронного микроскопа JSM-6400LV. Селективное лазерное сплавление металлических и композиционных порошков производилось на установке SINTERSTATION® Pro DM125. Структура полученного материала исследовалась методом химического картирования шлифов на растровом электронном микроскопе JSM-6400LV. Для механических испытаний использовался испытательный комплекс Gleeble 3800.

Полученные материалы обладают высокой плотностью (от 85 до 99% от теоретической) и прочностью, сравнимой с литыми материалами. Композиционные материалы отличаются высокой твердостью и износостойкостью по сравнению с материалом матрицы.

Литература

1. Лыков, П.А. Влияние технологических параметров распыления металлических расплавов на гранулометрический состав порошка и форму частиц порошка / П.А. Лыков, В.Е. Рошин, Е.И. Воробьев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2012. – №6. – С.21-23.
2. Композиционные микропорошки для селективного лазерного спекания / Лыков П.А., Сапожников С.Б., Шулев И.С., Жеребцов Д.А., Абдрахимов Р.Р. – *Металлург.* – 2015. – №9. – С. 98-101.
3. Lykov, P.A. Selective Laser Melting of Copper / P.A. Lykov, E.V. Safonov, A.M. Akhmedianov // *Materials Science Forum.* – 2016. – Vol. 843. – P. 98-101.
4. Сафонов Е.В., Шульц А.О., Бромер К.А., Рошин В.Е., Лыков П.А., *Патент 110312 РФ*, 2011.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ХИМИИ И ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Самодурова М.Н., Джигун Н.С., Bertrand Ph., Movchan I

*Южно-Уральский Государственный Университет, пр. Ленина 76, 454080
Челябинск, Россияe-mail: mar-samodur@yandex.ru
National Engineering School of Saint-Etienne, 58 rue Jean Parot,
42023 St-Etienne, France*

В течение двух последних десятилетий, Аддитивное Производство (АП) доказало свои возможности и преимущества в производстве сложных функциональных частей и в настоящее время демонстрирует все больше применений в различных отраслях промышленности. Дальнейшие достижения в области АП значительно определяются прогрессом в области порошковых материалов - доступностью, разнообразием и свойствами передовых металлических сплавов.¹

В АП комбинированный эффект быстрого остывания, направленного охлаждения и фазовых превращений, вызванных повторяющимися термическими циклами, оказывает определяющее влияние на микроструктуру материала, в том числе на микроструктурные различия между наплавленными слоями.² Все они должны быть глубоко изучены и приняты во внимание при разработке металлических порошковых материалов, предназначенных специально для АП.

Настоящие промышленные приложения показывают растущие потребности для нескольких групп материалов для АП, в частности: чистый Ti и Ti-6Al-4V, различные сплавы Al, такие как Al-Sc, жаропрочные высокотемпературные сплавы на никелевой основе, а также инновационные материалы такие как металлокерамика.³

Необходимы совместные усилия специалистов в области химии и материаловедения, разработчиков аддитивных технологий и конечных пользователей, чтобы оптимизировать состав исходных порошковых материалов, уменьшить риски пористости и трещин, контролировать пластичность и прочность материала, чтобы обеспечить превосходные механические свойства функциональных изделий АП.

References

1. Frazier W. E., *Journal of Material Engineering and Performance*, 2014, **23**, p. 1917.
2. Kobryn P.A., Semiatin S.L., *JOM*, 2011, **53**, p 40–43 3.
3. AM European Technological Platform Strategic Research Agenda 2014, <http://www.rm-platform.com>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВВ751П

Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В., Хаймович А.И.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Самара, Московское шоссе 34,
e-mail: pdla_smelov@mail.ru

Одним из направлений аддитивных технологий является технология селективного лазерного сплавления (СЛС). Технология СЛС позволяет производить детали сложной формы, в короткие сроки, практически без использования технологической оснастки, за счет чего резко сокращается цикл производства изделий^{1,2}.

В данной работе объектами исследования являлись, порошок никелевого жаропрочного сплава и образцы, полученные из этого материала, методом послойного формообразования. Результаты механических испытаний на растяжение образцов, полученных методом СЛС, представлены на рисунке 1. Значения предела прочности, скорости сканирования и линейной плотности энергии (ЛПЭ) представлены в относительных величинах.

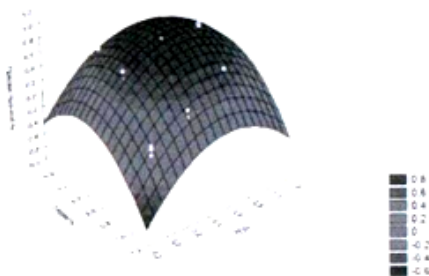


Рисунок 1. Влияние скорости сканирования и ЛПЭ на предел прочности

Произведены исследования микроструктуры и механических свойств образцов, полученных методом СЛС из жаропрочного материала ВВ751П. Получена зависимость предела прочности от скорости сканирования и ЛПЭ. Исследовано влияние основных технологических параметров сплавления на шероховатость образцов.

Литература

1. Гарибов Г.С. *Металлургия гранул - основа создания новых материалов для перспективных авиадвигателей*, 2012, 26, 58-63.
2. Шишковский И.В. *Основы аддитивных технологий высокого разрешения*. – СПб.: Питер, 2016. – 400с.

Эти исследования были проведены на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEFI59314X0003).

ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ СВС-МЕТАЛЛУРГИИ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ 3-D ТЕХНОЛОГИЙ

Юхвид В.И., Андреев Д.Е., Санин В.Н., Икорников Д.М.,
Левашов Е.А., Сентюрин Ж.А., Зайцев А.А., Погожев Ю.С.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
Российской Академии Наук, 142432, Черноголовка, ул. Академика
Осипьяна, 8, e-mail: yukh@ism.ac.ru
Национальный Университет Науки и Технологии МИСИС,
Ленинский пр. 4, Москва, 119049*

Под руководством Е.А. Левашова разработан вариант получения гранулированных жаропрочных сплавов (ЖС), [1,2], для аддитивных 3D-технологий, включающий 1 – синтез полуфабрикатов методом центробежного СВС-литья; 2 – вакуумный индукционный переплавление слитков и получение массивного электрода для распыления; 3 – получение гранул сферической формы методом центробежного распыления.

В сообщении рассмотрены результаты по синтезу литых ЖС методом центробежного СВС-литья. Разработаны 2 оригинальных подхода, позволившие получить ЖС на основе интерметаллидов никеля и титана, состав которых представлен в таблице №1.

Таблица №1. Состав сплавов, полученных методом центробежного СВС-литья.

Сплавы	Состав сплавов, % вес.								
	Ni	Al	Cr	Co	Ti	Nb	O	C	N
ЖС-NiAl	основа	19,2	15,3	8,7	-	-	0,12	0,04	0,004
ЖС-TiAl	-	32,4	2,7	-	основа	4,8	0,19	0,17	0,05

Литература

1. V.I. Yukhvid, D.E. Andreev, V.N. Sanin, Zh.A. Sentyurina, Yu.S. Pogozhev, E. A. Levashov. *Int. J. SHS*, 2015, 24,176.
2. А.А. Зайцев, Ж.А. Сентюрин, Ю.С. Погожев, Е.А. Левашов, В.Н.Санин, В.И. Юхвид, Д.Е. Андреев, М.А. Михайлов, Ю.Ю. Капланский. *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2015, 4, 15.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ. Программа приоритетных направлений в 2014-2020 годы, Соглашение № 14.578.21.0040.

Учебное издание

Антонова Вероника Сергеевна
Осовская Ираида Ивановна

Новейшие достижения аддитивных технологий

Учебное пособие

Редактор и техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2019, поз. 105

Подп. к печати 07.09.2019. Формат 60x84/16. Бумага тип №1. Печать
офсетная. 3,75 уч.-изд. л.; 3,75 печ. л. Тираж 50 экз. Изд. № 105.

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского
государственного университета промышленных технологий и дизайна,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4