

М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш

Аддитивные технологии в машиностроении

Аддитивные технологии в машиностроении

Пособие для инженеров



Москва 2015

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АВТОМОБИЛЬНЫЙ
И АВТОМОТОРНЫЙ ИНСТИТУТ
«НАМИ»

М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Пособие для инженеров



©ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

Москва 2015

УДК 621.01

ББК 34.5

З-67

Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении /
М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров.
– М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.

Аддитивные технологии или Additive Manufacturing (АМ-технологии) – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или САД-модели) методом послойного добавления (add, англ. – добавлять, отсюда и название) материала.

В книге приведены классификация аддитивных технологий, общие сведения об основных видах АМ-технологий, производителях АМ-машин, тенденции развития и примеры практического использования АМ-технологий в промышленности.

Книга предназначена для широкого круга инженеров, конструкторов, технологов, чья деятельность связана с созданием новой продукции и организацией современного промышленного производства.

Адрес: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2.

Тел.: +7 495 456-30-81

Факс: +7 495 456-31-32

E-mail: aolmin@nami.ru

Сайт в Интернете: www.nami.ru

ISSN 0135-3152

©ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. Исторические предпосылки появления аддитивных технологий	12
ГЛАВА 2. Терминология и классификация	17
2.1 Виды технологий	18
2.1.1 Bed Deposition	18
2.1.2 Direct Deposition	23
2.2 Классификация ASTM:	24
▪ Material Extrusion	25
▪ Material Jetting	26
▪ Binder Jetting	29
▪ Sheet Lamination	30
▪ Vat Photopolymerization	31
▪ Powder Bed Fusion	32
▪ Directed energy deposition	32
ГЛАВА 3. Характеристика рынка АМ-технологий	34
3.1 Статистические данные	34
3.2 Критерии выбора технологий	44
ГЛАВА 4. Аддитивные технологии и быстрое прототипирование	47
ГЛАВА 5. Технологии и машины для выращивания металлических изделий	63
5.1 Машины и оборудование для выращивания изделий из металла	68
5.1.1 Группа Bed Deposition:	68
▪ Concept Laser	69
▪ EOS	71
▪ 3D Systems	73
▪ SLM Solutions	74
▪ Realizer	75
▪ Renishaw	78
▪ Arcam	79
▪ ExOne	81
▪ Matsuura Machinery	85

▪ Fabrisonic	89
5.1.2 Группа Direct Deposition:	92
▪ POM Group	93
▪ Optomec	94
▪ Irepа Laser	96
▪ InssTek	96
▪ Sciaky	96
▪ Ion Fusion Formation	98
ГЛАВА 6. Аддитивные технологии и литейное производство	103
6.1 Технологии литья металлов с использованием синтез-моделей и синтез-форм	106
6.1.1 Синтез-модели из порошковых полимеров:	107
▪ SLS-технология	107
▪ InkJet-технология	111
6.1.2 Синтез-модели из светоотверждаемых смол:	116
▪ SLA - лазерная стереолитография	117
▪ DLP-технология	126
▪ MJM - технология	130
6.1.3 Технологии и машины для синтеза песчаных литейных форм	133
6.1.3.1 Общие сведения о технологиях синтеза песчаных форм	133
6.1.3.2 Машины для синтеза песчаных форм	139
6.2 Литье полимеров с использованием синтезированных мастер-моделей	142
6.3 Оснащение литейного участка для эффективного использования аддитивных технологий	148
ГЛАВА 7. Аддитивные технологии и порошковая металлургия	157
7.1 Материалы для «металлических» АМ-машин	157
7.1.1 Общие положения	157
7.2. Методы получения металлических порошков	160
7.2.1 Газовая атомизация	162
7.2.2 Вакуумная атомизация	167
7.2.3 Центробежная атомизация	167

7.3	Технология Spray forming	171
7.4	Производители атомизеров и поставщики металлопорошковых композиций для использования в АМ-машинах	182
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		196
Библиографический список		203
Интернет-источники. Сайты компаний-производителей аддитивных машин и модельных материалов		207
Глоссарий		209

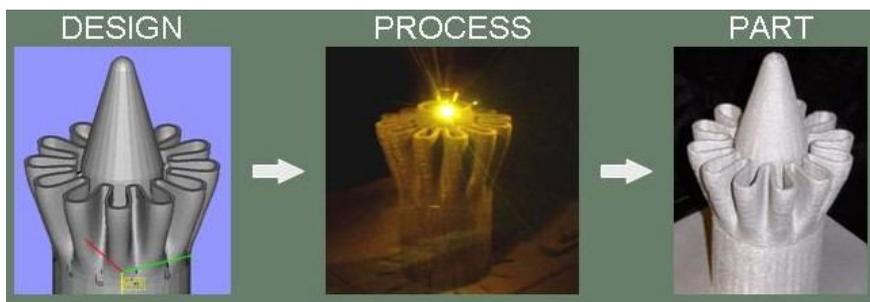
ВВЕДЕНИЕ

Технология «трёхмерной печати» появилась в конце 80-х гг. XX в. Пионером в этой области является компания 3D Systems, которая разработала первую коммерческую стереолитографическую машину – SLA – Stereolithography Apparatus (1986 г.). До середины 90-х гг. она использовалась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (SLA-машины), затем порошковые (SLS-машины) – были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов весьма скромный. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчётов (CAE) и механообработки (CAM) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы 3D-принтеры.

Ранее эти технологии назывались «технологиями быстрого прототипирования» (от английского – Rapid Prototyping), однако термин RP-технологии довольно быстро устарел и в настоящее время не отражает в полной мере реальной сути технологии. Методами «быстрого прототипирования» сейчас изготавливаются вполне коммерческие, товарные изделия, которые уже нельзя назвать прототипами – имплантаты и эндопротезы, инструменты и литейные формы, детали самолётов и спутников, и многое другое.

Аддитивные технологии предполагают изготовление (построение) физического объекта (детали) методом послойного нанесения (добавления, англ. – «add») материала, в отличие от традиционных методов формирования детали, за счёт удаления (subtraction – вычитание) материала из массива заготовки.

Суть Additive Manufacturing (AM) может быть проиллюстрирована простым примером (рисунок В1): CAD-модель → AM-машина → деталь.



(Источник: www.optomec.com)

CAD-модель

AM-машина

Деталь

Рисунок В1. Технологии Additive Manufacturing (LENS Optomec)

При использовании аддитивных технологий (в англоязычной литературе – Additive Manufacturing, Additive Fabrication, или AM-, AF-technologies) все стадии реализации проекта от идеи до материализации (в любом виде – в промежуточном или в виде готовой продукции) находятся в «дружественной» технологической среде, в единой технологической цепи, в которой каждая технологическая операция также выполняется в цифровой CAD/CAM/CAE-системе. Практически это означает реальный переход к «безбумажным» технологиям, когда для изготовления детали традиционной бумажной чертёжной документации в принципе не требуется.

Аддитивные технологии охватывают все новые сферы деятельности человека. Дизайнеры, архитекторы, кондитеры, археологи, астрономы, палеонтологи, преподаватели и представители многих других профессий используют 3D-принтеры для реализации совершенно неожиданных идей и проектов. Музыкальный инструмент (рисунок В2) оригинального дизайна из алюминид-наполненного полиамида создал профессор Diegel из университета Мэсси (Massey University, Auckland, New Zealand). Активно создаются роботизированные комплексы для «печати» быстротвердеющими бетонными смесями. Андрей Руденко из Миннесо-

ты создал экструзионный 3D-принтер для строительства зданий (рисунок В3).



(Источник: <http://3druck.com/objects/elektrische-gitarren-aus-dem-3d-drucker>)

Рисунок В2. Электрогитара, «выращенная» из полиамида



(Источник: www.iflscience.com/tags/3d-printing)

Рисунок В3. Напечатанный замок, автор А. Руденко

Китайская компания Shanghai WinSun Decoration Design Engineering реализует проект по созданию принтеров для постройки зданий с использованием промышленных отходов в качестве строительного материала. Первые десять домов построены в течение одних суток (рисунок В4).

Десятки компаний (Biozoon, Fab@Home, Dovetailed, Structur3D, Choc Edge, SMRC, f3d, Natural Machines и др.) осваивают новый рынок – 3D-печать пиццы, пасты, печенья и иной кондитерской продукции (рису-

нок В5). Скучные кусочки-кубики сахара можно заменить на весёлые, напечатанные на 3D-принтере (рисунок В6).



(Источник: www.3dprinterplans.info/tag/china/)

Рисунок В4. Дома, собранные из напечатанных блоков



(Источник: <http://3dprintingindustry.com/2014/11/09/11-food-3d-printers>)

Рисунок В5. Напечатанные кондитерские изделия

За рубежом все эти работы ведутся, безусловно, энтузиастами и творческими людьми, но главное – при активной поддержке государства

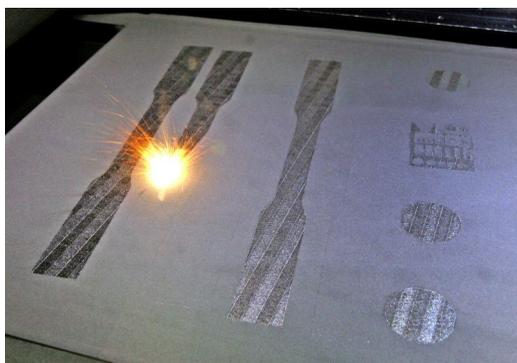
и бизнеса, не важно, из какого источника – федеральный или местный бюджет, гранты или целевая поддержка стартап-фирм.



(Источник: <http://news.discovery.com/tech/gear-and-gadgets/open-wide-3d-printed-food-made-to-eat-photos-140130.htm>)

Рисунок В6. Фигурный сахар, изготовленный на 3D-принтере

Особое внимание уделяется развитию технологий DMF – Direct Metal Fabrication (рисунок В7), непосредственного «выращивания» из металла, которую рассматривают в качестве одной из стратегических для освоения в первую очередь в аэрокосмической и оборонной отраслях.



(Экспонаты выставки Eurotold 2014)

Рисунок В7. Технологии DMF – Direct Metal Fabrication

В профессиональном языке авиастроителей есть фразеологизм “buy-to-fly ratio”, который можно перевести как «отношение того, что купил, к тому, что полетело», т.е. сколько материала было куплено и

сколько реально «полетело» в качестве детали в составе самолёта. По разным данным, это отношение составляет 15:1 или даже 20:1 для сложных деталей. Использование аддитивных технологий позволяет свести этот показатель до 1,5 – 2,0:1.

Машины, строящие детали из металла – поистине верх инженерного искусства. Здесь сконцентрированы самые передовые знания по металлургии, лазерной технике, оптике, электронике, системам управления, измерительным устройствам, механике, вакуумной технике и т.д.

В настоящей работе приведены данные по наиболее отработанным и популярным АМ-технологиям и коммерчески успешным АМ-машинам для послойного синтеза изделий из самых разнообразных материалов.

ГЛАВА 1. Исторические предпосылки появления аддитивных технологий

Предшественниками современных АМ-технологий считают две оригинальные технологии [1], появившиеся в XIX в. В 1890 г. Josef E. Blather предложил способ изготовления топографических макетов – трёхмерных карт поверхности местности. Суть метода, рисунок 1.1, 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.

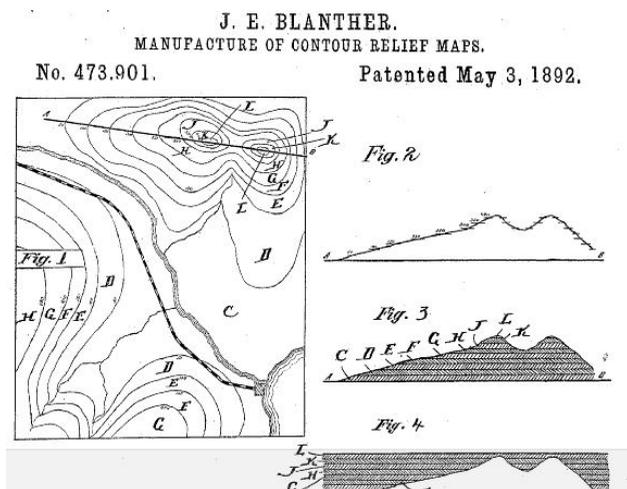


Рисунок 1.1. Blather J.E. Патент США 473901, выдан 03.05.1892 г.

Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверхность 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 – Lamination Object Manufacturing, послойное ламинирование или склеивание тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет

0,051-0,25 мм. В 1979 г. профессор Nakagawa 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 François Willème в 1890 г. (рисунок 1.2). Суть её состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры (Willème 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.

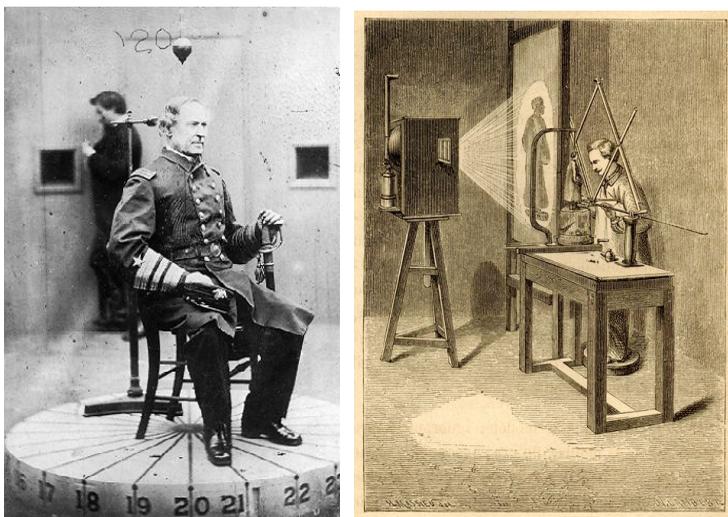


Рисунок 1.2. Фотоскульптура по технологии François Willème [2]

Для уменьшения трудоемкости процесса Willème немец Carlo Baese в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени за-

светки – экспозиции. (Пат. США 774549, Photographic process for the reproduction of plastic objects, 08.11.1904).

В 1935 г. Isao Morioka предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру (рисунок 1.3). Способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набор контуров. Контуры затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким способом формировался трёхмерный образ объекта.

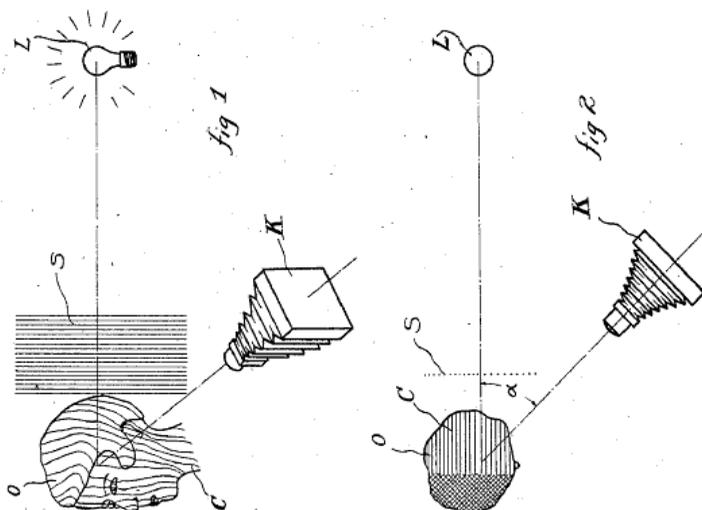
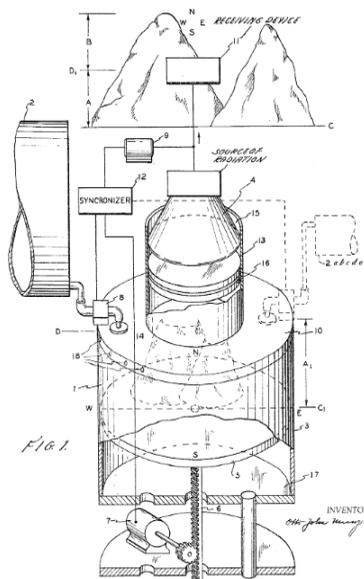


Рисунок 1.3. Способ создания рельефа с помощью фотографии
Патент США 2015457

Или же, как и у François Willème, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трёхмерного образа с помощью режущего инструмента.

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея Otto Munz (1956 г.), который предложил способ селективной (последовательной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве платформы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установлен-

ный 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 (рисунок 1.4). На патент Otto Munz, как на предшественника современной стереолитографии, ссылаются практически все авторы новых изобретений в области аддитивных технологий.

Рисунок 1.4. Иллюстрация к патенту: Otto John Munz, Photo-Glyph recording, Патент США № 2775758, 25.12.1956

В 1977 г. Wyn Kelly Swainson (Пат. США № 4041476) предложил способ получения трёхмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов (Р.А. Ciraud, 1972).

В 1981 г. R.F. Housholder (Пат. США № 4247508) предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала нанесением его на плоскую платформу. Далее производилось разравнивание до определенной величины по высоте с последующим спеканием слоя. В том же году Hideo Kodama опубликовал результаты работы с первых функцио-

нальных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. была опубликована работа А.Ж. Herbert по созданию трёхмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал (рисунок 1.5).

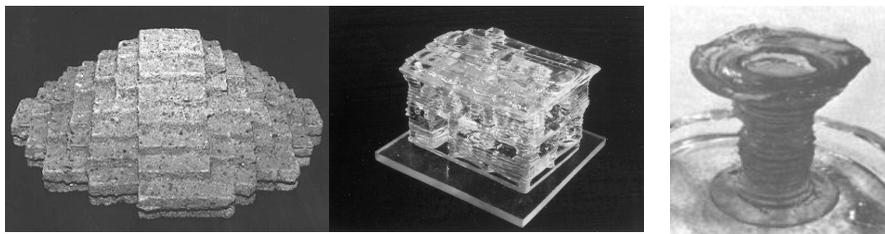
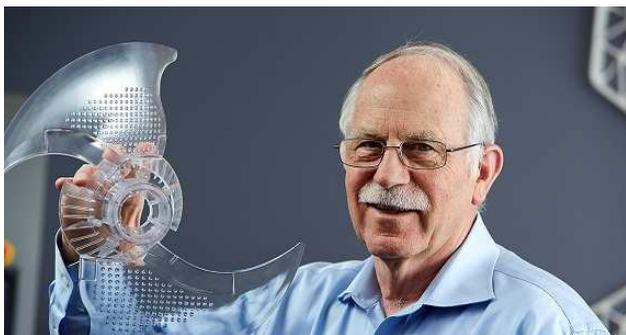


Рисунок 1.5. Образцы моделей из фотополимеров, полученные Housholder, Kodama и Herbert [2]

Процесс патентования новых технических решений по АФ-технологиям приобрел лавинообразный характер. В 1986 г. Charles W. Hull предложил способ послойного синтеза посредством ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввел в оборот термин «стереолитография». Charles W. Hull стал основателем фирмы 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза.



С этого момента началась новая эпоха в индустрии – эпоха аддитивных технологий.

ГЛАВА 2. Терминология и классификация

Вопрос терминологии рассматривался в рамках деятельности организации ASTM International (American Society for Testing and Materials), занимающейся разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг. В стандарте ASTM F2792.1549323-1 аддитивные технологии определены как *«process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies»* («процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от «вычитающих» производственных технологий»).

Под «вычитающими» технологиями подразумевается механообработка – удаление («вычитание») материала из массива заготовки. Таким образом, сообщество американских инженеров прибегло к понятию (subtractive) «вычитание», чтобы определить новое понятие (additive) «добавление», т. е. в самом определении «аддитивные технологии» трактуются как противоположность технологиям механообработки. Но не все технологии соединения материала, а только те, которые создают объект по данным 3D-модели или из CAD-данных, т. е. на основе трёхмерной компьютерной модели. Это второе ключевое слово – CAD. Третье ключевое слово здесь – «послойно». Можно отметить, что американцы используют в определении термина слово «usually» (обычно), по-видимому, допуская, по меньшей мере, теоретическую возможность и непослойного построения.

Рекомендованы два основных термина – Additive Manufacturing (AM), Additive Fabrication (AF), а также равнозначные по смыслу – Additive Processes, Additive Techniques, Additive Layer Manufacturing, Layer Manufacturing и Freeform Fabrication. Все они могут быть переведены как «аддитивные технологии», их также можно называть технологиями послойного синтеза.

В интернет-сообществе, популярной научно-технической литературе и разговорной речи профессионалов можно услышать и прочитать:

«выращивание», «3D-печать», «3D-принтер» или «3D-принтинг». Де-факто эти термины узаконили сами себя без санкции ASTM, и их также следует принять в качестве синонимов.

Термин «Rapid Prototyping», или «быстрое прототипирование» рекомендовано изъять из обращения, поскольку прототипирование – это лишь часть аддитивных технологий, уже далеко не доминирующая.

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

- формирование слоя, рисунок 2.1;
- фиксация слоя, рисунок 2.2;
- применяемые строительные (модельные) материалы (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т. д.), рисунок 2.3;
- ключевая технология (лазерные, нелазерные), рисунок 2.4;
- подвод энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т. д.).

Первое из перечисленного, пожалуй, единственное, что принципиально отличает два вида аддитивных технологий: Bed Deposition и Direct Deposition.

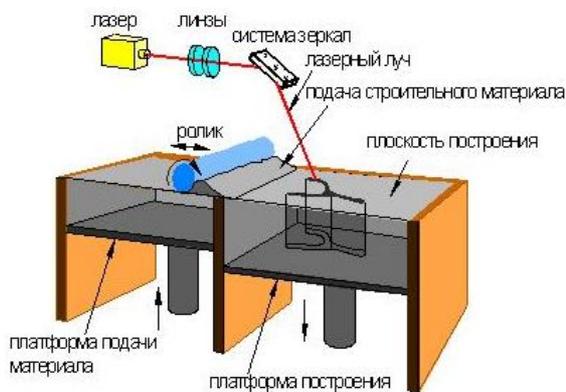
2.1. Виды технологий

2.1.1. Bed Deposition

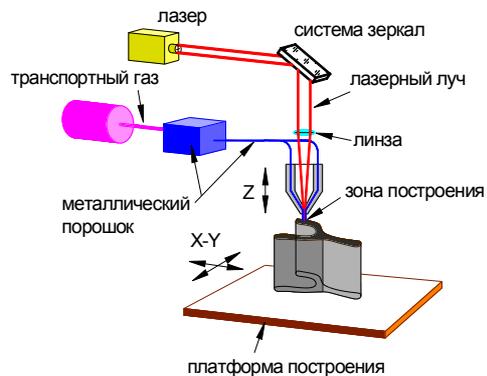
При использовании данной технологии (рисунок 2.1 а) сначала формируют слой, например, насыпают на поверхность рабочей платформы дозу порошкового материала и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», формируя ровный слой материала определенной толщины. Затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом, скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной CAD-модели.

Аддитивные технологии

Классификация: по методу формирования слоя



а – Bed Deposition



б – Direct Deposition



(Источник: www.ipmd.net)

Компании-производители машин (технологии)

а

3D Systems (SLS, SLA)
EOS (DMLS)
Envisiontec (DLP)
SLM Solutions (SLM)
Realizer (SLM)

ExOne (Ink-Jet)
Renishaw (SLM)
Voxeljet (Ink-Jet)
Concept Laser
(Laser CUSING)

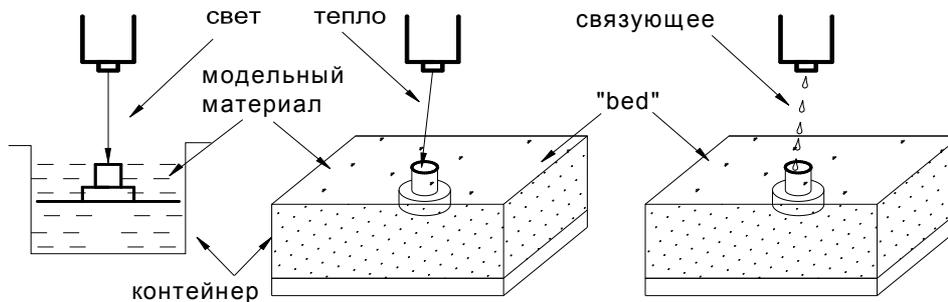
б

Optomec (LENS)
POM Group (DMD)
Trumpf (DLF)
Objet (Poly-Jet)
Stratasys (FDM, DoD)
3D Systems (MultiJet)

Рисунок 2.1. Методы формирования слоя при построении модели

Аддитивные технологии

Классификация: по методу фиксации слоя



а – фотополимеризация
«свет»

б – сплавление
«тепло»

в – склеивание
«связующее»

Компании-производители машин (технологии)

3D Systems (SLS)

Envisiontec (DLP)

Stratasys (Objet, Poly-Jet)

3D Systems (SLM)

EOS (DMLS)

SLM Solutions (SLM)

Optomec (DMD)

POM Group (DMD)

Trumpf (DMD)

Stratasys (FDM)

Arcam (EBM)

ExOne (Ink-Jet)

3D Systems (Ink-Jet)

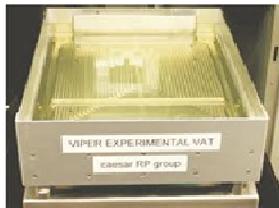
Voxeljet (Ink-Jet)

Рисунок 2.2. Методы фиксации (отверждения) материала в слое построения модели

Аддитивные технологии

Классификация: по типу строительных материалов

жидкие



Фотополимеры

акриловые (эпоксидные)

сыпучие



Полимеры

полиамид, полистирол
PMMA (polymethyl methacrylate)

Пески

кварцевые, циркониевые

Металлопорошки

Al, Cu, Ti-Al, Ti, Ag, Au

Co-Cr, Inconel, Ni-Fe

инструментальные стали

нитевидные,
прутковые



Полимеры

ABS-подобные

PU-подобные

Металлы

(feedstock в виде

прутка или

проволоки)

листовые,
плёночные



Полимеры

PВХ-пленки

Металлы

фольга

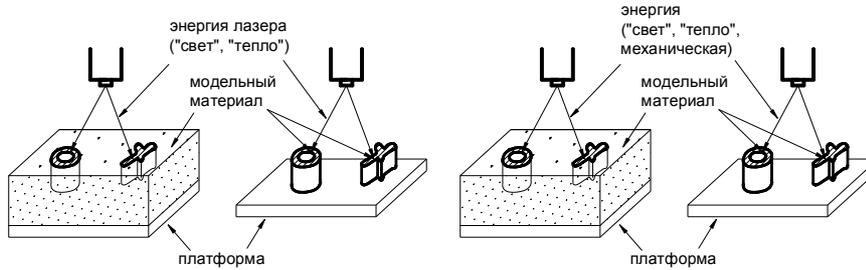
листовой прокат

Рисунок 2.3. Строительные (модельные) материалы

Аддитивные технологии
Классификация: по ключевой технологии

лазерные

нелазерные



а

б

в

г

Bed Deposition

Direct Deposition

Bed Deposition

Direct Deposition

а

б

в

г

жидкости

(SLA-технология)

сыпучие

(SLS-технология)

листовые

(LOM-технология)

сыпучие

(LENS-, DMD-технология)

нитевидные

(металл. проволока);
(Laser based wire-feed process)

жидкости

(DLP-технология)

сыпучие

(Ink-Jet-технология)

Листовые

(LOM-технология)

сыпучие

(Poly-Jet-, Ink-Jet-технология)

нитевидные

(FDM-технология)

Рисунок 2.4. Классификация по ключевой технологии

Эта технология, называемая в англоязычной традиции «Bed Deposition», предполагает наличие некоей 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.

Кроме SLS- и SLA-технологий, к Bed Deposition относят такие известные технологии, как:

- SLM – Selective Laser Melting (компания SLM Solutions, Германия);
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering (компания EOS, Германия);
- EBM – Electron Beam Melting (компания Arcam, Швеция);
- Laser Cusing (компания Concept Laser, Германия);
- SPLS – Solid Phase Laser Sintering (компания Phenix Systems, Франция, в настоящее время приобретена компанией 3D Systems);
- Ink-Jet или Binder Jetting (компании ExOne, 3D Systems, США) и др.

2.1.2. Direct Deposition

Термин на русский можно перевести как «прямое или непосредственное осаждение (материала)», т. е. направление энергии и осаждение материала в конкретную точку построения (рис. 2.2 а, 2.4).

Иными словами, в отличие от первого вида, здесь не формируется слой строительного материала на поверхности («bed») платформы, а материал подается в конкретное место, куда в данный момент времени под-

водится энергия и где идет процесс формирования детали. Подобно тому, как сварщик подводит электрод к месту, где за счет электрической дуги формируется зона расплава.

К технологии Direct Deposition, относят следующие технологии:

- DMD – Direct Metal Deposition (компания POM, США);
- LENS – Laser Engineered Net Shape (компания Optomec, США);
- DM – Direct Manufacturing (компания Sciaky, США);
- MJS – Multiphase Jet Solidification (компания Fraunhofer IFAM, Германия; FDM, США) и др.

2.2. Классификация ASTM

По классификации ASTM в версии 2012 г. аддитивные технологии разделены на 7 категорий:

1. Material Extrusion – «выдавливание материала» или послойное нанесение расплавленного строительного материала через экструдер;

2. Material Jetting – «разбрызгивание (строительного) материала» или послойное струйное нанесение строительного материала;

3. Binder Jetting – «разбрызгивание связующего» или послойное струйное нанесение связующего материала;

4. Sheet Lamination – «соединение листовых материалов» или послойное формирование изделия из листовых строительных материалов;

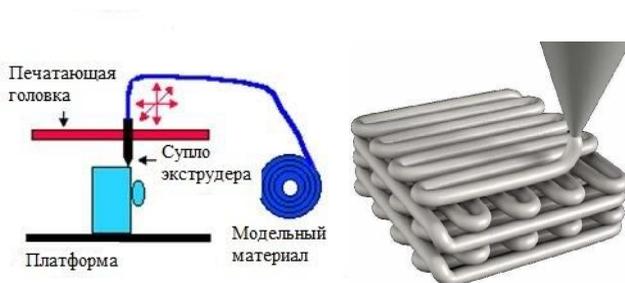
5. Vat Photopolymerization – «фотополимеризация в ванне» или послойное отверждение фотополимерных смол;

6. Powder Bed Fusion – «расплавление материала в заранее сформированном слое» или последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала;

7. Directed energy deposition – «прямой подвод энергии непосредственно в место построения» или послойное формирование изделия методом внесения строительного материала непосредственно в место подвода энергии.

К категории **Material Extrusion**, относится, например, технология MJS (Multiphase Jet Solidification), в соответствии с которой в место построения модели через подогреваемый экструдер выдавливается пастообразный строительный материал: смесь металлического порошка и связующего – пластификатора. Построенную таким образом грин-модель («green» – в значении «зеленая», незрелая, сырая) помещают в печь для удаления связующего и дальнейшего спекания [3], также как это делается в традиционных МИМ-технологиях (Metal Injection Molding).

К этой же категории относится и наиболее популярная технология FDM (Fused Deposition Modeling), реализуемая компанией Stratasys в многочисленных принтерах «любительского» и «профессионального» классов. Фидсток в виде полимерной нити подводят к экструдеру, где полимерную нить расплавляют и с её помощью формируют физическую модель в соответствии с конфигурацией сечения виртуальной CAD-модели, рисунок 2.5.



(Источники: www.additive3d.com, www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication)

Рисунок 2.5. Технология FDM

Принтеры, работающие по FDM-технологии, являются наиболее массовыми, выпускаются многими компаниями в количестве нескольких десятков тысяч в год, однако основное их применение ограничивается сферой образования, «домашнего» моделирования и развлечения. Стоимость таких принтеров колеблется от нескольких сот до \$1,5-2,0 тыс. Ряд компаний, например Stratasys и 3DP Unlimited, используя эту техноло-

гию, производят также и профессиональные, промышленные АМ-машины стоимостью от \$10 000 до \$500 000, рисунок 2.6.



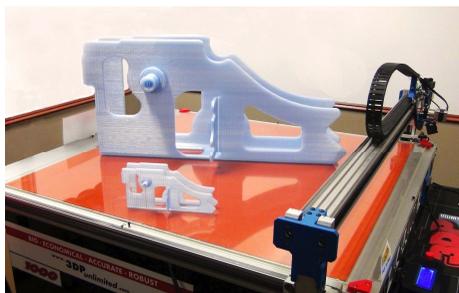
(Источник: www.stratasys.com)

Fortus 900 mc (Stratasys, США):

Зона построения:

XYZ=914x610x914 мм;

шаг построения 0,178-0,33 мм



(Источник: www.3dpunlimited.com)

3DP1000 (3DP Unlimited, США):

Зона построения:

XYZ=1000x1000x500 мм;

шаг построения 0,07 мм

Рисунок 2.6. АМ-машины, работающие по технологии FDM

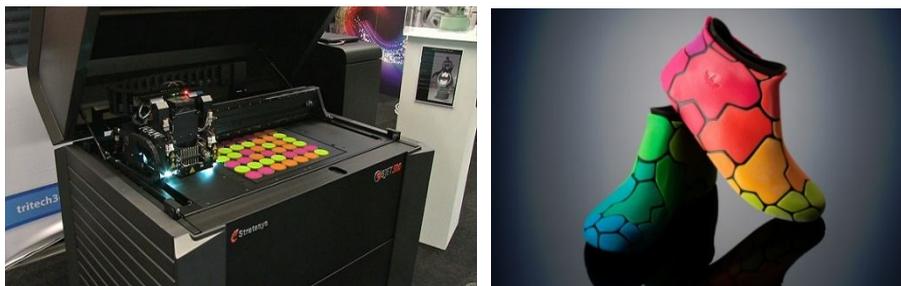
Примером технологии **Material Jetting** может быть технология Poly-Jet, согласно которой модельный материал – обычно фотополимер или воск, подается в зону построения через многоструйную головку. В технической литературе эту технологию иногда называют как Multi Jetting Material.

Эта технология применяется в принтерах Objet (Израиль), рисунок 2.7. Компания Objet Geometry с 2012 г. входит в состав компании Stratasys. Здесь используют два материала – строительный и поддерживающий, который предотвращает обрушение нависающих частей модели при построении. После построения поддерживающий материал смывают горячей водой. В качестве модельного материала используют фотополимерную смолу, которую подают в зону построения через многосопловую головку.



Рисунок 2.7. Технология MJM

Принтер Objet500 Connex3, рисунок 2.8, способен производить «цветную» печать, позволяет работать с тремя видами модельных материалов с различными свойствами, смешивать их в заданной пропорции во время построения модели и получать композитные модели в широкой цветовой гамме.



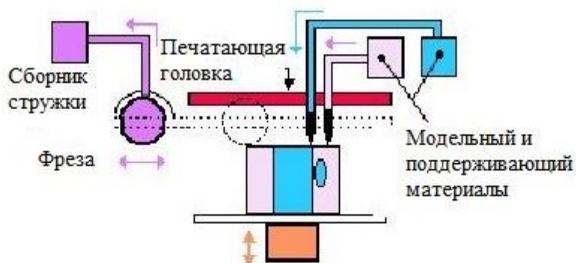
(Источник: <http://www.stratasys.com>)

Рисунок 2.8. Принтер Objet500 Connex3: зона построения XYZ=490 × 390 × 200 мм; шаг построения 0,016-0,030 мм

Другой разновидностью технологии Material Jetting является технология DoD (Drop-on-Demand), которую вывела на рынок компания Solidscapе (США), в 2011 г. приобретена компанией Stratasys, рисунок 2.9. Так же, как и в машинах Objet, здесь используют два материала: модельный – воск, который в расплавленном виде подают в зону построения; и

поддерживающий – который после построения модели смывают теплой водой. Принтер оснащен фрезерной головкой, с помощью которой производят «механообработку» построенного слоя, обеспечивая его необходимую высоту, удаляя излишки модельного и поддерживающего материалов. Эта технология, которую называют также WDM (Wax Deposition Modeling), применяется в ювелирной промышленности для выращивания восковых моделей (восковок) и последующего литья по выплавляемым моделям, а также в дентальной медицине, рисунок 2.10.

В машиностроении используется редко в связи с невысокой производительностью машины.



(Источник: http://www.additive3d.com/fdm_int.htm)

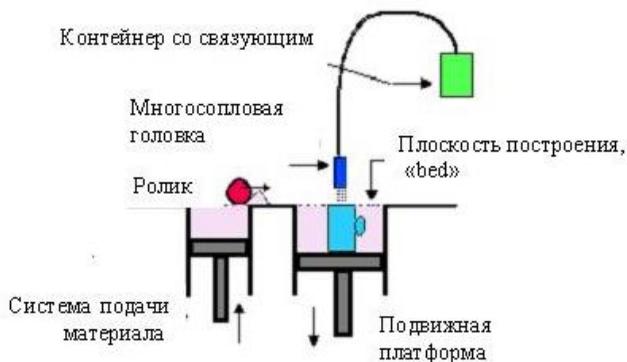
Рисунок 2.9. DoD-технология (Solidscapе)



(Источник: www.sculptcad.com/index.php/news/information/51)

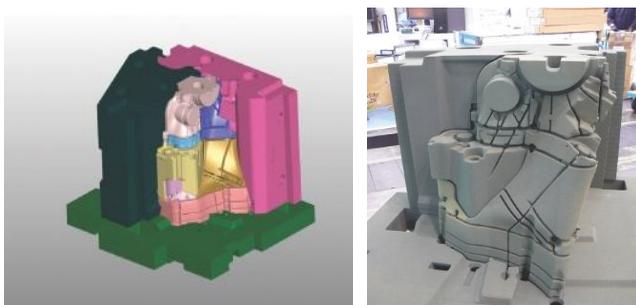
Рисунок 2.10. Принтер CrownWorx: зона построения XYZ=152,4x152,4x50,8 мм; толщина слоя 50 мкм. Технология WDM

К категории **Binder Jetting** относятся струйные технологии или Ink-Jet-технологии, в которых, в отличие от технологии Material Jetting, в зону построения впрыскивают не модельный материал, а связующий реагент, рисунок 2.11. Технология была разработана в Массачусетском технологическом институте и в настоящее время успешно используется в принтерах компаний ExOne, ZCorporation (ныне приобретена фирмой 3D Systems), VoxelJet, в частности, для получения литейных моделей и песчаных синтез-форм (рисунок. 2.12).



(Источник: http://www.additive3d.com/fdm_int.htm)

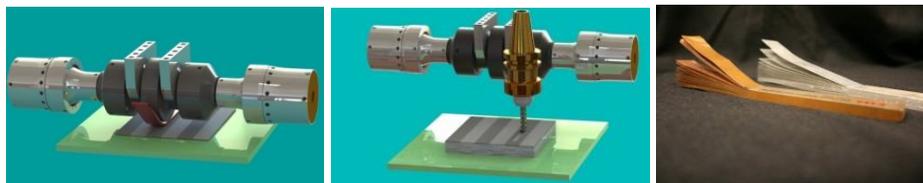
Рисунок 2.11. Технология Binder Jetting



(Предоставлено ExOne Corp.)

Рисунок 2.12. CAD-модель и песчаная литейная синтез-форма

К категории **Sheet Lamination** относят технологии, использующие в качестве строительного листового материал в виде полимерной пленки, металлической фольги, листов бумаги и т. д. Примером может быть технология UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing, Fabrisonic), сущность которой заключается в том, что тонкие металлические пластины сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием (рисунок 2.13). Эта технология представляет собой сочетание аддитивной и «субтрактивной» технологий.



(Источник: www.fabrisonic.com)

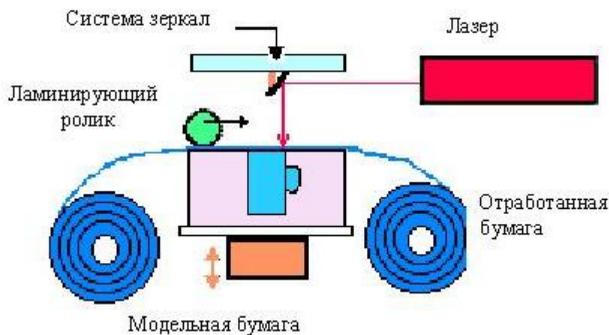
а

б

в

Рисунок 2.13. UAM-технология: а – ультразвуковая сварка; б– фрезерование; в – модельная лента

LOM -технология (Laminated Object Manufacturing), рисунок 2.14, одна из первых аддитивных технологий, которая стала применяться в промышленности для изготовления модельной оснастки.



(Источник: www.additive3d.com/fdm_int.htm)

Рисунок 2.14. LOM-технология

В качестве модельного материала используют специальную бумагу с полимерным покрытием. В процессе построения модели бумагу слойно укладывают на платформу, и каждый слой сплавляют (ламинируют) с предыдущим посредством нагретого ролика. Лазерный луч «обрисовывает» контур сечения САД-модели и таким образом прожигает слой бумаги, отделяя слой модели от остальной части бумажного листа. Одновременно на оставшейся части листа формируются надрезы, которые позволяют легко отделить построенную модель от ламинированного массива.

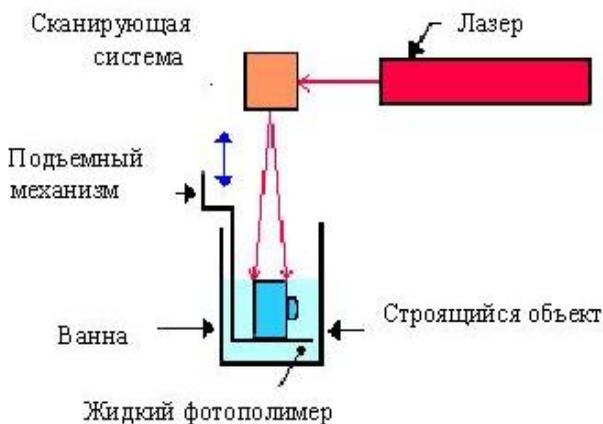
В машинах Mcor (Ирландия) и Kira (Япония) в качестве строительного материала используют бумагу и клей, а вместо лазера – нож с остро заточенным лезвием с износостойким покрытием. Принтер Mcor Iris, рисунок 2.15, оснащен цветными картриджами, что делает его настоящим цветным 3D-принтером. Стоимость около \$50 тыс. (версия Matrix 300+ без цветной печати – около \$35 тыс.).



(Источник: www.3d-p.info/3d-printer-mcor-iris)

Рисунок 2.15. Технология Sheet Lamination. Принтер Mcor Iris: зона построения XYZ=256x169x150 мм; толщина слоя 0,1 мм

К категории **Vat Photopolymerization** относят технологии, в которых используют жидкие модельные материалы – фотополимерные смолы, например, SLA-технология (3D Systems), рисунок 2.16, и DLP-технология (Digital Light Procession, Envisiontec).



(Источник: http://www.additive3d.com/fdm_int.htm)

Рисунок 2.16. Технология SLA – лазерная стереолитография

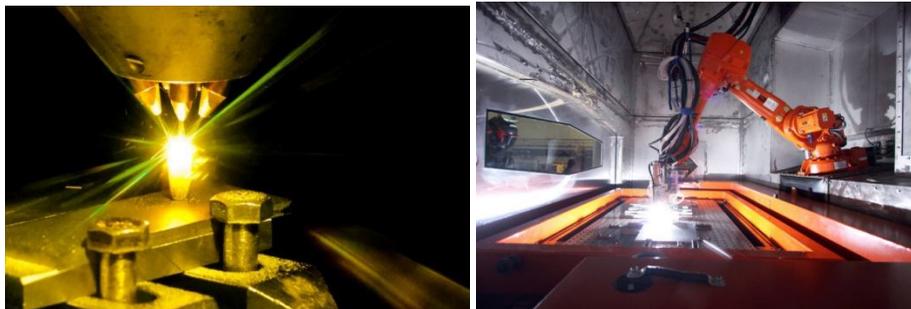
В категорию **Powder Bed Fusion** входит многочисленная группа SLS-технологий, в которых в качестве источника тепла применяется лазер (см. выше рисунок 2.1 а). К этой же категории относят такие технологии, как Arcam-технология, использующая электронный луч, и технология SHS (Selective Heat Sintering [Blueprinter]), в которой источником тепла являются ТЭНы.

В категорию **Directed energy deposition** входят технологии, согласно которым строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно к месту построения изделия (см. выше рисунок 2.1 б). Эти технологии предполагают применение машин, оснащенных системами подвода модельного (строительного) материала и энергии – обычно в виде сфокусированного лазерного излучения (Optomes, POM) или электронного луча (Sciaky). В ряде случаев рабочий механизм – головку устанавливают на роботизированной «руке», рисунок 2.17.

В машиностроительных отраслях наиболее распространенными АМ-технологиями являются:

- SLA, Stereolithography Apparatus – отверждение слоя фотополимера посредством лазерного луча;

- SLS, Selective Laser Sintering – послойное лазерное спекание порошковых материалов, в частности полимеров;
- DMF, Direct Metal Fabrication – разновидность SLS-технологии, послойное лазерное спекание металлопорошковых композиций; иногда также называют DMLS, Direct Metal Laser Sintering;
- SLM, Selective Laser Melting – разновидность SLS-технологии, послойное лазерное плавление металлопорошковых композиций;
- DLP, Digital Light Procession – засветка слоя фотополимера с помощью цифрового прожектора;
- Poly-Jet – нанесение слоя фотополимера через многосопловую головку и его отверждение посредством засветки ультрафиолетовой лампы;
- FDM, Fused Deposition Modeling – послойное наложение расплавляемых нитевидных полимеров;
- Ink-Jet – отверждение слоя порошкового материала путем нанесения связующего состава через многосопловую головку (по типу струйного 3D-принтера).



(Источник: <http://www.tu.no/industri/2012/08/21/>)

Рисунок 2.17. Технологии Directed Energy Deposition

Используют и другие технологии, но наиболее популярны технологии SLA и SLS (и их разновидности), как технологии, дающие наилучшую точность и имеющие разнообразные сферы применения.

ГЛАВА 3. Характеристика рынка АМ-технологий

3.1. Статистические данные

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-рынок* 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 2018 г. рынок увеличится не менее чем в 4 раза.

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 обработку 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 рынок достаточно сложен для АМ-технологий по сравнению с рынком моделей и прототипов. По мере развития, рост в секторе АМ-технологий 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 Амери-

*АМ-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

ки были и остаются крупнейшим потребителем АМ-технологий. Около 40% от общего числа проданных машин приходится на США (рисунок 3.1), 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.

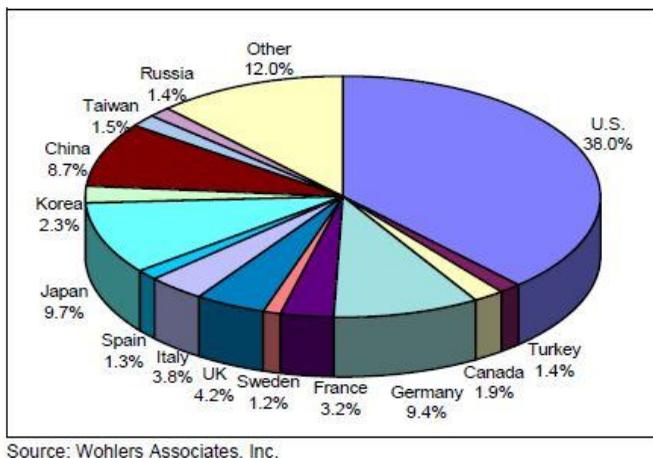
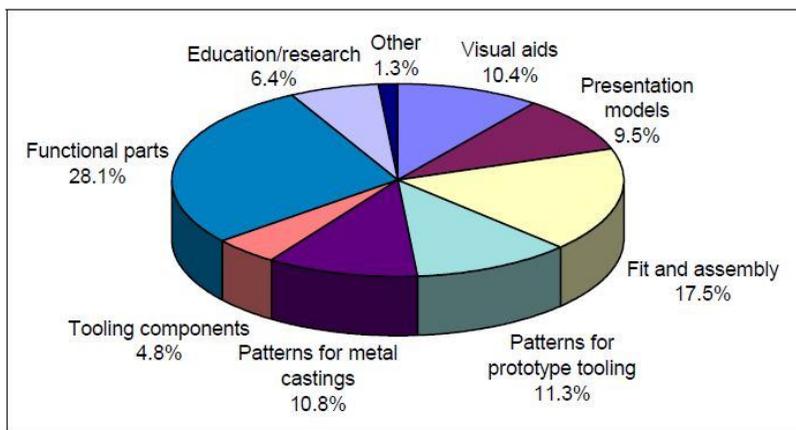


Рисунок 3.1. Распределение инсталляций АМ-машин по странам мира

В каких целях используют аддитивные технологии? На рисунке 3.2 приведена диаграмма распределения целевых задач АМ-технологий по результатам анализа рынка за 2012 г. (опубликовано в 2013 г.). Отрасли, в которых наиболее заметно использование АМ-технологий, показаны на рисунке 3.3.

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%, рисунок 3.4. 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.).



Source: Wohlers Report 2013

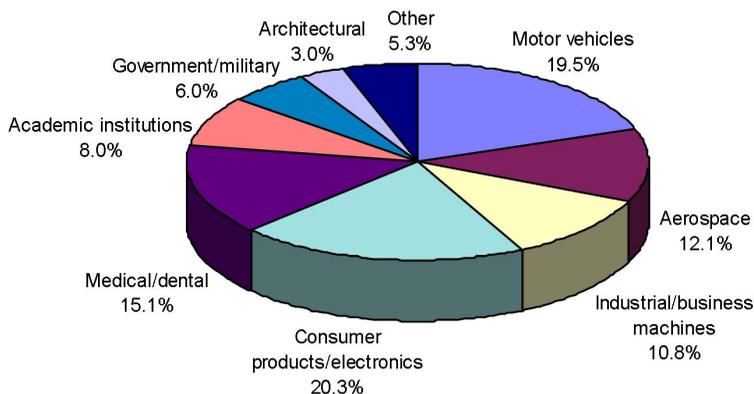
- визуализация – 10,4% (16,8% в 2004 г.);
- презентационные модели – 9,5% (то же в 2004 г.);
- контрольные сборки – 17,5% (11,4% в 2004 г.);
- конечное изделие – 19,2% (8,2% в 2004 г.);
- мастер-модели для изготовления оснастки для производства прототипов – 11,3% (10,6% в 2004 г.);
- мастер-модели для литья металлов – 10,8% (8,1% в 2004 г.);
- компоненты инструментальной оснастки – 4,8% (6,9% в 2004 г.);
- функциональные детали – 28,1% (16,4% в 2004 г.);
- в обучении и исследованиях – 6,4%;
- другое – 1,3%.

Рисунок 3.2. Сферы применения АМ-технологий

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% (рис. 3.5) и достигло 348 единиц (в 2012 г – 198 единиц).



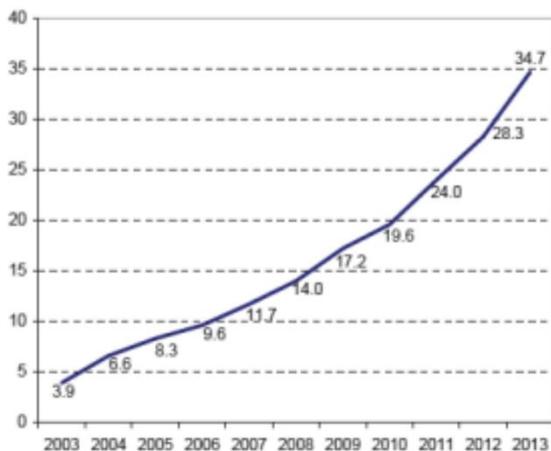
(Источник: Wohlers Report 2012)

- автостроение – 19,5% (19,4% в 2004 г.);
- аэрокосмическая отрасль – 12,1% (8,3% в 2004 г.; 9,9% в 2010 г.);
- промышленное машиностроение – 10,8 (6,8% в 2004 г.);
- потребительские товары и электроника – 20,3% (27,7% в 2004 г.);
- медицина (в частности, стоматология) – 15,1% (13,0% в 2004 г.);
- академические институты – 8,0% (10,4% в 2004 г.);
- госпрограммы по военной технике – 6,0% (то же в 2004 г.);
- архитектура – 3,0%;
- другое – 5,2%.

Рисунок 3.3. Распределение бизнеса АМ-технологий по отраслям

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*.



(Источник: Wohlers Report, 2014)

Рисунок 3.4. Динамика роста сектора «Direct manufacturing» (процент выручки за изготовление конечных деталей от общего объема рынка)

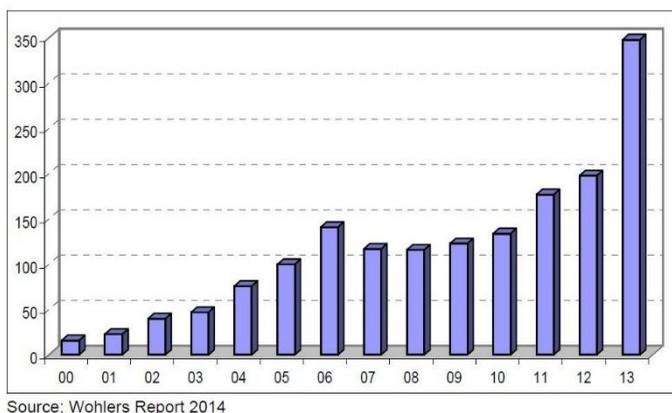


Рисунок 3.5. Положительная динамика роста продаж машин для «выращивания» из металла

По сообщениям представителей компании Boeing, компания планирует производить новый беспилотный самолет практически полностью по AM-технологиям. В 2014 г. специалисты Шеффилдского университета

(University of Sheffield) продемонстрировали свою версию беспилотного самолета, построенного по технологии FDM, рисунок 3.6.



(Источник: www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffield-trials-3d-printed-unmanned-aircraft/)

Рисунок 3.6. Беспилотный ЛА, 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 трёх 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 «солдатики» 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 краудфандинговый* проект предлагает настольные принтеры с рабочей зоной XYZ=150x100x125 мм за \$149, рисунок 3.7.

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 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

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

компании из «потребительского» сектора и выпускают на рынок разнообразные модели настольных принтеров, рисунок 3.8.



(Источник: www.newmatter.com)

Рисунок 3.7. Принтер MOD-t

Формально последние несколько лет прирост мирового парка 3D-принтеров исчисляется в сотнях процентов. Однако надо понимать, что этот рост обусловлен любопытством людей и хорошей рекламой. Проект RepRap - Replicating Rapid-prototype: «Родитель» сделал «ребенка», (рисунок 3.9) – такие рекламные трюки действительно привлекают публику, несмотря на то, что далеко не всё в «ребенке» сделал «родитель», но кое-что всё-таки сделал.

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.



MakerBot (Stratasys, США) – € 2500
XYZ=127x 127x127 мм;
толщина слоя 0,178 мм

Da Vinci 1.0 Ai03D+3D-сканер,
(XYZprinting, США) – \$799
XYZ=200x190x200 мм;
толщина слоя 0,1 мм



Принтер Cube (3D Systems) – €1099
XYZ=152x152x152 мм;
толщина слоя 0,07 мм

Принтер Mojo (Stratasys) – \$6540
XYZ=127x 127x127 мм;
толщина слоя 0,178 мм

Рисунок 3.8. Настольные принтеры «любительского» класса

«Профессиональные» принтеры – это относительно дорогие АМ-машины, способные решать задачи расширенного воспроизводства. Они отличаются (от «любительских»), большей зоной построения, производи-

тельностью, 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.

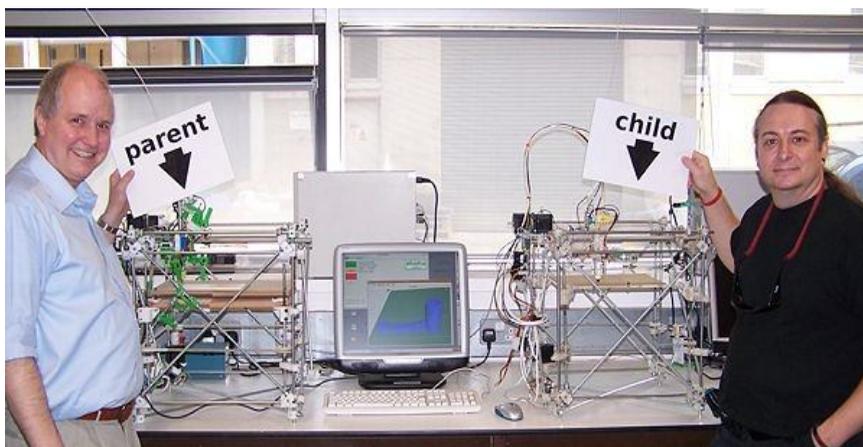


Рисунок 3.9. Проект RepRap

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, об этом говорят и данные диаграммы на рисунке 3.1. Отдельные ведущие отечественные предприятия авиационной, автомобильной промышленности, энергетики и 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.

3.2. Критерии выбора технологий

Число производителей индустриальных АМ-машин изменяется от года к году (в частности, из-за слияний и разделений), но примерно находится на уровне 30. Основные производители этих АМ-машин, авторитетные компании с длительной историей работы на рынке, а именно:

- 3D Systems, США (SLA, SLS и др. типы машин);
- EOS, Германия (SLS и DMLS);
- SLM Solutions, Германия (SLM);
- Stratasys, США (FDM);
- Objet Geometries, Израиль (Poli-Jet), в 2012 г. вошла в компанию Stratasys;
- Envisiontec, США–Германия (DLP);
- ExOne, США (Ink-Jet);
- Voxeljet, Германия (Ink-Jet).

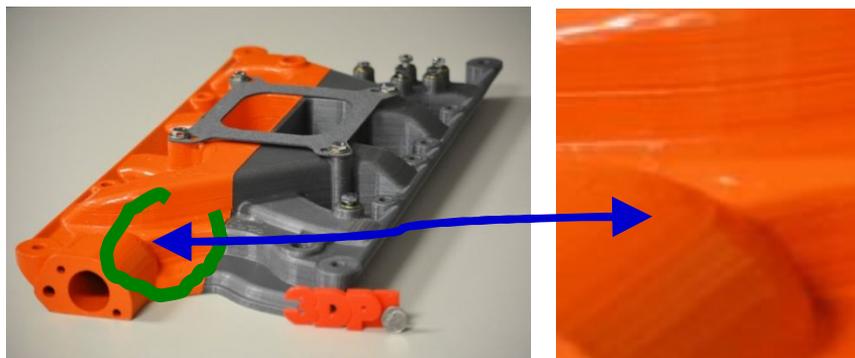
К указанным грандам АМ-технологий следует добавить около 200 стартап-компаний, которые в основной своей массе пытаются выйти на рынок потребительских товаров, справедливо полагая, что рынок индустриальных машин для них закрыт в силу высокой конкуренции и высоких начальных затрат на проведение НИР и ОКР. Кроме того, основные технологии надежно защищены патентами.

Выбор АМ-технологий осуществляют, исходя из оценки следующих критериев:

- стоимость приобретения;
- производительность;
- качество поверхности модели;
- степень детализации (способность построить мелкие фрагменты);
- точность построения;
- трудоемкость пост-обработки;
- стабильность модельного материала;
- срок службы машины (принтера) до замены основных узлов;
- стоимость модельных (строительных и вспомогательных) материалов;
- надежность и сроки поставки расходных материалов и запасных частей;
- развитость службы технической поддержки в регионе;
- стоимость текущего технического обслуживания машины;
- стоимость сервисного контракта (в пост-гарантийный период);
- надежность и долговечность машины;
- время жизни основных узлов до замены или капремонта;
- требуемая квалификация и, соответственно, стоимость обслуживающего персонала, а также требуемая площадь инсталляции и инженерная инфраструктура.

В зависимости от конкретной ситуации каждый из данных критериев имеет разную значимость. Например, для литейного производства, для которого аддитивная машина встроена в начало технологического процесса – изготовление литейной или мастер-модели, чистота поверхности модели имеет принципиально важное значение. И, например, машина 3DP1000, см. выше рисунок 1.6, которая прекрасно подошла бы для решения задач визуализации конструкторской идеи или изготовления выставочного макета, вряд ли оказалась бы пригодной для создания мастер-моделей: устранение шероховатости, рисунок 3.10, характерно FDM-технологии, но потребует больших трудозатрат и может привести к потере точности.

Удачный выбор AM-технологии и AM-машины – это почти всегда компромисс между качеством модели, стоимостью AM-машины и ценой владения AM-технологией.



(Источник: www.3dpunlimited.com)

Рисунок 3.10. Качество поверхности модели – один из критериев выбора AM-технологии

ГЛАВА 4. Аддитивные технологии и быстрое прототипирование

Задача быстрого прототипирования, т. е. получения прототипа изделия в максимально короткие сроки, остается одной из основных задач практического применения АМ-технологий. В данном случае понятие «прототип» довольно широкое. На этапе выполнения научно-исследовательской работы необходимо быстро получить прообраз изделия. На этом этапе важны отработка геометрии детали, оценка эргономических качеств, проверка собираемости и правильность компоновочных решений. Поэтому «быстрое» изготовление детали по «обходной технологии» позволяет существенно сократить сроки разработки изделия. Под прототипом понимают и модель, иногда масштабную, предназначенную для каких-либо испытаний (например, гидро- или аэродинамических) или предварительной проверки функциональности (например, корпусные детали приборов, радиостанций, медицинской или бытовой техники). Большое количество прототипов строится, как поисковые дизайнерские модели с различными нюансами в конфигурации, цветовой гамме раскраски и т. д.

Обычно процесс создания новой продукции от замысла до точки SOP (Start of Production) имеет итерационный характер и предполагает создание прототипов или опытных образцов нескольких серий «А», «Б», «В» и более, в зависимости от сложности объекта разработки. На завершающей стадии (предсерийные) образцы изделия, как правило, изготавливаются с использованием специальной оснастки, разработанной для условий промышленного производства. Однако для ранних стадий разработки серий «А», «Б», когда образ изделия не определен окончательно, использование дорогостоящей оснастки чрезвычайно затратно. Как правило, в процессе испытаний и доводки конфигурация изделия претерпевает значительные изменения, и оснастка, изготовленная для производства прототипов, оказывается непригодной для серийного производства. Одно из важнейших преимуществ использования АМ-технологий состоит в том, что они позволяют получать функциональные прототипы

(опытные образцы), без применения дорогостоящей технологической оснастки. Например, блок цилиндров ДВС, вполне пригодный для проведения полноценных моторных испытаний, может быть выполнен методом быстрого прототипирования, без изготовления деревянных или металлических моделей и форм. Полноценная литейная оснастка изготавливается уже после завершения испытаний, корректировки конструкторской документации и тщательной технологической подготовки. И если вопрос о применении аддитивных технологий в промышленном производстве остается дискуссионным, то в отношении НИР и ОКР они уже доказали свою очень высокую эффективность.

AM-технологии в качестве технологий «быстрого прототипирования» применяют главным образом на начальной стадии проектов – для воспроизведения геометрического образа изделия. На этой стадии обычно пренебрегают фактурой поверхности, прочностными и другими свойствами материала, выбирая из доступных модельных материалов наиболее подходящий для целей визуализации. Иногда свойства модельного позволяют провести и функциональные испытания прототипа. По мере расширения ассортимента модельных материалов увеличивается и сектор функционального моделирования (см. выше рисунок 3.2): в 2004 г. его объем составлял 16,4 %, в 2013 – 28,1%.

Для целей прототипирования чаще всего применяют недорогие 3D-принтеры. Разнообразие технологий позволяет выбрать наиболее эффективное решение с точки зрения баланса «цена – качество», чему способствовало существенное снижение цен на принтеры среднего уровня и расходные материалы при одновременном повышении надежности машин и качества «выращенных» изделий.

Среди фирм-производителей наиболее популярных принтеров для прототипирования следует назвать такие фирмы, как:

- Stratasys – принтеры серий Mojo 3D, Print SE, Dimension, в которых применена технология FDM, а также принтеры, работающие по технологии Poly-Jet или MJM – Objet24, Objet30, Objet Eden, Objet Connex, Objet260;

- 3D Systems – принтеры ProJet® 360, ProJet® 4500, ProJet® 460Plus, ProJet® 660Pro, ProJet® 860Pro, в которых применяется технология Binder Jetting с нанесением отверждающего состава на порошковый модельный материал;
- Envisiontec, принтеры серии Ultra и др.

Данные принтеры среднего уровня, стоимостью в пределах 20 -100 тыс. евро, и находят применение в образовании, в работе архитектурных бюро и модельных мастерских, в стоматологической медицине, при выполнении многих задач НИОКР, в опытном производстве в целом.

Для изготовления крупногабаритных моделей и моделей с повышенными требованиями к качеству поверхности и прочности используют более дорогие АМ-технологии (SLA, SLS) и профессиональные машины стоимостью €150-900 тыс. и более.

Как и любая АМ-технология, предполагающая послойный принцип построения детали, технологии FDM, SLA, SLS или Poly-Jet обеспечивают определенный уровень качества поверхности модели, основным критерием обычно является чистота поверхности. Машина строит модель послойно согласно созданным перед началом построения «сечениям». После завершения построения модель имеет ступенчатую поверхность, а высота ступеньки соответствует шагу построения. Например, при построении модели шара: на полюсе он будет иметь плоскую площадку, шероховатость на участке, близком к полюсу будет максимальной, но, чем ближе к экватору, тем лучше будет качество поверхности, рисунок 4.1.

Качество поверхности прототипа часто зависит от ориентации модели на рабочей платформе при построении. При построении плоской детали, расположив её горизонтально, можно получить низкую шероховатость горизонтальной поверхности; для получения лучшего качества на боковых поверхностях модель необходимо сориентировать под углом к плоскости платформы.

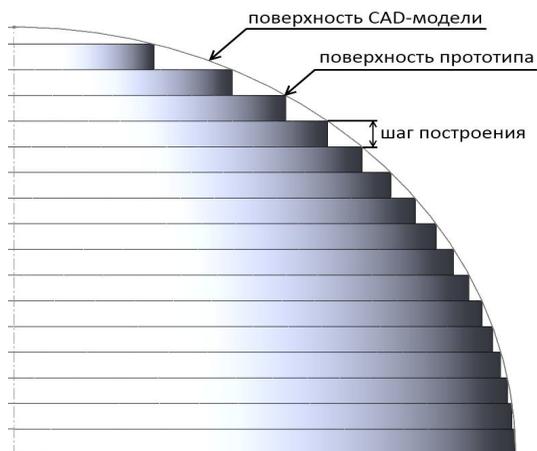


Рисунок 4.1. Послойный принцип построения модели

Важным параметром, определяющим качество поверхности, является качество исходной трёхмерной CAD-модели. Виртуальная модель представляет собой 3D-поверхность в виде замкнутой сетки из треугольников. Шероховатость поверхности напрямую зависит от качества создания сетки, рисунок 4.2. Так, при использовании трёхмерной модели низкого качества макрошероховатость, заложенная в файле, может проявиться при построении физической модели и дать ложное представление о качестве принтера или эффективности выбранной технологии, рисунок 4.3.

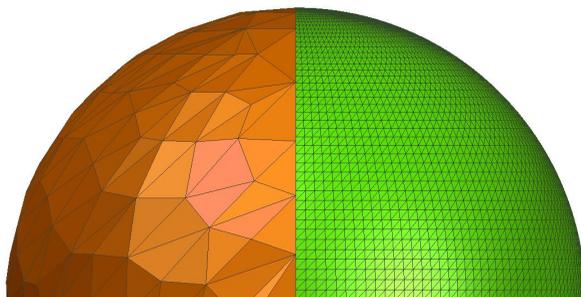
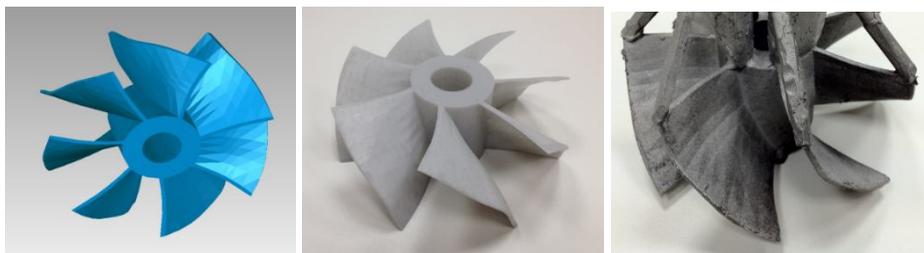


Рисунок 4.2. Модель шара: слева – низкого качества, справа – высокого



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

CAD-модель

SLA-модель

Отливка, сталь

Рисунок 4.3. Низкое качество CAD-модели обуславливает низкое качество поверхности отливки

На сайтах компаний-производителей АМ-машин можно обнаружить большое количество разнообразных примеров выполнения конкретных проектов. Обычно там «вывешивают» наиболее удачные и привлекательные примеры. Но если более внимательно присмотреться к этим иллюстрациям, то на поверхности модели можно обнаружить своеобразную текстуру, по которой можно составить себе представление об ожидаемой чистоте поверхности модели, рисунки 4.4, 4.5. Во многих случаях большая или меньшая шероховатость не имеет принципиального значения для потребителя. При необходимости поверхность модели можно улучшить посредством ручной обработки (шлифовки, полировки, окраски, лакировки).

Но в ряде случаев это технически затруднительно или может привести к потере точности (геометрии) модели. Как правило, чем меньше шероховатость поверхности модели, тем выше цена АМ-машины.

Технологии SLS, DLP, Poly-Jet и др., использующие жидкий фотополимер в качестве модельного материала, предполагают наличие так называемых поддерживающих структур – поддержек, на которых закрепляется тело модели при построении (рисунок 4.6). Эти поддержки строятся автоматически по специальной программе и представляют собой тонкие столбики. В зависимости от технологии они строятся из специального легкорастворимого в воде материала (по технологии Poly-Jet компании Objet) или из основного модельного материала (классическая лазерная стереолитография – SLA). После построения поддержки удаля-

ются механически (SLA) или смываются водой (технология Poly-Jet), поэтому одна из поверхностей модели более шероховатая, чем остальные. Качество построенной модели зависит также и от квалификации персонала: насколько правильно была сориентирована модель на рабочей платформе перед построением, насколько верно был выбран режим генерации поддерживающих структур, насколько качественно был сделан исходный 3D-файл.

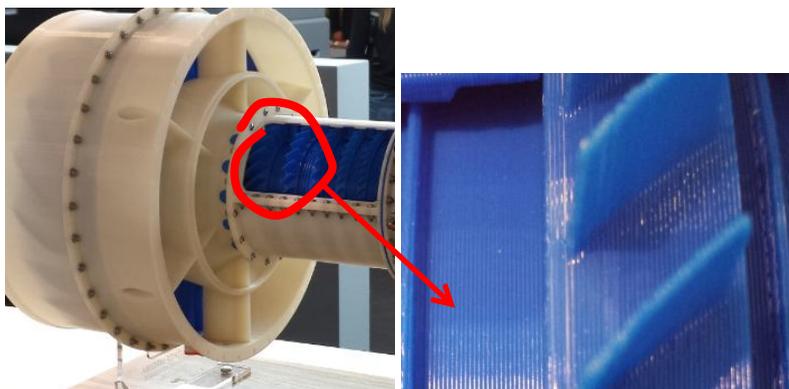


(Источники: www.3d-format.ru, www.ajax-mach.co.uk/3D_printers.htm)

а

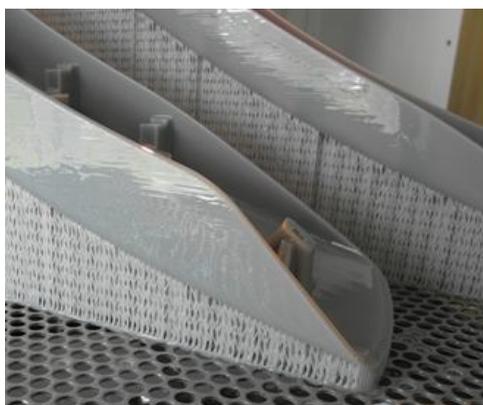
б

Рисунок 4.4. Прототипы, созданные на принтерах Eden 250 и ProJet® 660
а – Прототип пульта (Objet Eden 250)
б – Модель сборочного узла (ProJet® 660)



(Экспонаты выставки Euromold 2014)

Рисунок 4.5. Фрагмент модели газотурбинного двигателя
(технология FDM)



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 4.6. SLA-модель с поддерживающими структурами

В качестве примера в таблице 4.1 приведены результаты сравнительных измерений поверхностей одной и той же детали, построенной на разных машинах. Для большей достоверности измерения проводились на горизонтальных (тип А) и вертикальных (тип В) поверхностях. Измерения только одного вида поверхности может привести к неверному представлению о возможностях машины, поскольку, например, машина, работающая с жидким фотополимером, может построить очень гладкую,

почти зеркальную горизонтальную плоскость, но на вертикальной стенке может быть заметная шероховатость.

Таблица 4.1. - Сравнение шероховатостей моделей, полученных различными АМ-технологиями

Технология	AF-машина	Материал	Профилометр							
			Mahr MarSurf PS1				Zeiss O-inspect 01-422			
			R _a		R _z		R _a		R _z	
			Тип А	Тип В	Тип А	Тип В	Тип А	Тип В	Тип А	Тип В
SLA	Viper Pro 8000	AccuraXtreme	0,08	3,18	0,31	18,5	0,03	3,8	0,54	7,02
		Accura 60	0,13	2,82	0,66	13,9	0,19	2,4	0,5	4,42
		Accura 55	0,1	1,35	0,63	13	0,15	0,4	0,42	4,14
		Accura SI10	1,32	5,17	9,7	7,9	1,93	4,4	7,4	23,2
SLS	Sinterstation HiQ	Dura form PA	10	12,47	50,6	61,7	4,24	7,55	17,1	41,1
		Duraform GF	10,39	9,46	67	51,6	6,36	6,51	30,3	22,7
SLM	SLM 280	AlSi10 Mg	8,12	8,63	43,3	39,1	10,76	3,55	39,2	14,2
DLP	Ultra	SI500	0,53	0,55	3,87	2,26	1,44	1,36	5,4	6,6
Poly Jet	Eden 250	Durus White	0,89	3,98	3,68	17,8	2,41	6,18	8,5	29,3
		Tango Gray	0,22	1,3	1,08	7,9	1	1,02	16,6	11,7
		Full Cure 720	1,39	2	6,76	11,3	2,01	3,06	6,2	13,4
		Vero Blue	1,82	1,94	6,61	9,42	2,2	2,39	12,9	13,3
		Tango Plus*	2,18	2,81	15	18,3	2,36	6,61	9,4	23,9
		Vero Black	1,17	2,64	5,02	14,1	1,8	4,91	8,2	20,8
		Vero Gray	0,9	2,36	4,03	10,9	2,28	5,26	16,8	18,1
		Tango Black	1,18	3,14	7,79	18,1	2,55	8,62	6,8	36,4
		Vero White	1,39	4,33	7,75	23,3	0,62	8,46	5,2	43
Tango Black*	1,54	2,11	1,34	12,1	0,69	6,93	0,9	45,5		
Ink-Jet	Invision XT	Visi Jet EX200	2,55	9,38	11,9	46,1	0,91	6,12	3,7	19,5
LOM	SD300	PVC	0,06	5,25	0,52	24,9	0,06	5,25	0,41	4,14

Из приведенных данных, очевидно, что и внутри отдельной технологии могут быть существенные нюансы в оценке шероховатости, связанные с типом модельного материала (его качеством и, соответственно, ценой!). Видно также, что технологии, базирующиеся на использовании

жидких фотополимеров (SLA, DLP, Poly-Jet), позволяют получить более гладкие поверхности по сравнению с SLS- или FDM-технологиями.

То же касается и точности: чем выше точность построения, тем дороже 3D-принтер. По этому параметру AM-машины имеют значительные отличия. При рассмотрении технических характеристик принтеров, безусловно, следует обращать внимание на параметр, называемый *layers thickness* – толщина слоя построения, или шаг построения.

На точность влияет ряд параметров, и шаг построения является не единственным и, зачастую, не главным. Заявляемый шаг построения, например, 0,08 мм для SLS-машины 3D Systems вовсе не означает, что модель размерами 250x250x250 мм будет построена с отклонениями по осям измерений $\pm 0,08$ мм. Скорее всего, отклонения будут находиться в пределах нескольких десятых долей миллиметра ($\pm 0,3 \dots 0,8$ мм). На конечный результат будет сильно влиять тип материала (полиамид, полистирол) и в ещё большей степени – конфигурация модели, а также квалификация персонала: правильно ли выбраны режимы спекания, ориентация моделей в объеме построения, расположение моделей относительно друг друга и т. д. При этом нужно помнить, что SLS – это тепловой процесс, в ходе которого в рабочую камеру подводится значительное количество тепла, температура массива в камере достигает 150°C. Естественно, что строящаяся модель подвергается существенным тепловым нагрузкам и может деформироваться.

Данный эффект может быть усилен или ослаблен действиями персонала как на стадии подготовки задания на построение, так и в процессе работы машины и извлечения моделей из камеры. Неверные действия могут привести к короблению модели, и формальная точность, выраженная понятием *layers thickness*, не будет иметь никакого значения: отклонения от исходной геометрии могут составлять миллиметры.

Другие технологии также имеют свои особенности, например, разную реальную точность построения по осям: в плоскости X-Y одно значение, в направлении Z – другое. Поэтому при выборе технологии и 3D-принтера не лишним будет построить тестовые модели на разных

АМ-машинах, провести измерения и оценить, соответствуют ли результаты ожидания заказчика и требованиям к модели для конкретных задач. Тем не менее, общепринятым можно считать мнение, что наилучшая точность построения достигается в SLA-машинах. Одной из причин этого является то, что в SLA-технологии процесс построения происходит при комнатной температуре в отсутствии термических нагрузок. Большое значение имеет также качество модельных материалов. Современные SLA-материалы, во-первых, малоусадочные и, во-вторых, имеют определенную вязкость, позволяющую получать стабильно в процессе построения тонкие слои до 0,025 мм. Реальная точность построения SLA-машин составляет 0,025...0,05 мм на дюйм линейного размера. Это значит, что модель с характерным размером 250 мм будет, иметь отклонения в пределах $\pm 0,25 \dots 0,5$ мм. Однако эти отклонения могут быть существенно уменьшены за счет введения соответствующих корректировочных коэффициентов на стадии подготовки задания на построение, и следующая модель может быть построена значительно точнее, правда, в этом случае первая модель будет в качестве тестовой.

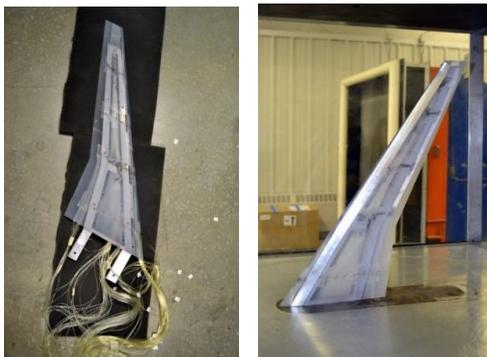
Ещё одним направлением «быстрого прототипирования» является изготовление «быстрой оснастки» – «rapid tooling». В некоторых случаях «быструю оснастку» применяют на предсерийной стадии проекта для изготовления деталей не из модельных материалов, а из промышленных пластиков. Либо для изготовления заведомо штучной или малосерийной продукции – 10-100 шт. Пример такой оснастки приведен на рисунке 4.7. Литейную форму (матрицу и пуансон) «выращивают» на 3D-принтере, доводят чистоту поверхности формы вручную, устанавливают на термопласт-автомат и получают конечное изделие.



(Источник: www.stratasys.com)

Рисунок 4.7. Оснастка (вставки) для получения отливок из полиамида на термопласт-автомате (изготовлено на принтере Objet500 Connex)

АМ-технологии применяют и для прототипирования некоторых функциональных характеристик изделия – оптических, прочностных, гидро- и аэродинамических. Например, стереолитографические модели широко используются для продувки макетов летательных аппаратов или полноразмерных моделей и их отдельных элементов (рисунок 4.8).

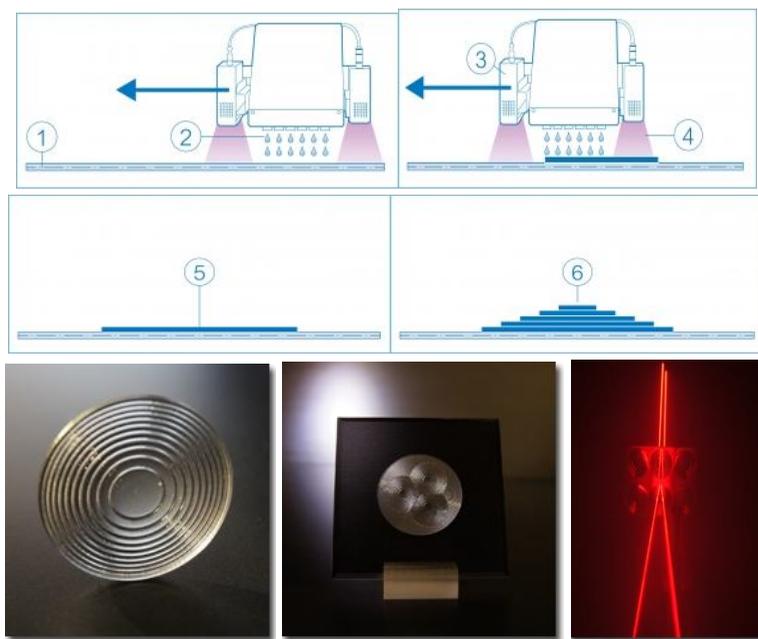


(Источник: www.icing.ae.illinois.edu/3D_wing.html)

Рисунок 4.8. Испытания элементов самолета в аэродинамической трубе

Компания LUXeXceL (Нидерланды) разработала технологию и оборудование для моделирования оптических изделий (линз, призм и т. д.).

Сущность технологии, называемой *Printoptical*, заключается в следующем (рисунок 4.9): на глянцевую поликарбонатную подложку (1) с помощью струйной головки (3) послойно наносится фотополимер (2), который отверждается УФ-лампой (4). Размер капель фотополимерных «чернил» варьируется в зависимости от дизайна модели. Разрешение печати высокое, практически такое же, как и в обычных 2D-струйных принтерах. Ключевым элементом технологии является печатающая головка с пьезоэлектрическим управлением, обеспечивающая разрешение на уровне 1440 dpi и выше. Материал наносится в виде мелких сферических капель, но отверждается УФ-лампой с некоторой экспозицией, позволяя капле растечься за счет смачивания, в результате этого поверхность модели получается гладкой и не требует пост-обработки.



(Источник: www.lucept.com/2012/09/25/luxexcel)

Рис. 4.9. Технология Printoptical

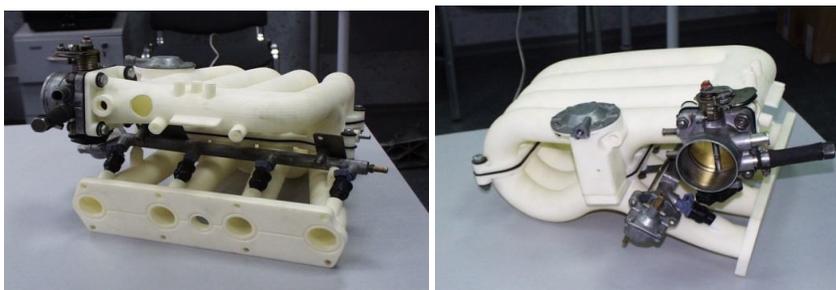
1 – глянцевая поликарбонатная подложка; 2- фотополимер; 3 – струйная головка; 4 – УФ-лампа; 5, 6 – отверждённые слои

В ряде случаев прототип может быть полностью функциональным для проведения вариантных исследований (рисунки 4.10, 4.11). Например, изготовление опытного образца алюминиевой впускной трубы ДВС потребовало бы значительных финансовых и временных затрат (разработка и изготовление литейной оснастки, механообработка). АМ-технологии позволили сократить время и провести моторные испытания с использованием полиамидного прототипа (см. рисунок 4.11), оснащенного необходимыми устройствами прямо на моторном стенде. Появление новых высокопрочных, термостойких модельных материалов расширяет возможности функционального прототипирования.



(Экспонат выставки Euromold 2014, 3D Systems)

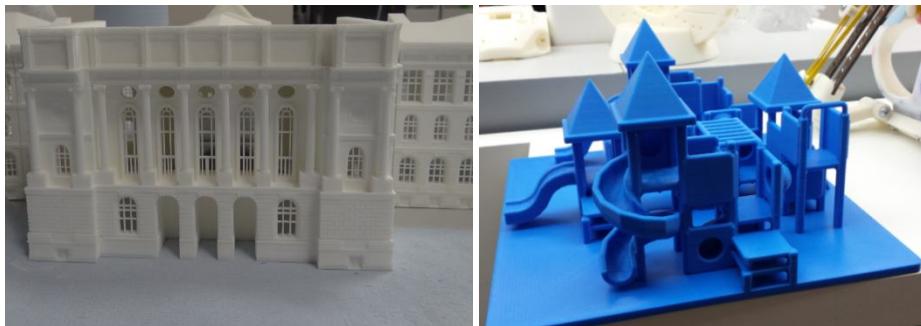
Рисунок 4.10. Полноразмерный макет приборной панели автомобиля



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 4.11. Прототип впускной трубы ДВС, оснащенный элементами системы топливоподачи и подготовленный к проведению стендовых испытаний

Архитектурное моделирование (макетирование) было и остается популярным направлением быстрого прототипирования, рисунок 4.12, которое применяется и в работе с индивидуальными заказчиками на стадии эскизного проекта, и крупными компаниями для согласования проектов застройки городских комплексов.



(Предоставлено СПбГПУ) (Экспонат выставки Euromold 2014)

а

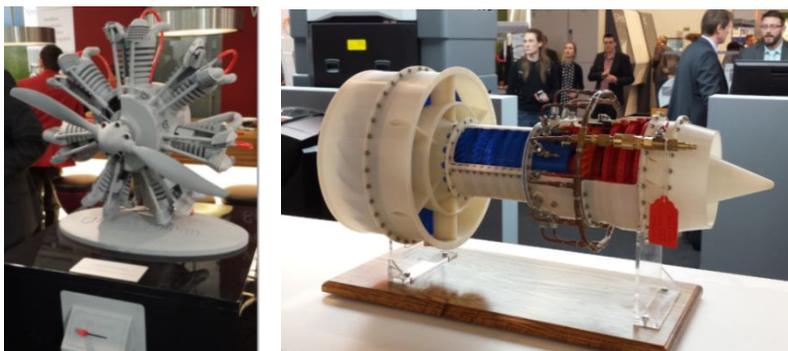
б

Рисунок 4.12. Архитектурное моделирование:
а – макет Химического корпуса СПбГПУ; б – макет детской площадки

Масштабное моделирование машин и механизмов стало неотъемлемой частью экспозиций современных индустриальных выставок. 3D-принтеры с «цветной печатью» позволяют создавать копии сложных объектов с высокой степенью детализации, рисунок 4.13.

Важной вехой в развитии АМ-технологий стало появление технологии АКФ – ARBURG Kunststoff-Freeformen (компания ARBURG), рисунок 4.14. Известно, что принципиальным недостатком технологий быстрого прототипирования является то, что 3D-принтеры в силу специфики рабочего процесса строят изделия из модельных материалов, далеко не всегда соответствующих функциональным требованиям. Нитевые, порошковые или светоотверждаемые полимеры позволяют достаточно точно воспроизвести геометрию детали, но их прочностные свойства: термостойкость, стойкость к воздействию влаги, агрессивных сред, ультрафиолетового излучения и т. д. оказываются не достаточными, чтобы исполь-

зовать построенные изделия в качестве конечного продукта – детали механизма или машины.



(Экспонаты выставки Euromold 2014)

а

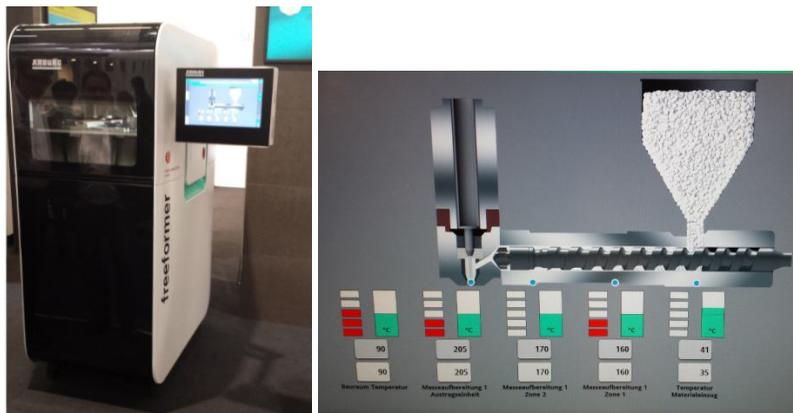
б

Рисунок 4.13. Копии двигателей:

- а – действующая модель авиационного звездообразного двигателя;
- б – макет авиационного газотурбинного двигателя.

Технология АКФ выводит аддитивные технологии на качественно новый уровень. Она позволяет использовать промышленные полимеры – ABS, PC (поликарбонат), PA (полиамид), TPE (термоэластопласты), причем в привычном для промышленного литья виде – в стандартных гранулах. Теперь нет необходимости готовить нитевидный, как для FDM-машин, или порошковый, как для SLS-машин, дорогостоящий модельный материал. В конструкции AM-машины Freeformer много общего от обычных серийных термопласт-автоматов. В бункер (рисунок 4.14 б) загружают фидсток в виде гранул, шнековый механизм подает материал к экструдеру. По пути к экструдеру материал нагревают до 205°C. Экструзионная головка содержит форсунку с дозирующим механизмом и мембраной с пьезоэлектрическим приводом. Наконечник форсунки – сменный, могут быть установлены наконечники с диаметром выходного отверстия 100, 150, 200, 250, 300 мкм. Таким образом, в зависимости от требований к детали можно регулировать скорость построения (произво-

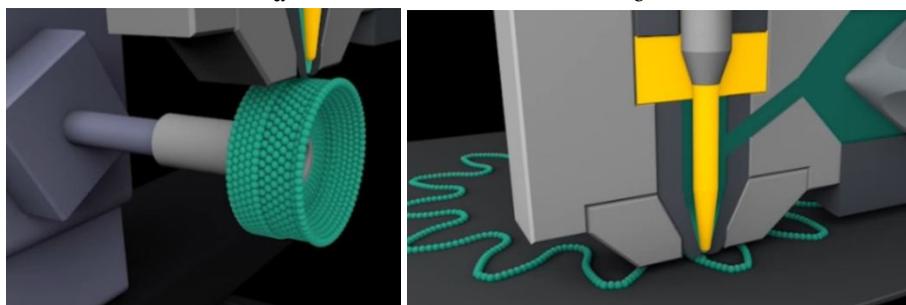
дительность) и шероховатость поверхности (меньше скорость – меньше шероховатость и наоборот).



(Экспонат выставки Euromold 2014)

а

б



(Источник: www.arburg.com)

в

г

Рисунок 4.14. AM-машина Freeformer (ARBURG):

а – внешний вид машины;

б, в, г – схема рабочего процесса; размеры зоны построения 230x130x250мм; минимальный шаг построения 0,15 мм

Машина может быть оснащена одной, двумя и более экструзионными головками, что позволяет либо увеличить скорость построения деталей, либо использовать при построении различные (по цвету или по свойствам) материалы.

ГЛАВА 5. Технологии и машины для выращивания металлических изделий

Обычно, когда говорят о серийном производстве, подразумевают количество, измеряемое тысячами или сотнями тысяч единиц. Однако существует и другое серийное производство, измеряемое десятками или сотнями изделий. Таких изделий, зачастую сложной геометрии, из специальных материалов достаточно много в авиационной промышленности, космической индустрии, энергетическом машиностроении и ряде других отраслей. И именно там возник интерес к АМ-технологиям, «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства не прототипов или опытных образцов, а вполне товарной продукции, рисунок 5.1. Причем мотивацией здесь является не возможность создать что-то уникальное, с необычными свойствами, а экономическая целесообразность. В ряде случаев при объективных расчетах реальных затрат аддитивные технологии оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные.



(Предоставлено НИИТ НТК)

Лопатка турбины из никелевого сплава



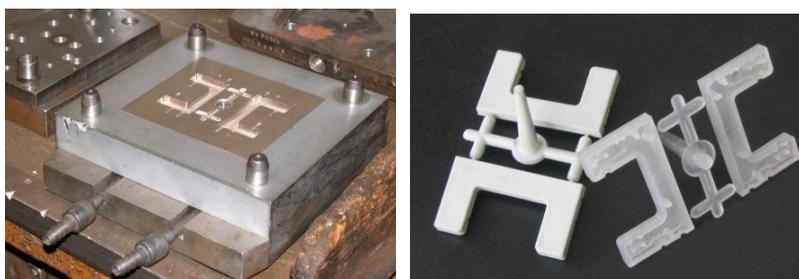
(Предоставлено ОАО «АВ Универсал»)

Детали системы топливоподачи,
материал Ti64

Рисунок 5.1. Детали авиационных двигателей

объективных расчетах реальных затрат аддитивные технологии оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные.

Развитию АМ-технологий в этом секторе промышленности, безусловно, способствовало существенное расширение номенклатуры металлопорошковых материалов. Если в начале нулевых годов это был перечень не более 5-6 наименований, то сегодня предлагаются десятки видов разнообразных композиций от обычных конструкционных сталей до жаропрочных сплавов и драгметаллов. И этот перечень стремительно расширяется. Одним из перспективных направлений применения АМ-технологий является изготовление технологической оснастки – приспособлений и инструментов для серийного производства. В частности, изготовление вставок для термопласт-автоматов (ТПА), рисунок 5.2.

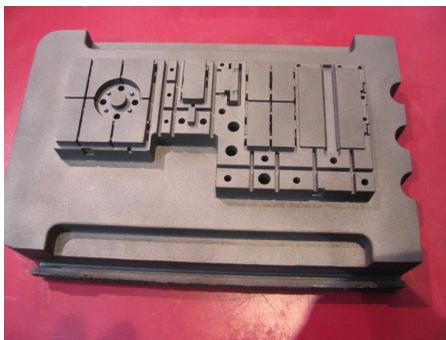


(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 5.2. Вставка для ТПА и отливки из ABS-пластика

Современное производство характеризуется относительно быстрой сменой продуктов, причем часто меняется не основные компоненты, определяющие функциональные качества продукта, а дизайн – корпусные детали, элементы декора, обычно изготавливаемые литьем, в частности и на термопласт-автоматах. По этой причине в ряде случаев отпадает необходимость в дорогостоящей инструментальной оснастке, выдерживающей десятки и сотни тысяч циклов. Посредством АМ-технологий можно сделать матрицу или пресс-форму из легкого сплава с меньшим ресурсом.

Но и для технологий традиционного литейного производства АМ-технологии дают новые возможности. Например, пресс-форма может быть «выращена» вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки, рисунок 5.3.



(Предоставлено 3D Systems)

Рисунок 5.3. «Выращенная» матрица пресс-формы

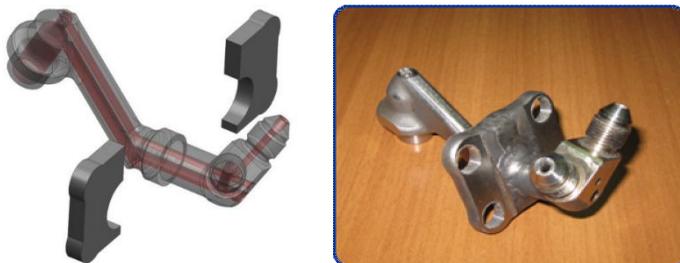
АМ-машины 3D Systems, POM, Omtomec и Fabrisonic успешно используют для изготовления пресс-форм с медными охлаждающими сердечниками, а также с так называемой конформной системой охлаждения, конфигурация которой соответствует геометрии формуемой детали. Иными словами, каналы охлаждения прокладываются в массиве формы так, как необходимо, а не так, как позволяют традиционные технологии. Применение литейных форм с равномерным или регулируемым охлаждением позволяет сократить время пребывания отливки в форме до 30%. В данном случае АМ-технологии это не противопоставление традиционной ЧПУ-обработке, а предложение новых возможностей для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

Обслуживание серийного производства также связано с необходимостью изготовления специальных приспособлений, шаблонов, кондукторов и т. д., и здесь применение АМ-технологий может быть экономически эффективно. Многие компании сталкиваются с проблемой оценки

реального объема производства какого-либо изделия. От этого зависят затраты на технологическую подготовку. И всё чаще возникает вопрос, – какую стратегию принять: «вырастить» партию деталей на АМ-машине, или делать «нормальную» оснастку, но с риском, что через короткое время потребуются внесение изменений и оснастку придется переделывать, или, что продукт «не пойдет» на рынке по каким-либо причинам?

Direct Manufacturing или «прямое производство» – изготовление металлических деталей в качестве коммерческих изделий серийной продукции также является одной из целей АМ-технологий. Это направление развивается по мере того, как растет перечень строительных материалов, но говорить о серьезной конкуренции «вычитающим» технологиям пока преждевременно. Однако в ряде отраслей – авиационной промышленности, в судостроении, энергетическом машиностроении, а также дентальной медицине и восстановительной хирургии внедрение аддитивных технологий наиболее заметно. Например, российская компания ОАО «НИАТ НТК» успешно провела работы по замене сварных топливных форсунок авиационного двигателя на «выращенные» из никелевого сплава CL 100NB, рисунок 5.4. Результат – значительно снижен процент брака, масса изделия уменьшена на 17%.

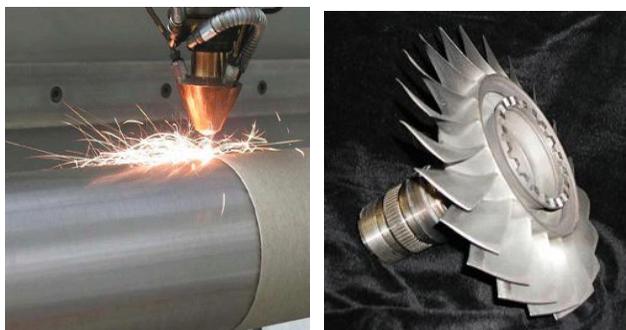
Имеется также положительный опыт использования АМ-технологий для ремонта дорогостоящих изделий, например, рабочих органов турбин ГТД, валов (рисунок 5.5) и т. д., а также для нанесения защитных и износостойких покрытий (технологии DMD, LENS) [4]. И, безусловно, АМ-технологии имеют огромное преимущество перед традиционными за счет сокращения времени и стоимости при проведении НИОКР. Здесь АМ-технологии уже получили постоянную прописку. Проведение вариантных исследований, быстрое изготовление опытных образцов позволили на порядок (без преувеличений!) сократить время проведения НИОКР и, как следствие, значительно сжать сроки выхода новой продукции на рынок.



(Предоставлено ОАО «НИИТ НТК»)

Рисунок 5.4. Сварная и «выращенная» топливная форсунка

Послойный метод построения детали сам по себе дал новые возможности, открыл для конструктора новые горизонты творчества, снял многие технологические ограничения. Стало возможным то, что было в принципе невозможным ранее. Можно «вырастить» «деталь в детали», можно «вырастить» деталь с переменными по толщине свойствами материала (так называемые градиентные материалы), можно «выращивать» сетчатые конструкции, которые невозможно получить ни литьем, ни механической обработкой.



(Источники: www.optomec.com, www.ipmd.net)

Рисунок 5.5. Восстановление деталей авиационного двигателя

Это фундаментальное преимущество аддитивных технологий и определяет их роль в современном материальном производстве. И будем

помнить: то, что мы видим сейчас, это всего лишь бледные контуры будущего.

5.1. Машины и оборудование для «выращивания» из металла

Машины, как и технологии, можно разделить на две группы – «Bed Deposition» и «Direct Deposition». Первая предполагает использование в качестве строительного материала металлопорошковых композиций, вторая – так же и прутковых материалов. (Основные характеристики машин приведены ниже в таблицах 5.1, 5.2).

5.1.1. Группа Bed Deposition

На современном рынке машины, использующие SLS-технологию, представлены наиболее многочисленной по производителям и разнообразной по моделям подгруппой (таблица 5.1). Большая часть компаний-производителей в своих машинах в качестве источника энергии для соединения частиц металлопорошковых композиций использует лазер. К ним относятся:

- Concept Laser, EOS, SLM Solutions, Realizer (все Германия);
- 3D Systems (США);
- Phenix Systems (Франция, в настоящее время принадлежит 3D Systems);
- Renishaw (Великобритания).

Компания Arcam (Швеция) в своих машинах использует используется EBM-технологию.

Почти все компании, применяющие лазер, по-разному называют свои технологии, но по технической сути все они являются технологиями селективного лазерного сплавления – SLM-технологиями (Selective Laser Melting), именно это название негласно закреплено за компанией SLM Solutions.

При решении вопроса о приобретении АМ-машины и рациональном обустройстве места её установки необходимо помнить, что АМ-машины – это целый комплекс, включающий в себя системы для просеи-

вания и смешения порошков, загрузки, разгрузки и очистки машины, системы фильтрации и охлаждения, системы хранения порошков, системы генерации и подачи инертных газов и др.

Особенностью технологий, использующих лучевой источник тепла, является необходимость применения *специальных поддержек* – своеобразных «якорей», препятствующих термическим деформациям в строящихся деталях. При построении деталей из полимерных порошков в этом нет необходимости: деталь при построении находится в массиве порошка, и функцию поддержек выполняет неспеченный порошок. При сплавлении металлических порошков концентрация тепловой энергии в рабочей камере чрезвычайно высока и без удерживающих «якорей» деталь может «уплыть», покоробиться и даже повредить элементы дозирующей системы машины. Специальное программное обеспечение АМ-машины предлагает оператору конфигурацию поддержек, но многое зависит и от оператора, от его опыта и мастерства – часто приходится редактировать предлагаемое машиной решение. Кроме того, удаление поддержек – это достаточно ответственный процесс. Необходимо, во-первых, снять остаточные напряжения. Для этого нужно иметь соответствующее термическое оборудование. Во-вторых, необходимо иметь подходящий инструмент для аккуратного отделения построенной детали от платформы и последующего удаления поддерживающих структур. В-третьих, необходимо оборудование для пост-обработки построенных деталей.

Компания Concept Laser входит в группу Hofmann и производит АМ-машины с 2002 г. Название технологии – LaserCUSING (в слове «Fusing» – сплавление, первая буква заменена на «С» от Concept). В машинах используются волоконные лазеры с иттербиевым легированием (Yb-лазер). Построение деталей происходит в среде защитного газа (N₂, Ar).

Модельный ряд содержит три машины. Самая маленькая – M1 cusing, рабочая зона XYZ=250x250x250 мм, мощность лазера 200 и 400 Вт, разработана специально для исследовательских целей, используется в

медицинской и ювелирной промышленности, имеет диаметр пятна лазера 25 мкм, что обеспечивает высокое качество поверхности (рисунок 5.6).



(Экспонаты выставки EuroTold 2014)



(Источник: www.romanoff-rp.com/concept-laser-mlab-laser-sintering-machine)

Рисунок 5.6. Машины M1 cusing и M2 cusing компании Concept Laser

Машина M2 cusing имеет увеличенную до 280 мм по высоте зону построения. Самая большая – X line 1000R с размерами зоны построения 630x400x500 мм, мощность лазера 1,0 кВт – разработана совместно с Фраунхоферским институтом лазерных технологий (FILT) при участии Daimler AG, вышла на рынок в 2013 г. Первая машина уже установлена на Daimler AG для «выращивания» автомобильных компонентов из алюминия. Эта работа была выполнена при поддержке Министерства образования и исследований Германии (в рамках реализации проекта «Alu generative research and development project») и является примером продуктивного государственного «вмешательства» в рыночные отношения.

Машина X line 1000R с момента разработки позиционировалась как «индустриальная машина», т. е. для серийного производства.

Компания EOS – одна из наиболее известных и успешных на рынке AM-технологий. Компания EOS в последние два года продает более 100 машин, из них треть приходится на «металлические» машины.

EOS одна из немногих европейских компаний, занявшая твердые позиции на рынке США. Американская компания Morris Technology, входящая в GE Aviation, имеет двадцать AM-машин от EOS. В настоящее время EOS выпускает четыре машины PRECIOUS M 080, EOSINT M 280, EOS M 290 и M 400, (рисунок 5.7).



PRECIOUS M 080

EOSINT M 280

EOS M 290



EOS M 400 (Экспонаты выставки Euromold 2014)

Рисунок 5.7. Машины EOS

Свою технологию компания называет DMLS – Direct Metal Laser Sintering, однако металлографические исследования, представленные в

троники и др. Опытный образец машины с размерами рабочей зоны $\varnothing 50$ и высотой 30 мм позволяет строить детали с шагом 1-5 мкм и шероховатостью Ra около 2 мкм.

Компания 3D Systems (США). Отличительной чертой машин является оригинальный способ формирования слоя строительного материала, позволяющий обеспечить шаг построения 20 мкм. В настоящее время компания производит четыре базовые машины ProX 100, ProX 200, ProX 300, ProX 400, рисунок 5.9. Машины ProX 100, ProX 200 имеют модификацию «Dental», оснащенные дополнительными опциями для изготовления зубных коронок, мостов, имплантов. В качестве модельных материалов используются металлопорошки со средним размером частиц $d_{50} = 6-9$ мкм. На этих машинах также возможно изготовление деталей из керамических композиций, которые после построения требуют спекания в высокотемпературной печи. В частности, могут быть изготовлены керамические стержни для специальных видов литья.



Рисунок 5.9. Машины Phenix (3D Systems)

Около 50 машин Phenix Dental установлено в различных лабораториях для изготовления дентальных изделий из сплавов Co-Cr. Эти машины также могут быть эффективно использованы для проведения научно-исследовательских работ с целью изучения особенностей рабочих процессов лазерного синтеза и отработки SLM-технологий для различных порошковых композиций.

Компания SLM Solutions (Германия) – один из мировых лидеров в области технологий лазерного синтеза. В результате сотрудничества с FILT появилась наиболее современная на сегодняшний день машина SLM 500HL (рисунок 5.10). В качестве опции в машину может быть интегрирован второй лазер мощностью 400 или 1000 Вт. Внешний контур детали и тонкие стенки «прорабатывает» первый лазер 400 Вт, а основное тело детали – второй более мощный лазер.



Рисунок 5.10. Машины SLM Solutions

Вообще при построении сложных деталей процесс регулирования мощности лазера является крайне желательным, но весьма сложным в реализации. С одной стороны, чем больше мощность лазера, тем быстрее происходит расплавление металла и тем быстрее строится деталь. Но, с другой стороны, при этом в точку расплава подводится большое количество энергии: процесс идет очень интенсивно, со взрывным характером расплавления частиц металла – металл кипит, происходит его разбрызгивание и часть строительного материала выбрасывается из пятна расплава. Это может привести к повышенной пористости, значительному ухудшению качества поверхности. В таких условиях построение сложных тонкостенных элементов детали становится весьма затруднительным – частицы металла просто разлетаются в стороны, а не сплавляются. Для формирования этих элементов нужен более деликатный инструмент – лазер меньшей мощности, но при этом и с уменьшенной производитель-

ностью. Сочетание двух лазеров разной мощности в машине SLM 500 HL – это удачное решение проблемы. На этой машине могут быть построены детали с толщиной отдельных фрагментов до 0,3 мм (рисунок 5.11). Это придает машине существенные преимущества: во-первых, значительно – до 5 раз, увеличивается скорость построения детали, и, во-вторых, улучшается внутренняя структура материала и чистота внешней поверхности (Ra 5-10).



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 5.11. Деталь электрического устройства. Толщина рёбер 0,35 мм.

Компания Realizer (Германия) с 2010 г. самостоятельно вышла на рынок, раньше эта компания работала как фирма-партнер с SLM Solutions, поэтому унаследовала много общего в создании от прежнего сотрудничества с Realizer. Особенностью машин Realizer является оригинальная оптическая система, уменьшающая диаметр пятна лазера и позволяющая строить детали с повышенной точностью, но на уменьшенной зоне построения. В настоящее время компания выпускает четыре машины: SLM 50, SLM 100, SLM 250, SLM 300, рисунок 5.12.

Суть рабочего SLM-процесса иллюстрирует рисунок 5.13. Инертный газ (1) является расходным материалом: его поток организуют так, чтобы частицы расплавленного металла, вылетающие из пятна расплава (визуально – в виде искр), сдувались потоком газа в сторону, не засоряли и не нарушали структуру поверхности построения (6).



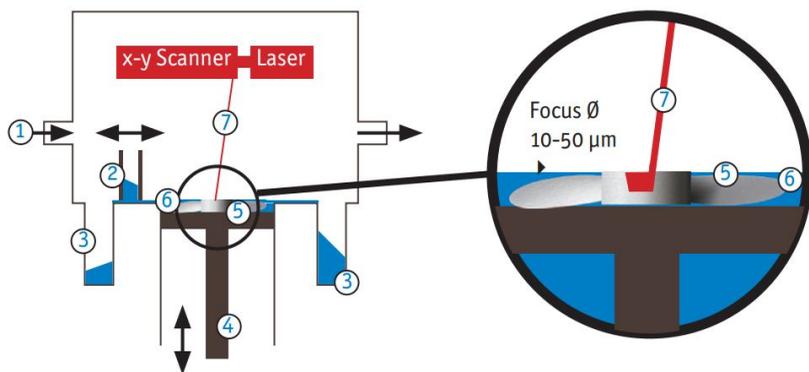
(Источник: www.realizer.com)

Рисунок 5.12. Машины Realizer: SLM 50, SLM 100, SLM 250, SLM 300

Из линейки машин Realizer выделяется модель SLM 50 класса Desktop, наименьшая из всех «металлических» машин и подходящая как для проведения научно-исследовательских работ, так и для изготовления ювелирных и дентальных изделий (рисунок 5.14). В качестве опции в машину может быть интегрирован стереомикроскоп. Машина может быть также использована в качестве агрегата для лазерной сварки.

Машина SLM 100 предназначена для изготовления малых серий деталей относительно небольшого размера с высокой точностью. Размеры зоны построения составляют 125x125x100 мм, оригинальная оптиче-

ская система фокусирует пятно лазерного луча до размера 20 мкм, что позволяет строить фрагменты детали с толщиной стенки до 60 мкм.



(Источник: www.realizer.com)

- 1 – инертный газ; 2 – ракель, выравнивающий слой порошка;
3 – контейнеры с металлическим порошком; 4 – механизм управления движением платформы; 5 – строящаяся деталь;
6 – поверхность построения, «bed»; 7 – сфокусированный лазерный луч
- Рисунок 5.13. Рабочий процесс в машинах Realizer



(Источник: www.realizer.com)

Рисунок 5.14. Примеры изделий, изготовленных на машине SLM 50

В машине SLM 250 опционально предусмотрена дополнительная оптическая система, позволяющая уменьшить диаметр пятна лазера с 40 до 20 мкм, а новая система подачи материала позволяет сформировать слой для построения всего за 4 с.

Компания Renishaw – одна из ведущих мировых компаний в области измерительной техники, с 2010 г. включила в свой бизнес аддитивные технологии, присоединив фирму MTT Technology. Фирма MTT Technology незадолго до этого вышла из компании SLM Solutions, но сохранила независимое производство SLM-машин. В США до 2012 г. эти машины продавались под брендом 3D Systems. Приоритетами компании Renishaw при разработке новых АМ-технологий являются решение проблемы охраны окружающей среды, снижение энергозатрат и дорогостоящих расходных материалов.

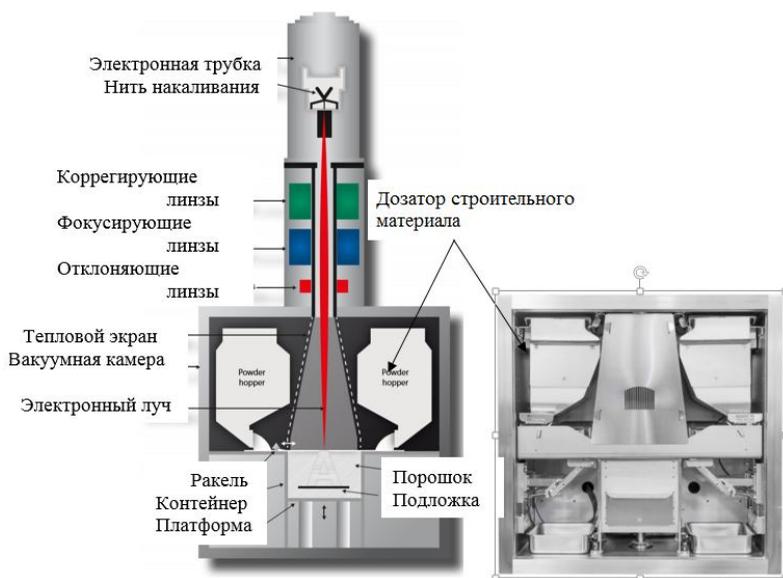
В настоящее время компанией Renishaw производится машина AM 250, конструкция которой во многом аналогична машинам SLM Solutions: рабочая зона XYZ= 250x250x300 мм, шаг построения 20-100 мм, мощность лазера 200/400 Вт, диаметр луча в зоне расплава 70 мкм (135 мкм для лазера 400 Вт), рисунок 5.15.



Рисунок 5.15. Машина AM 250

Достоинство машины AM 250, – высокая степень герметизации рабочей камеры, что позволяет производить глубокую откачку воздуха перед началом построения, и после заполнения камеры аргоном (или азотом – для неактивных металлов) обеспечивать рабочий процесс при концентрации кислорода в камере ниже 50 ppm с весьма умеренным расходом инертного газа.

Компания Arcam – одна из немногих компаний, использующих в своих машинах EBM-технологию. Сущность технологии электронно-лучевого сплавления (Electron Beam Melting) состоит в следующем [7]. Электроны испускаются нитью накала, разогретой до 2500°C, и далее, проходя через анод, разгоняются до 0,5 скорости света. Пучок электронов фокусируется магнитным полем, другим магнитным полем контролируется отклонение пучка. При достижении электронами порошка кинетическая энергия превращается в тепло и металлический порошок сплавляется. Мощность регулируют количеством электронов, рисунок 5.16.



(Источник: www.arcam.com)

Рисунок 5.16. Рабочий процесс в машинах Arcam

Особенностью технологии ЕВМ является то, что процесс построения детали происходит в камере, предварительно отвакуумированной до $<1 \times 10^{-4}$ мбар. (Газовая среда – воздух или иной газ – создает слишком высокое сопротивление электронному лучу, поэтому рабочую камеру вакуумируют). Но это позволяет получать качественные изделия из титана и титановых сплавов. При этом обеспечивается приемлемая точность построения – на уровне $\pm 0,2$ мм на длине 100 мм. В настоящее время в производстве находятся машины 3-го поколения – Arcam Q10, Q20 и Arcam A2X, рисунок 5.17.



Arcam Q10 (Arcam Q20)



Arcam A2X

Рисунок 5.17. Машины Arcam

Особенности технологии ограничивают размер пятна электронного пучка в зоне расплава диаметром 0,2-1,0 мм (при использовании лазера эта величина на порядок меньше), поэтому по чистоте поверхности и точности ЕВМ-технологии уступают лазерным SLM-технологиям. Однако существует множество приложений, когда независимо от способа производства (литье или АМ-технологии) деталь необходимо подвергать финишной обработке на станках с ЧПУ, и в этих случаях чистота поверхности «выращенной» детали не имеет особого значения. Не менее важным является качество внутренней структуры металла. И здесь тех-

нология Arcam имеет преимущество перед лазерными SLS-технологиями. Ряд независимых исследователей отмечает, что при сравнительно низкой чистоте поверхности плотность материала деталей от Arcam выше, и структура материала лучше, чем при использовании лазерных технологий. Высокая производительность EBМ-машин – 55-80 см³/ч (2-20 см³/ч у аналогичных по размерам лазерных машин) позволяет этим машинам занимать доминирующее положение в сфере производства серийной продукции медицинского назначения (титановых протезов, имплантов и др.). Компания Arcam продала более 120 систем в десять стран мира.

Практически все перечисленные машины либо в базовой версии, либо опционально могут работать с наиболее востребованными на индустриальном рынке металлопорошковыми композициями: инструментальные стали (тип H13), мартенситно-старееющие стали (типа 18% Ni Maraging 300), алюминиевые сплавы (AlSi10Mg, AlSi12), чистый титан и его сплавы (типа Ti6Al4V и особо чистый Ti6Al4V ELI), сплавы Co-Cr, жаропрочные стали (Inconel и др.).

Машинами ExOne и 3D Systems [8] представлен ещё один вид технологий послойного синтеза, особенностью которого является то, что сначала в АМ-машине «выращивают» так называемую «грин-модель».

Процесс «выращивания» состоит в послойном скреплении матричного материала – стального порошка. 3D Systems использует для этого плакированный металлический порошок, который предварительно смешивается в специальном миксере со связующим, обволакивающим тонким слоем частички порошка. При построении в машине лазер расплавляет связующее и связывает частички порошка между собой. Затем грин-модель помещают в печь и удаляют связующее. После этого производят инфильтрацию – пропитку модели расплавленной бронзой (рисунок 5.18, а также см. выше рисунок 5.3). Компания 3D Systems активно продвигала эту технологию в начале 2000-х годов, однако в последнее время переключилась на развитие технологии лазерного сплавления (SLM).

В машинах ExOne (США) грин-модель получают посредством технологии Ink-Jet (по классификации ASTM – Binder Jet): связующий реагент впрыскивается в процессе построения на заранее сформированный слой матричного материала. В обоих случаях грин-модель извлекают из машины, тщательно очищают от свободного порошка и помещают в печь с защитной средой (обычно N_2), где при температуре 1000-1100°C производят пропитку грин-модели расплавленной бронзой.

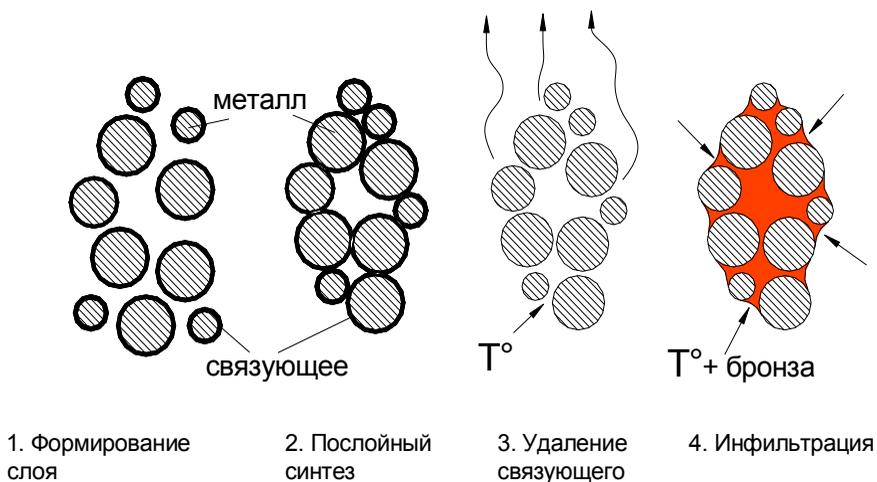


Рисунок 5.18. Схема синтеза изделия из композиций стали и бронзы

На рисунке 5.19 показана «выращенная» грин-модель непосредственно перед закладкой в печь. По периферии модели встык расположены питатели, на которых установлены бронзовые бруски. В печи бронза расплавляется и через питатели за счет капиллярного эффекта проникает в тело грин-модели. Так получают изделие из материала, представляющего собой конгломерат стали – 60% и бронзы – 40%. Чистота поверхности деталей достаточно высокая – Ra 5-10, минимальная толщина стенки около 1 мм. Однако прочностные свойства и твердость невысокие: предел прочности при растяжении – 610 МПа, твердость – HRC= 10-20.

Технологии Ink-Jet часто используют для быстрого изготовления оснастки для литья пластмасс (пресс-формы выдерживают до 200-500 тыс. циклов), а также для серийного производства деталей, работающих в условиях трения, – зубчатых передач, валов, втулок и т. д. Например, машины M-Print компании ExOne используют для серийного производства зубчатых колес и рабочих органов насосов (рисунок 5.20, [8]). Эти машины строят грин-модели со скоростью до 6 мм/ч по высоте, при размерах рабочей зоны 780x400 мм, что равнозначно производительности 1780 см³ в час, и на порядок выше, чем при использовании лазерных технологий. В машине X1-Lab можно также «выращивать» детали из порошкового силикатного стекла с последующим спеканием.



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 5.19. Грин-модель вставки ТПА, технология 3D Systems

К перспективным Ink-Jet-технологиям относят технологию fcubic, приобретенную компанией Höganäs AB (Швеция). Суть её состоит в том, что вместо связующего (как у ExOne) при построении грин-модели впрыскивают специальный состав, ускоряющий поглощение теплового излучения. После построения грин-модель не извлекают из массива материала, а вместе с ним помещают в печь, где происходит спекание модели, обработанной составом, необработанная часть материала остается неспекенной. Это принципиальное отличие от технологий ExOne и 3D Systems: грин-модель не инфильтруют бронзой или иным сплавом, а спе-

кают, обеспечивая однородность химического состава материала. В качестве строительных материалов используют титановые сплавы, нержавеющие и инструментальные стали. Данная технология накладывает определенные ограничения на размеры деталей – в пределах 10-20 мм. Фирма работает как сервис-бюро, изготавливая по заказам детали из нержавеющей сталей и цветных металлов. Заявляемые преимущества – высокая производительность и умеренная цена.



а



б



в



г

Рисунок 5.20. Машины *ExOne*: а – X1-Lab; б – M-Flex; в – M-Print; г – извлечение грин-модели из машины [8]

Существует и другая технология, родственная *fcubic* – SIS-технология (Selective Inhibition Sintering [9]), в соответствии с которой на неотверждаемую часть материала наносят ингибитор – раствор соли металла. После построения (как и в технологии *fcubic*) весь бункер с материалом помещают в печь, где необработанная часть материала спекается, а обработанная ингибитором остается неспеченной. На сегодняшний день эта технология не вышла из стадии научно-исследовательских разработок, пока перспективы ее коммерческой реализации остаются неясными.

Компания Matsuura Machinery предлагает гибридную технологию – сочетание SLM-технологии и механообработки [10]. В рабочей камере машины LUMEX Avance-25 (рисунок 5.21) ведется послойное построение детали, как и в других АМ-машинах. Через каждые 10 слоев производится чистовое фрезерование «выращенной» части детали (шпиндель 43000 мин⁻¹). Размеры зоны построения (обработки) – 250x250x100 мм.

Пример изготовления пресс-формы для литья корпуса фотокамеры представлен на рисунке 5.21. Время послойного синтеза деталей (А - слева и В – справа, рисунок 5.21), составляет, соответственно, 68 ч 21 мин и 36 ч; время механообработки – 29 ч 08 мин и 53 ч 30 мин. Машина предназначена главным образом для изготовления литейной оснастки с конформной системой охлаждения. LUMEX Avance-25 специально разработана для рынков Китая, Тайваня, Индонезии и др. стран Юго-Восточной Азии, ставших мировыми центрами по производству пластмассовых изделий. Базовая цена машины около \$850 тыс.

Разнообразие моделей машин позволяет сделать оптимальный выбор оборудования под конкретные задачи производства. Разработчики машин, как правило, тесно сотрудничают с университетским научным сообществом для решения фундаментальных металлургических проблем, совершенствования лазерной техники, программного обеспечения и т. д.

Общей проблемой SLM-технологий является проблема обеспечения надлежащей микроструктуры синтезированного материала, устране-

ния пористости, в той или иной мере характерной для всех видов АМ-технологий. В ряде исследований, в частности [5, 6, 11], показано, что пористость зависит как от материала, так и от параметров режима сплавления. Например, для алюминиевых сплавов (рисунок 5.22) пористость может достигать 4-5%, для сплавов Ti – до 2%, тогда как для сталей – менее 0,2%. Для устранения внутренней пористости для особо ответственных деталей применяют специальные методы термической обработки и обработки давлением, включая HIP (Hot Isostatic Pressure) – горячее изостатическое прессование.

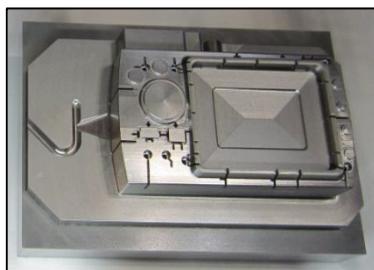
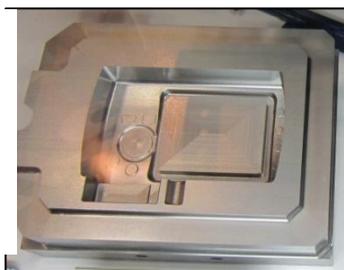
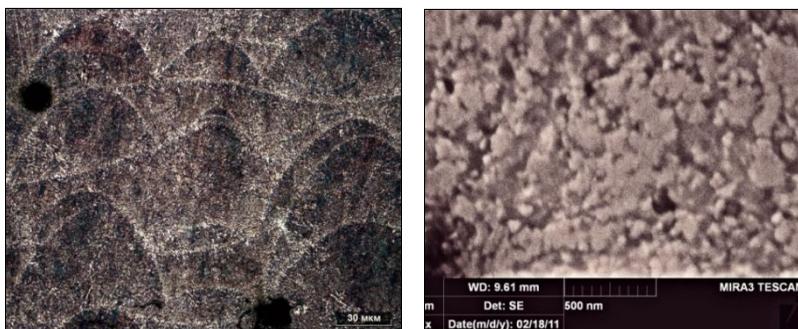


Рисунок 5.21. Машина LUMEX Avance-25 и пресс-форма для литья корпуса цифровой фотокамеры [10]

Обычно каждая компания-производитель АМ-машин предлагает определенный набор строительных материалов и подробную инструкцию для настройки параметров машины под каждый тип материала. Включе-

нию в список материалов предшествует длительная работа по определению оптимальных режимов построения. Зачастую эта работа проводится совместно с университетами, обладающими необходимым исследовательским оборудованием. В ходе этой работы определяются оптимальная взаимосвязь таких параметров, как мощность лазера, фракционный и химсостав порошка, шаг «штриховки» лазера (или шаг сканирования) в плоскости X-Y, шаг построения, скорость сканирования лазера (скорость лазерного луча), температура плавления материала. Чем выше скорость сканирования, тем выше производительность машины и тем меньше шероховатость поверхности, рисунок 5.23 [11]. Но и тем выше вероятность образования пористости. Для приведенного на рисунке 5.23 б варианта наилучшая плотность структуры обеспечивается при скорости сканирования 120-130 мм/с.



(Предоставлено СПбГПУ)

Рисунок 5.22. Микроструктура сплава AlSi9Mg [6].

Особое значение имеет согласование шага сканирования, свойств материала и других параметров с целью минимизации пористости и оксидных включений во внутренней структуре строящейся детали, рисунок 5.24.

Способ минимизации пористости предложен Yasa E. и Kruth J. (Католический университет, г. Лёвен). Суть его заключается в том, что производят повторное сплавление слоя, т. е. каждый слой «обрабатывается»

лазером дважды. В результате пористость снижается на порядок (рисунок 5.25), однако при этом почти вдвое увеличивается время построения детали [12, 13].

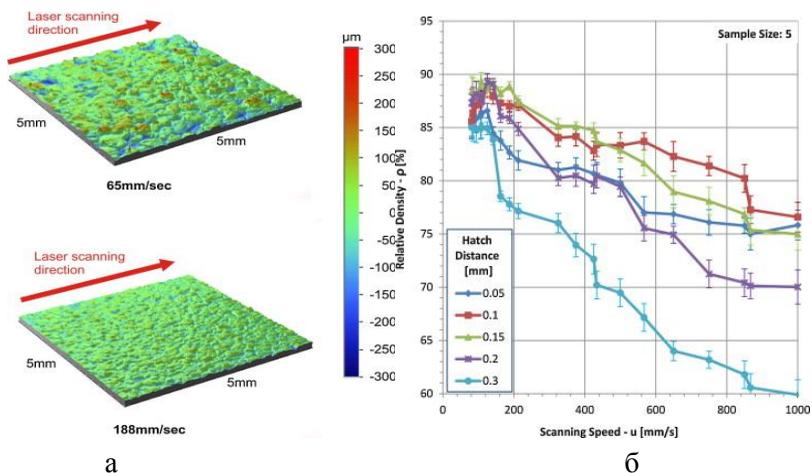


Рисунок 5.23. Влияние скорости сканирования на шероховатость поверхности (а) и относительную плотность (б) образца, SLM-технология [11]: Al – сплав 6061; мощность лазера 50 Вт; шаг сканирования 0,15 мм

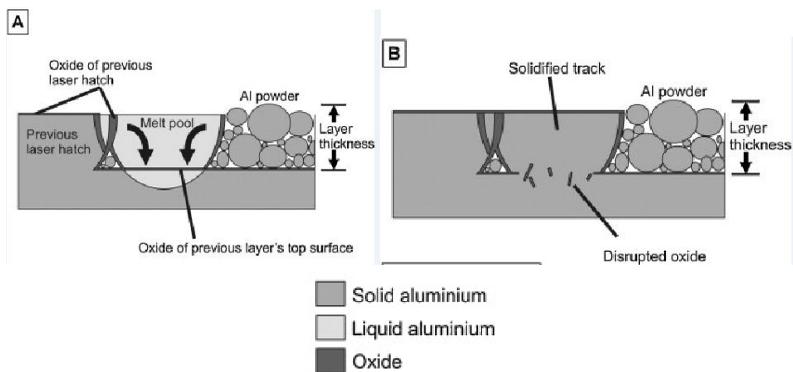


Рисунок 5.24. Механизм образования пористости и оксидных включений [11]

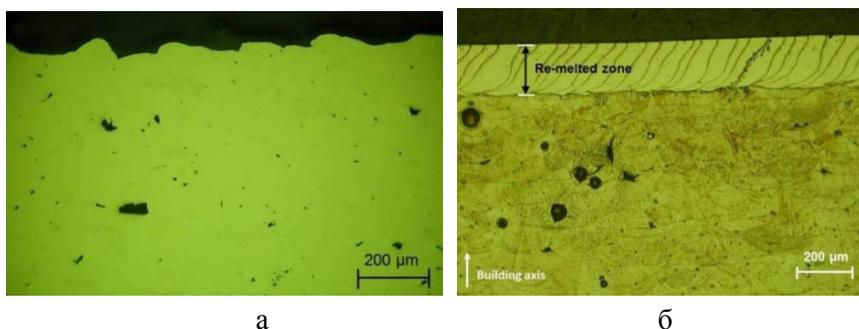


Рисунок 5.25. Микроструктура образца из нержавеющей стали 316L: а – без вторичного сплавления; б – с вторичным сплавлением [12]

Технологии Sheet Lamination также следует отнести к группе Bed Deposition, поскольку здесь, как и для SLS-технологии, в процессе построения сначала формируется «bed» (постель) модельного материала, но не в виде выровненного слоя металлопорошковой композиции, а в виде тонкого листа – полимерной пленки, бумаги, металлической фольги.

АМ-процесс по технологии Sheet Lamination нашел практическое воплощение применительно к металлу только в оборудовании компании **Fabrisonic** (США). Сущность технологии, разработанной в 90-х гг. XX в. компанией Solidica и называемой UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing), заключается в следующем: металлическую фольгу накачивают роликом, к которому прикладывают нормальную силу (см. выше рисунок 2.13). С помощью ультразвукового генератора создают микроперемещения в направлении поперечном направлению движения ролика. В результате пластической деформации в месте контакта двух листов фольги происходит разрушение оксидной пленки, наблюдается тепловыделение, которого достаточно для диффузионного проникновения молекул одного металла в другой. Происходит своего рода сварка слоев фольги. Затем сформированный слой фольги обрабатывают фрезерованием, удаляя «лишний» металл. Таким способом получают композитные изде-

лия из несвариваемых обычными методами материалов, например композицию сталь-титан-медь.

Данную технологию применяют как для создания композиционных материалов, так и для изготовления изделий – технологической оснастки, пресс-форм с конформной системой охлаждения, матриц для термовакuumной формовки и т. д.

Модель SonicLayer R200 с рабочей зоной 508x305x524 мм специально разработана для научных целей и малого бизнеса. Машины SonicLayer 4000 и SonicLayer 7200 (рисунок 5.26) с рабочей зоной, соответственно, 1016x1016x610 мм и 1829x 1829x914 мм относятся к «индустриальному» классу. В них интегрирован трёхкоординатный обрабатывающий центр. Производительность машины SonicLayer 7200 – около 60 дюйм³/ч (983 см³/ч).



(Источник: Wohlers Report, 2012)

Рисунок 5.26. Форма для литья под давлением. Машина SonicLayer 7200

Клуб компаний-производителей машин для «выращивания» деталей из металла постоянно расширяется. В 2012 г. в него вошли китайские компании Beijing Long Yuan Automated Fabrication Systems и Trump Precision Machinery.

Таблица 5.1. Основные параметры машин для послойного синтеза из металлопорошковых композиций (категория «Bed deposition»)

Модель		Рабочая зона, мм	Шаг построе- ния, мкм	Мощность Вт	Скорость построе- ния, см ³ /ч	Модельные материалы*
Concept Laser	M1 cusing	250x250x250	20-80	200	2-10	н. с. 316L и 17-4PH; и. с. H13; Ti; Al; Co-Cr; In- conel; Cu; Au; Pt; A.
	M2 cusing	250x250x280	20-80	200/400	2-20	
	X line 1000R	630x400x500	30-200	1000	10-100	
EOS	EOS M 280	250x250x250	20-60	200/400	10-20	н. с. 316L; Al; Fe; Co- Cr; Ni; Ti; Inconel
	EOS M 290	250x250x300	20-60	400	10-20	
	EOS M 400	400x400x400	20-60	400/1000	10-20	
	Precious M 080	80x80x95	20-60	400	10-20	
SLM Solution	SLM 125	125x125x75	20-40	100/200	10-15	н. с. 316L; и. с. H13; Ti; Al; Co-Cr; Inconel; Au.
	SLM 280	250x250x350	20-75	400/1000	10-15	
	SLM 500	500x280x325	20-200	400+1000/ 2x400/ 2x1000	60-70	
Realiser	SLM 50	Ø70x80	20-50	20-120	5-10	н. с. 316L, Ti, и. с. H13; Ti6Al4V, Al, Inconel, Co- Cr, Au.
	SLM 100	125x125x100	20-100	50-200	10-15	
	LM 250	250x250x300	20-100	400	10-15	
	SLM 300	300x300x300	20-100	200/400/ 600/1000		
Renishaw	AM 250	250x250x300	20-100	200/400	5-20	н. с. 316L и 17-4PH; и. с. H13; Ti; Al; Co-Cr; In- conel.
Arcam	Arcam Q10	200x200x180	50-200	3000	55-80	Ti; Co-Cr; Inconel.
	Arcam Q20	Ø350x380	50-200	3000	55-80	
	ArcamA2X	200x200x380;	50-200	3000	55-80	
3D Systems	ProX 100	100x100x80	20	50	1-5	н. с.; м. с.; Inconel; кера- мика
	ProX 200	140x140x100	20	300	5-10	
	ProX 300	250x250x300	20	500	10-15	
	ProX 400	500x500x500	10-100	2x500/1000	10-15	

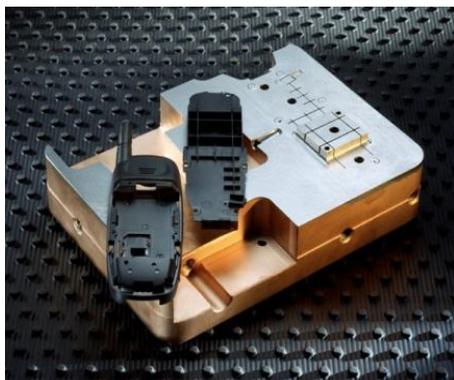
ExOne	X1-Lab	40x60x35	мин. 50		н/д	н. с. 316L
	M-Flex	400x250x250	мин. 100		н/д	+бронза;
	M-Print	780x400x400	280-500		1780	н. с. 420L +бронза; стекло
Matsura	Lumex Avance-25	250x250x185	20	400	н/д	и. с. Н13.
* н.с. – нержавеющая сталь; м.с. – мартенситностареющая сталь; и. с. – инструментальная сталь; Inconel – жаропрочные сплавы Инконель 625 и 718; н/д – нет данных						

5.1.2. Группа Direct Deposition

К группе Direct Deposition относятся машины компаний POM Group (США), Optomec (США), Ipera Laser (Франция), InssTek (Южная Корея), Sciaky (США), таблица 5.2.

Компания POM (Precision Optical Manufacturing), в декабре 2012 г. приобретенная американской компанией DM3D, является разработчиком DMD-технологии, держателем патентов на оригинальные технические решения по лазерным системам и системам управления с обратной связью с одновременным регулированием в режиме реального времени основных параметров построения детали (величина подачи материала, скорость перемещения головки и мощность лазера), обеспечивающих стабильность и качество рабочего процесса.

Технология DMD позволяет производить параллельную или последовательную подачу двух видов материала с различными физико-химическими свойствами. Таким образом можно создавать биметаллические компоненты (формы для литья пластмасс: тело формы – из меди, рабочая часть – из инструментальной стали, рисунок 5.26 а) и наносить специальные покрытия на гильзы цилиндров, поршневые кольца, кулачковые валы, сёдла клапанов (рисунок 5.26 б).



(Источник: www.dm3dtech.com)

а

б

Рисунок 5.26. Технология DMD: а – комбинированная вставка ТПА; б – нанесение износостойкого покрытия на сёдла клапанов ДВС

POM Group, работающая в кооперации с компанией Trumpf (Германия), предлагает несколько моделей АМ-машин. Эти машины предназначены для ремонта инструментальной оснастки (штампы, матрицы, кокили и т. д.), нанесения защитных покрытий, а также для изготовления литейных форм с конформной системой охлаждения, внутренними теплоотводными элементами и др. Возможности машин позволяют также производить детали из композитных материалов, используя несколько систем подачи разнородных порошков.

Имеется опыт создания так называемых градиентных материалов способом послойного нанесения и сплавления двух или нескольких материалов с различными физико-химическими свойствами. Новые модели 44R, 66R и IC106 (рисунок 5.27) используют шестиосевые роботы.

Машины DMD 105D и 505D [14] выполнены в традиционной компоновке на базе пятиосевых обрабатывающих центров. Мощные лазеры (по выбору – от 1 до 5 кВт) обеспечивают высокую производительность – скорость синтеза составляет 24-160 см³/ч. Оригинальная система управления позволяет регулировать размер пятна расплава в зависимости от конфигурации элементов строящейся детали: уменьшая размер пятна

и, соответственно, подачу материала в зону расплава при проработке тонкостенных элементов и увеличивая – при построении массивных элементов.



Рисунок 5.27. Машина DMD IC106 [15]

Машины DMD 105D и IC106 имеют герметичное исполнение рабочих камер для работы с реактивными материалами, модель IC106 также оснащена специальной системой мониторинга зоны расплава «ин ситу» для контроля и управления процессом создания градиентных структур. В качестве материалов используют инструментальные сплавы, стеллиты, инконель и титановые сплавы. Стоимость машин достаточно высокая – более \$500 тыс., так же, как и стоимость работ.

Американская компания **Optomec** – один из мировых лидеров технологий Direct Deposition. Последние годы компания стабильно продает 3-4 установки в год. В настоящее время производятся модели LENS 450, LENS MR-7, предназначенные в основном для научно-

исследовательских целей, и LENS 850-R – для промышленного использования (рисунок 5.28). Машины могут быть оборудованы двумя или более бункерами для подачи разных типов материалов в зону расплава. Процесс построения деталей производится в среде аргона.



(Источник: www.optomec.com)

Рисунок 5.28. Машины Optomec LENS 450, LENS MR-7; LENS 850-R

Преимуществом машин Optomec является быстрая смена материалов – практически за минуты. Высокая скорость охлаждения, более $1000^{\circ}\text{C}/\text{с}$, позволяет регулировать и управлять микроструктурой строящейся детали. Модели LENS 450, LENS MR-7 в базовой версии имеют три оси управления, в качестве дополнительной опции может быть установлен поворотный стол, обеспечивающий четвертую и пятую оси управления. Точность позиционирования – 0,25 мм,

производительность – до 100 г/ч. Модели LENS 850-R в базовой версии имеют пять осей управления и оснащены двумя бункерами по 14 кг. В машинах используются порошки с фракционным составом 36-150 мкм.

Технология компании **Irepa Laser** (Франция) названа EasyCLAD (CLAD – Construction Laser Additive Directe). Коммерческую реализацию технологии осуществляет французская компания VeAM (Ve Additive Manufacturing), которая предлагает четыре типа машин с возможностью выбора размеров рабочей зоны, мощности лазера и системы подвода порошкового материала в зону расплава – одно- или двухсopловую. В зависимости от применяемого сопла ширина наносимого слоя варьируется от 0,6 до 5,0 мм. В рабочей камере поддерживается инертная атмосфера с содержанием $O_2 < 40$ ppm и $H_2O < 50$ ppm.

Машины разработаны в рамках национального проекта по созданию технологий для производства деталей аэрокосмического назначения, ремонта деталей авиационных двигателей и технологической оснастки. В качестве строительного материала применяют металлопорошковые композиции дисперсностью от 45 до 75 мкм и от 50 до 150 мкм. Система подачи материала – коаксиальная. Последняя модель – MAGIC LF6000 с рабочей зоной построения 1500x800x800 мм оснащена двумя соплами для подачи строительного материала (рисунок 5.29). Базовая цена машины – около € 750 тыс.

Южно-корейская компания **InssTek** разработала машину MX-3 (рисунок 5.30), имеющую 4-х киловаттный CO_2 -лазер от Trumpf, пять осей управления и оснащенную многоканальной системой подачи материала. Размер рабочей зоны 1000x800x650 мм.

Оригинальную технологию применяет компания **Sciaky** (США), специализирующаяся на разработке технологий и оборудования для сварки. В АМ-машине компании Sciaky, рисунок 5.31, построение детали производится методом послойного наваривания материала в расплаве, сформированном электронным лучом (рисунок 5.32).

Данная технология называется EBDM – Electron beam Direct Manufacturing («прямое производство посредством электронного пучка»).

Высокая производительность (7-18 кг/ч) технологии EBDM позволяет «выращивать» детали, размеры которых исчисляются метрами, что невозможно или чрезмерно дорого обеспечить при использовании других AM-технологий. Сам принцип формирования детали обуславливает низкое качество поверхности синтезированной детали, однако сочетание EBDM-технологии с традиционными технологиями механообработки позволяет получить результат с приемлемыми затратами.



(Источник: www.irepa-laser.com/en/laser-processes)

Рисунок 5.29. Машина MAGIC LF6000



(Источник: www.insstek.com/system)

Рисунок 5.30 Машина MX-3



(Источник: www.sciaky.com)

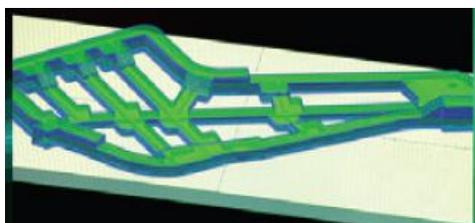
Рисунок 5.31. EBDM–машина компании Sciaky

Модельным материалом является фидсток в виде металлического прутка или проволоки, что также является преимуществом технологии, поскольку в таком виде доступны материалы весьма широкого спектра: никелевые сплавы, нержавеющие и инструментальные стали, сплавы Co-Cr и многие другие, стоимость которых существенно ниже, чем стоимость в порошковом состоянии.

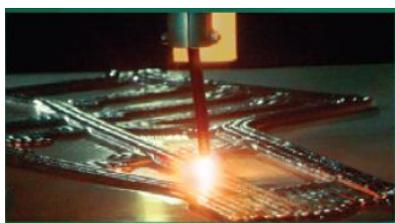
В настоящее время компания отказалась от типоразмерного ряда машин и производит только базовую модель Sciaky's DM с размерами зоны построения 5700x1200x1200 мм – все модификации создаются непосредственно под требования заказчика. Машина позволяет в автоматическом режиме последовательно строить до 10 различных деталей в течение одного цикла вакуумизации рабочей камеры. Стоимость машины более \$2,0 млн.

Относительно новый процесс **IFF** (Ion Fusion Formation) в 2004 г. запатентовала компания **Honeywell Aerospace** [16]. Технология относит-

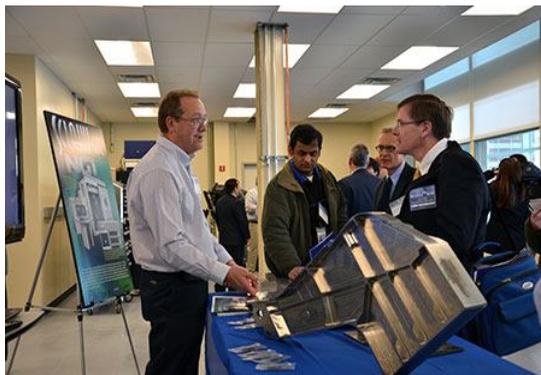
ся к группе Direct Deposition и аналогична технологии Sciaky, но в качестве источника энергии для плавления используется плазматрон, ионизирующий инертный газ и генерирующий поток плазмы (рисунок 5.33). Температура плазмы достигает 5000-30000К. В качестве фидстока используется металлический пруток, материалы – алюминиевые и титановые сплавы, инконель, конструкционные стали и др. Опытная машина имеет размеры зоны построения 1200x1200x1800 мм. К достоинствам этой технологии относят относительно невысокую стоимость по сравнению со стоимостью лазерных систем.



CAD-модель



Процесс построения



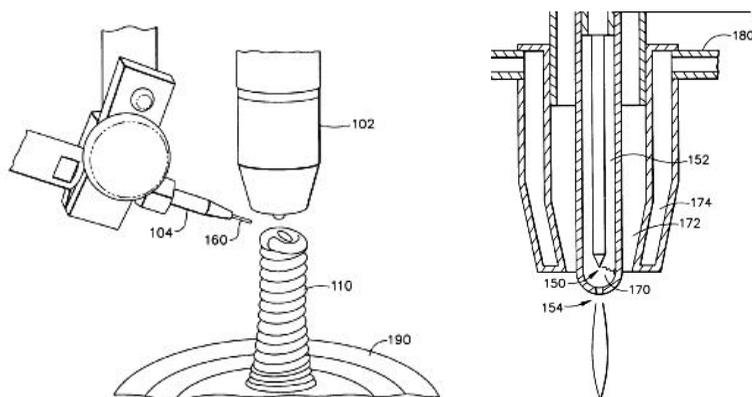
Готовая деталь

(Источник: www.sciaky.com)

Рисунок 5.32. Изготовление детали по технологии Sciaky

Основной рабочий орган большинства рассматриваемых здесь машин – это лазерная головка, представляющая собой чрезвычайно сложное устройство с системами фокусировки лазера, охлаждения и

подачи материала, а также элементы системы управления (датчик, видеочамера и т. д.).



102 – плазматрон; 104 – механизм подачи материала; 110 – деталь;
150 – генератор плазмы; 152 – аргон; 154 – сопло; 160 – фидсток в виде
прутка; 170 – поток плазмы; 172 – гелий; 174 – водяная рубашка
охлаждения

Рисунок 5.33. Фрагмент из описания пат. США 6,680,456 В2 [16]

В процессе построения детали необходимо согласовать несколько параметров: мощность лазера, размер пятна расплава, интенсивность подачи материала, дисперсность порошкового материала, скорость движения головки, обеспечив при этом точную фокусировку подачи металлопорошковой композиции в зону расплава. В зависимости от сочетания параметров построения коэффициент использования материала может варьировать от 0,2 до 0,9, т.е. от 20 до 90% материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируют деталь.

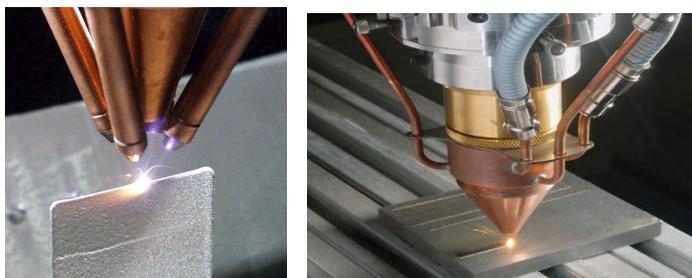
Различные компании используют разные системы подачи материала: одноканальные, многоканальные (например, Optomes), коаксиальные (например, POM, Fraunhofer ILT), рисунки 5.34, 5.35.

Таблица 5.2. Основные параметры машин для послойного синтеза из металлопорошковых композиций, группа «Direct Deposition»

Фирма	АМ-машина	Размеры зоны построения, мм	Источник энергии, мощн., Вт.	Толщ. слоя, мм	Производительность, см ³ /ч	Модельные материалы*
Optomec	LENS 450	100x100x100	400	0,3-1,0	до 80	CP Ti, Ti-64
	LENS MR-7	300x300x300	500	0,3-1,0	30-100	6264; и.с.: H13, A2, S7; и.с.: 304, 316, 420, 17-4 PH; Inc. 625, 718; Хастеллой X; Cu, Al, Стеллит 21
	LENS 850-R	1500x900x900	1000; 2000; 3000; 4000	0,3-1,0	30-150	
POM (Trumpf)	DMD505D	863x863x609	1000-5000	0,2-1,2	20-150	и.с. H13, S7; 420SS, 316SS; CPM1V, CPM10V; Cermets, C250, C276; Inc. 625, 718; Waspalloy; Invar; стеллиты - 6, 21, 31; Ti, Ti-6Al-4V
	DMD103/105D	300x300x300	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
	DMD 44R	1950x2140x330°	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
	DMD 66R	3200x3665x360°	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
	DMD IC106	800, 6-ти осевой робот	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
Irepa Laser (Laser Beam)	VC LF200 (LF300, 500)	400x350x200	300-500	0,1-0,3	0,5-4,0	и.с. 316L, 410; CpTi, Ti-Al-V, INCO 718, 625; Stellite 6-12-21-25, и.с. H13, D7, T15, CPM 10V, M2, Waspalloy, 440, Hatfield steel, Cu.
	VI LF4000- -MesoCLAD -MacroCLAD	950x900x500	300-500 1000-4000	0,1-0,3 0,5-1,2	0,5-4,0 8,0-85,0	
	VH LF4000 - MesoCLAD - MacroCLAD	650x700x500	300-500 1000-4000	0,1-0,3 0,5-1,2	0,5-4,0 8,0-85,0	
	MAGIC LF6000	1500x800x800	750-4000	0,2-0,8	8-50 мм ³ /ч	
InssTek	MX-3	1000x800x650	500-1000	н/д	н/д	P20, P21, H13, D2, стали 304, 316, 420; CP Ti, Ti-6-4; инконель 718, 738; Hastelloy X; Ni, Co-Cr, стеллиты 6, 21.
	MX-4	450x450x350		н/д	н/д	

Sciaky	Sciaky's DM	5700x1200x1200	(электронный луч)	н/д	7-18 кг/ч	н. с.; сплавы Ti, Ni, Al.
	Honeywell Aerospace	1200x1200x1800	(плазма)	н/д	н/д	Ti, Al, Inc., 316L.
* CP - commercially pure, коммерческий чистый; н.с – нержавеющая сталь; и. с. – инструментальная сталь; Inc. – Inconel (Инконель); CpTi – чистый титан; Ni-Base – сплавы на основе никеля;						

Совершенствование систем подачи материалов ведется высокими темпами. В опытных образцах с мощными лазерами (4-10 кВт) достигнута производительность (темп осаждения материала) – 9-15 кг/ч [17].

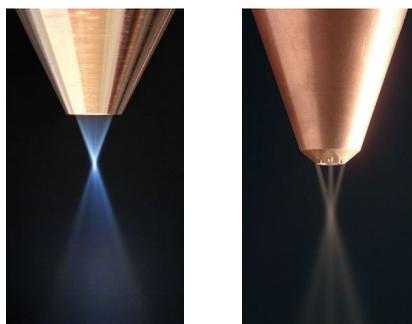


(Источники: www.optomec.com, www.ilt.fraunhofer.de)

а – Optomec

б - Fraunhofer ILT

Рисунок 5.34. Системы подачи материала Optomec и Fraunhofer ILT



(Источник www.ilt.fraunhofer.de)

а

б

Рисунок 5.35. Системы подачи материала:

а – коаксиальная; *б* –многоканальная

ГЛАВА 6. Аддитивные технологии и литейное производство

При разработке и создании новой промышленной продукции особое значение имеет скорость прохождения этапов НИОКР, которая в свою очередь существенно зависит от технологических возможностей опытного производства. В частности, это касается изготовления литейных деталей, которые часто являются самой трудоемкой и дорогостоящей частью общего проекта. При создании новой продукции, особенно на этапе ОКР, в опытном производстве, для которого характерны варианты исследования, необходимость частых изменений конструкции и, как следствие, постоянной коррекции технологической оснастки для изготовления опытных образцов – проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой.

В опытном производстве преимущественно остаются традиционные методы изготовления литейной оснастки (в основном – деревянные модели) вручную или с использованием механообрабатывающего оборудования. Это связано с тем, что на этапе ОКР в условиях неопределенности результата, когда конструкция изделия ещё не отработана, не утверждена. Для изготовления образцов нецелесообразно создавать «нормальную» технологическую оснастку под серийное производство. В этих условиях весьма дорогостоящая продукция – литейная оснастка – оказывается, по сути разовой, которая в дальнейшей работе над изделием не используется в связи с естественными и существенными изменениями конструкции изделия в ходе ОКР. Поэтому каждая итерация, каждое приближение конструкции детали к окончательной версии требует зачистку и новой технологической оснастки, поскольку переделка старой оказывается чрезмерно трудоемкой или вообще не возможной. И в этой связи традиционные методы оказываются не только дороги в плане материальных потерь, но и чрезвычайно затратны по времени.

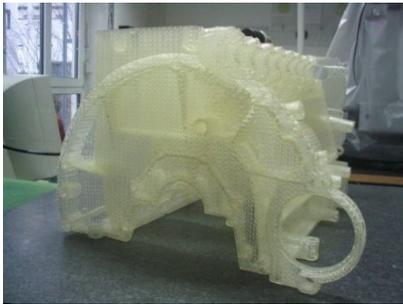
Использование аддитивных технологий в литейном производстве позволяет «выращивать» литейные модели и формы, которые невозмож-

но было изготовить традиционными способами, а также значительно сокращает сроки изготовления модельной оснастки. Использование в процессе вакуумного литья форм и моделей, полученных с помощью аддитивных технологий, дало возможность уменьшить время изготовления пилотных, опытных образцов и в ряде случаев серийной продукции – в десятки раз.

Переход на цифровое описание изделий – CAD и появившиеся вслед за CAD аддитивные технологии произвели кардинальные изменения в литейном производстве, что особенно проявилось в высокотехнологичных отраслях – авиационной и аэрокосмической промышленности, атомной индустрии, медицине и приборостроении, в отраслях, в которых характерным является малосерийное, штучное производство.

Применение методов получения литейных синтез-форм и синтез-моделей за счет технологий послойного синтеза позволило радикально сократить время создания новой продукции. Например, для изготовления первого опытного образца детали, характерной для автомобильного двигателя – блок цилиндров – традиционными методами требуется не менее шести месяцев, при этом основные временные затраты приходится на создание модельной оснастки для литья «в землю». Использование для этой цели технологии Quick-Cast («выращивание» литейной модели из фотополимера на SLA-машине с последующим литьем по выжигаемой модели, рисунок 6.1) сокращает срок получения первой отливки до двух недель. Эта же деталь может быть получена менее точной, но вполне пригодной для данных целей технологией – литьем в «выращенные» песчаные формы, рисунок 6.2, на машинах типа ExOne.

Значительная часть отливок, не имеющих специальных требований по точности литья или структуре, может быть получена в виде готовой продукции в течение 4-5 дней с учетом подготовительно-заключительного времени: прямое «выращивание» восковой модели или Quick-Cast-модели (один день); формовка+сушка формы (1-2 дня); прокалка формы и собственно литье (1-2 дня).



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

а

б

Рисунок 6.1. Блок цилиндров: *а* – Quick-Cast-модель; *б* – чугунная отливка.



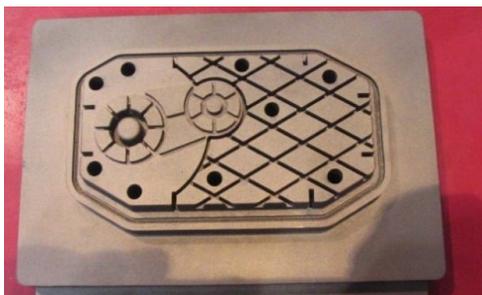
(Экспонат выставки Euro mold 2012, ExOne)

Рисунок 6.2. Блок цилиндров: фрагменты песчаной формы

Развитие трёхмерных CAD/CAM/CAE-технологий привело к существенной модернизации современного литейного и, в первую очередь, опытного производства. Цель этой модернизации в создании условий для полноценной реализации принципа «безбумажных» технологий в течение всего процесса построения нового изделия – от проектирования и разработки CAD-модели до конечного продукта – быть неотрывной частью цикла проектирования и изготовления изделий различного назначения с широкой номенклатурой применяемых материалов. Для этого литейные

цеха и участки оснащают новым оборудованием, дающим широкие возможности, но требующим освоения новых знаний.

Одним из перспективных направлений применения АМ-технологий является изготовление технологической оснастки – приспособлений и инструментов для серийного производства. В частности, изготовление вставок для термопласт-автоматов (ТПА), рисунок 6.3, для последующего литья пластмассовых изделий.



(Экспонат выставки Euromold 2012, 3D Systems)

Рисунок 6.3. Выращенная металлическая пресс-форма для литья на ТПА

6.1. Технологии литья металлов с использованием синтез-моделей и синтез-форм

В рамках одной работы невозможно привести описание всех технологий и машин для послойного синтеза для целей литейного производства. Здесь мы ограничимся лишь теми технологиями, которые имеют наибольший интерес применительно к задачам машиностроения, опуская из рассмотрения довольно обширную тему технологий и машин, предназначенных для решения специальных задач общей медицины, биологии и стоматологии, электронной или ювелирной промышленности.

Особое значение АМ-технологии имеют для ускоренного производства отливок. АМ-машины используются для получения: литейных моделей; мастер-моделей; литейных форм и литейной оснастки.

Литейные модели могут быть получены («выращены») из следующих материалов:

- порошковых полимеров для последующего литья по выжигаемым моделям;
- фотополимерных композиций, в частности, по технологии Quick-Cast для последующего литья по выжигаемым моделям или по технологии MJ (Multi Jet) для литья по выплавляемым моделям.

6.1.1. Синтез-модели из порошковых полимеров

SLS-технология. Полистирол широко используется в качестве модельного материала для традиционного литья по выжигаемым моделям. Однако в связи с бурным развитием технологий послойного синтеза приобрел особую популярность в области прототипирования, а также для промышленного изготовления штучной и малосерийной продукции. Полистирольные модели изготавливаются на AM-машинах (рисунок 6.4), работающих по SLS-технологии. Данную технологию часто применяют для изготовления отливок сложной формы относительно больших размеров с умеренными требованиями по точности.



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

а

б

в

Рисунок 6.4. SLS-машина sPro 60 (а); полистирольная модель (б); и алюминиевая отливка головки цилиндра ДВС (в)

SLS-технология относится к категории Powder Bed Fusion согласно классификации ASTM (см. Гл. 1 и рисунок 1.1 а) и заключается в следующем. Модельный материал – полистирольный порошок с размером частиц 50-150 мкм накатывается специальным роликом на рабочую платформу, установленную в герметичной камере с атмосферой инертно-

го газа – азота. Лазерный луч «пробегают» там, где компьютер «видит» в данном сечении САД-модели «тело», как бы «заштриховывая» сечение детали, как это делает конструктор карандашом на чертеже. В этом случае лазерный луч является источником тепла, под воздействием которого происходит спекание частичек полистирола (рабочая температура около 120°C). Затем платформа опускается на 0,1-0,2 мм, и новая порция порошка накатывается поверх отвержденного – формируется новый слой, который также спекается с предыдущим. Процесс повторяется до полного построения модели, которая в конце процесса оказывается заключенной в массив неспеченного порошка. Далее модель извлекают из машины и очищают от порошка. Преимуществом данной технологии является отсутствие поддержек, поскольку во время построения модель и все её строящиеся слои удерживаются массивом порошка.

Имеющиеся на рынке машины фирм 3D Systems и EOS (таблица 6.1) позволяют строить достаточно крупные модели размерами до 550x550x750 мм без необходимости склейки отдельных фрагментов, что повышает точность отливки и надежность, особенно вакуумного литья. При этом возможна высокая детализация построения моделей: могут быть построены поверхностные элементы (номера деталей, условные знаки, надписи и пр.) с толщиной фрагментов до 0,6 мм; гарантированная толщина стенки модели – до 1,5 мм.

Технологии литья по восковым и полистирольным моделям принципиально не отличаются, поскольку используются одинаковые формовочные материалы, литейное и вспомогательное оборудование. Отличия заключаются в том, что восковая модель – «выплавляемая», а полистирольная модель – «выжигаемая», а также в нюансах формования и термообработки опок, имеющих немаловажное значение.

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 исполь-

зование прокалочных печей с программаторами, так как программа выжигания полистирола существенно отличается от программы вытапливания воска. При определенном навыке и опыте литье по выжигаемым полистирольным моделям дает хороший результат (рисунок 6.5).

Таблица 6.1. Машины для технологии послойного синтеза моделей из полимерных порошковых материалов

Фирма	Модель	Рабочая зона, мм	Шаг построения, мкм	Мощность, Вт	Производительность, см ³ /ч	Модельные материалы*
3D Systems	ProX500	381x330x457	80-150	100	2000	PS, PA, стекло- и металлонаполненные композиции
	sPro 140	550x550x460	80-150	70/200	3000/5000	
	sPro 230	550x550x750	80-150	70/200	3000/5000	
	sPro 60HD	381x330x437	80-150	30	900	
EOS	EOS P 110	200x250x330	60-120	30	н/д	PS, PA, стекло- и металлонаполненные композиции
	EOS P 396	340x340x600	60-180	70	н/д	
	EOSINT P 760	700x380x580	60-180	2x50	700	
	EOSINT P 800	700x380x560	120	2x50	н/д	то же + термостойкий PA
Voxeljet	VX200	300x200x150	150		700	PMMA
	VX500	500x400x300	80-150		3000	
	VXC800	850x500x1500/2000	80-200		18000	
	VX 1000	1060x600x500	100-300		23000	
	VX 2000	2060x1060x1000	120-400		47000	
	VX 4000	4000x2000x1000	120-300		123000	
* PS – полистерол; PA – полиамид, PMMA – полиметилметакрилат						

К недостаткам технологии надо отнести следующее. Процесс спекания порошка – это тепловой процесс, характеризующийся неравномерностью распределения тепла по рабочей камере и массиву материала, короблением вследствие температурных деформаций. В результате того, что порошок полистирола не сплавляется, как например, порошки поли-

амида 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.



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

а

б

в

Рисунок 6.5. Полистирольная модель: а – после «выращивания»;
б – после инфильтрации; в – чугунная отливка

Для придания прочности и хорошего соединения с литниковой системой и формовки модель пропитывают специальным составом на восковой основе – этот процесс называется инфильтрацией. После этого модель помещают в специальную печь и при температуре около 80°С пропитывают специальным воскообразным составом (инфильтрированные модели красного цвета, из машины же извлекаются полистирольные модели снежно-белого цвета). Это также несет в себе опасность деформирования модели и требует определенных навыков персонала.

Использование инфильтрата в виде воска имеет и свои преимущества: он расплавляется в опоке при выжигании раньше полистирола и, когда полистирол приобретает текучесть, удаляет его из формы, тем самым уменьшая массу «выжигаемой» части полистирола и снижая вероятность образования золы.

В последние годы появляются новые модельные материалы. Например, в машинах EOS используется полистирол, не требующий инфильтрации воском после построения модели (рисунок 6.6). Однако это ослабляет, но не устраняет присущий SLS-технологиям недостаток. Таким образом, когда мы говорим об «умеренных требованиях к точности» при использовании SLS-технологии, то имеем в виду



(Экспонат выставки Euromold 2014)

Рисунок 6.6. Полистирольная модель и отливка детали двигателя

Следовательно, когда мы говорим об «умеренных требованиях к точности» при использовании SLS-технологии, то имеем в виду отмеченные объективные причины, по которым точность изделий, полученных SLS-технологией, не может быть выше, чем при использовании других технологий, не связанных с температурными деформациями. Таковой является технология фотополимеризации (например, SLA или DLP).

Ink-Jet-технология. В последние годы успешно применяется и другая технология получения выжигаемых синтез-моделей – Ink-Jet от компании Voxeljet Technology (Германия). В качестве модельного материала используется порошковый акриловый полимер (PMMA – полиметилметакрилат – «оргстекло», modified acrylic glass). Модельный ряд машин Voxeljet представлен на рисунке 6.7 и в таблице 6.1.



VX200



VX 500



VXC800



VX 1000



VX2000



VX4000

(Источник: www.voxeljet.com)

Рисунок 6.7. Модельный ряд машин Voxeljet

В процессе работы жидкий связующий состав впрыскивается через многосопловую головку и связывает (склеивает) основной модельный материал в соответствии с параметрами текущего горизонтального сечения CAD-модели. Один слой формируется примерно за 30 с, и таким ме-

тодом при шаге построения 0,2 мм машина может строить модели со скоростью от 12 до 48 мм в час по высоте.

В базовой версии машины VX500 и VX800 оснащаются распылительной головкой GSH 768, имеющей 768 пьезоэлектрических форсунок. В этом случае достигается разрешение 250 dpi (точек на дюйм). В качестве опции может быть установлена головка C-VKH 2656, обеспечивающая разрешение до 600 pi и возможность уменьшения шага построения до 80 мкм. Предусмотрена также опция быстрой смены контейнера, на установку которого требуется около 30 с. Машины Voxeljet позиционируются как более производительные и дешевые альтернативы машинам 3D Systems и EOS.

Модель VX1000 оснащена мощной печатающей головкой с 10624 форсунками, которая позволяет получить разрешение до 600 dpi. Толщина слоя за один проход составляет 100 мкм при ширине печати 450 мм, время создания слоя – менее 30 с.

Машины VX 2000 и VX 4000 с полным основанием можно отнести к классу индустриального технологического оборудования. Многими компаниями они рассматриваются как реальная альтернатива традиционным литейным технологиям.

В ОАО «НИАТ», ФГУП «НАМИ» (Россия) имеется опыт работ с моделями от Voxeljet для литья по выжигаемым моделям (рисунки 6.8, 6.9). К достоинствам технологии следует отнести то, что процесс построения модели ведется при комнатной температуре, что снижает риск тепловых деформаций, характерных для SLS-технологии. Модели также подвергаются инфильтрации воском, но сам процесс проходит в более щадящем режиме, чем при инфильтрации полистирольных моделей.

Говоря об SLS-технологии, отметим ещё одно, не связанное с полистиролом, но «родственное» направление, иногда используемое в литейном деле. Это «выращивание» литейной формовочной оснастки из порошкового полиамида. Полиамид широко применяется для функционального прототипирования, полиамидные модели достаточно прочные и во многих случаях позволяют воспроизвести прототип максимально близко к



(Предоставлено ОАО «НИАТ»)

Рисунок 6.8. Отливка и модель кронштейна



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

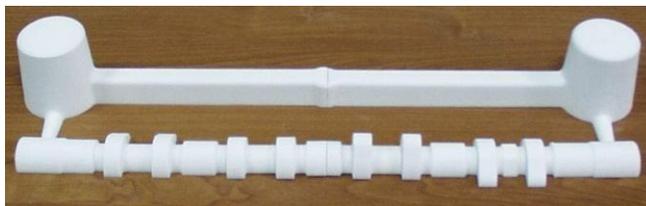
а

б

в

Рисунок 6.9. Модели VoxeJet и алюминиевые отливки: а – крышка; б – впускная труба; в – головка цилиндров ДВС

конечному изделию. В ряде случаев экономически целесообразно применять полиамидные модели в качестве альтернативы деревянным. Пример такой «быстрой» технологической оснастки для формовки распределительного вала ДВС показан на рисунке 9.10.



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.10. Полиамидная модель: SLS-модель распределительного вала и формовочный ящик

Модель «выращивают», так же, как и полистирольную. При этом по возможности делают её полой с минимально возможной толщиной стенок (с целью минимизации указанных выше температурных деформаций). Затем полость модели для придания прочности и жесткости заполняют эпоксидной смолой. После этого закрепляют в обычном формовочном ящике, красят и далее – по традиционной технологии формования. Ввиду большой длины модель «выращена» из двух частей: части склеены, заполнены эпоксидной смолой и закреплены в формовочном ящике; продолжительность операций два дня.

6.1.2. Синтез-модели из светоотверждаемых смол

Суть технологии заключается в использовании специальных светочувствительных смол, которые отверждаются избирательно и послойно в местах подвода по заданной программе луча света. Способы засветки слоя различны (лазер, ультрафиолетовая лампа, прожектор видимого света, светодиоды). Наибольшее распространение для литья металлов получили **SLA**, **Poly-Jet** и **DLP**-технологии. Первый способ предполагает последовательное «пробегание» лазерного луча по всей поверхности формируемого слоя там, где в сечении «тело» модели. Согласно второму способу отверждение производится лучом в виде линии в процессе формирования слоя за счет излучения от управляемой ультрафиолетовой лампы. Третий способ предполагает засветку всего слоя одновременно за счет создания так называемой маски – «фотографии» текущего сечения CAD-модели.

Различие в способах формирования слоев обуславливает и различие в скорости построения модели. Скорость «выращивания» по DLP- и Poly-Jet-технологиям выше. Но стереолитография по-прежнему остается самой точной технологией и применяется там, где требования к чистоте поверхности и точности построения модели являются основными и определяющими.

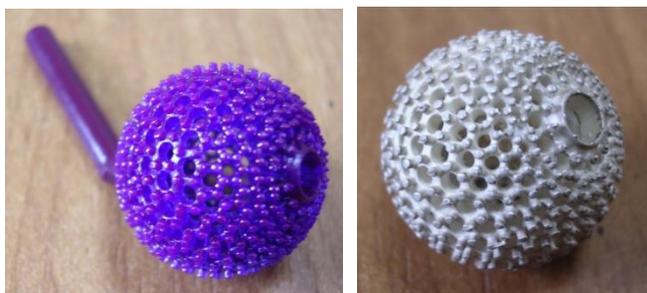
Технологии нелазерной «засветки» с заданной экспозицией, используемые, например, фирмами Stratasys и Envisiontec, во многих случаях успешно конкурируют со стереолитографией, оставляя за собой явное преимущество в скорости построения и стоимости моделей. Ряд производственных задач может быть успешно решен с помощью АМ-машин разного уровня.

Итак, рациональный выбор технологии получения моделей и, следовательно, АМ-оборудования должен проводиться с учетом конкретных производственных условий и реальных требований к моделям. В тех случаях, когда решаются разнообразные задачи целесообразно иметь две машины: одна для изготовления изделий с повышенными требованиями, вторая – для выполнения «рутинных» задач и тиражирования моделей.

SLA – лазерная стереолитография. Фирма 3D Systems – пионер в области практического освоения технологий быстрого прототипирования, в 1987 г. представила для коммерческого освоения первую стереолитографическую машину SLA-250 с размерами зоны построения 250x250x250 мм.

Основой в SLA-процессе является ультрафиолетовый лазер (твердотельный или CO₂). Лазерный луч в данном случае – не источником тепла, как в SLS-технологии, а источник света. Луч «штрихует» текущее сечение САД-модели и отверждает тонкий слой жидкого полимера в местах прохождения. Затем платформа, на которой производится построение, погружается в ванну с фотополимером на величину шага построения, и новый жидкий слой наносится на затвердевший слой, и новый контур «обрабатывается» лазером. При «выращивании» модели, имеющей нависающие элементы, одновременно с основным телом модели из того же материала строятся поддержки в виде тонких столбиков, на которые укладывается первый слой нависающего элемента, когда приходит черед его построения. Процесс повторяется до завершения построения модели. Затем модель извлекают, остатки смолы смывают ацетоном или спиртом, поддержки удаляют. Для повышения прочности модели помещают в специальную камеру дополимеризации – шкаф с ультрафиолетовой лампой.

Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое, и часто модель не требует последующей обработки. При необходимости чистота поверхности может быть улучшена – «зафиксированный» фотополимер хорошо обрабатывается и поверхность модели может быть доведена до зеркальной. В некоторых случаях, если угол между строящейся поверхностью модели и вертикалью меньше 30°, модель может быть построена без поддержек. Так могут быть построены модели, для которых не возникает проблем удаления поддержек из внутренних полостей, что позволяет получать модели, которые невозможно изготовить традиционными методами (рисунок 6.11).



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

а

б

Рисунок 6.11. Ювелирное изделие: а – SLA-выжигаемая модель;
б – серебряная отливка

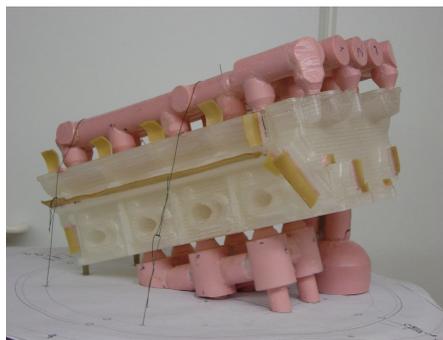
Стереолитография широко применяется в следующих направлениях:

- выращивание литейных моделей;
- изготовление мастер-моделей (для последующего получения силиконовых форм, восковых моделей и отливок из полиуретановых смол);
- создание дизайн-моделей, макетов и функциональных прототипов;
- изготовление полноразмерных и масштабных моделей для гидродинамических, аэродинамических, прочностных и других видов исследований,

но в контексте данной работы отметим первые два направления, которые важны для непосредственного получения литейных деталей.

Для изготовления литейных деталей применяют так называемые *Quick-Cast*-модели (рисунок 6.12), т. е. модели для «быстрого литья», по которым, по аналогии с восковыми моделями, могут быть быстро получены металлические отливки (рисунок 6.13, 6.14). *Quick-Cast*-модели используют в технологических процессах аналогично применению восковых и полистирольных моделей. Но есть важный нюанс. Модели *Quick-Cast* имеют сотовую структуру массива: внешние и внутренние поверхности выполняют сплошными, а само тело формируют в виде набора сот. Это, во-первых, на 70% снижает общую массу модели, а, следовательно, мень-

ше модельного материала нужно выжигать при подготовке формы к заливке металлом. Во-вторых, в процессе выжигания любой модельный материал расширяется и оказывает давление на стенки формы, при этом форма с тонкостенными элементами может быть разрушена. Сотовая же структура позволяет модели при расширении «складываться» внутрь, не создавая внутренних напряжений и не деформируя стенки формы. Это важнейшее преимущество Quick-Cast-технологии.



(Предоставлено 3D Systems u Schueltheis GmbH)

а

б

Рисунок 6.12. Quick-Cast модель: а – после выращивания; б – оснащенная литниковой системой



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.13. Алюминиевая отливка головки цилиндров

Если сравнить две отливки, полученные по выжигаемым моделям: VoxeJet – представленную выше на рисунке 6.9 б, и SLA – показанную на

рисунке 6.15, то нетрудно заметить, рисунок 6.16, разницу в чистоте поверхности отливки в пользу отливки, полученной по выжигаемой SLA-модели (рисунок 6.16 б).



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.14. Quick-cast-модель с литниковой системой и алюминиевая отливка цилиндра ДВС

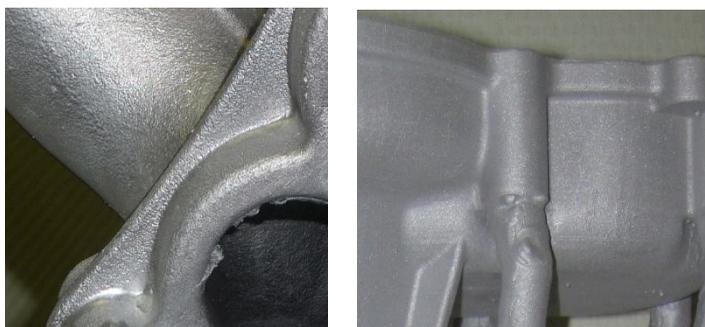


(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

а

б

Рисунок 6.15. Корпусная деталь: а – SLA-Quick-Cast-модель, оснащённая литниковой системой; б – алюминиевая отливка



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

а

б

Рисунок 6.16. Сравнение чистоты поверхности отливки: а – полученная по модели Voxeljet; б – полученная по SLA-модели по технологии Quick-Cast

Однако Quick-Cast-модели – это теряемые, разовые литейные модели, полученные без специальной оснастки. Такой способ применяют, когда требуется изготовить одну-две отливки. В тех случаях, когда необходимо получить партию (10 – 100) отливок применяют другой, более экономичный способ. «Выращенную» на SLA-машине модель используют в качестве мастер-модели. По мастер-модели делают так называемую эластичную форму (чаще всего из силикона). В эту форму заливают расплавленный воск (обычно в вакуумной камере) и получают требуемое количество восковых моделей – «восковок», которые затем используют в качестве литейных моделей, применяя известные способы литья по выплавляемым моделям (рисунок 6.17). С помощью данной технологии могут быть изготовлены литейные восковые модели с весьма сложной геометрией, рисунок 6.18.

Для получения силиконовых форм, восковых моделей и для заливки металла используют вакуумные литейные машины. Применение качественных формовочных материалов позволяет получить отливки с высокой чистотой поверхности на уровне R_z 20-40.

Формование восковок производят как в монолитные, например, гипсо-керамические, так и в оболочковые формы. В отдельных случаях SLA-модели могут быть использованы в качестве оснастки – формовочной



а



б



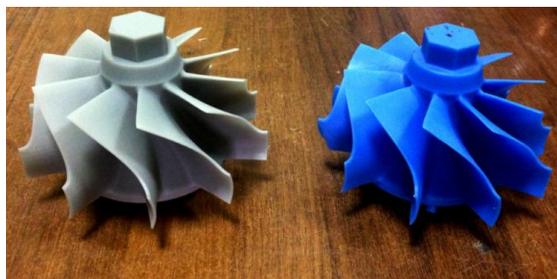
в



г

(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.17. Получение отливок с использованием SLA-мастер-модели:
а – мастер-модель (SLA); б – силиконовая форма; в – восковая модель;
г – отливка



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.18. Мастер-модель и восковка турбинного колеса
автомобильного турбокомпрессора

модели для литья «в землю». В этом случае в конструкции модели предусматривают усадочный коэффициент – литейные уклоны и радиусы для извлечения модели без повреждения формы (рисунок 6.19). Однако такой способ формовки используется редко из-за недостаточной прочности SLA-модели.



Рисунок 6.19. Передняя крышка ДВС: *а* – CAD-модель, *б* – SLA-модель в качестве формовочной модели; *в* – алюминиевая отливка «в землю»

К преимуществам технологии Quick-Cast относится точность построения модели. Поскольку процесс построения происходит при комнатной температуре, то факторы термического напряжения и деформаций отсутствуют. Малый диаметр пятна лазерного луча (0,1-0,05 мм) позволяет четко «прорабатывать» тонкие, филигранные фрагменты модели, что сделало стереолитографию популярной технологией и в ювелирном деле.

В России имеется опыт применения технологии Quick-Cast в авиационной промышленности («НИАТ» [18], «Салют» [19], «Сухой», УМПО, «Рыбинские моторы»), в энергетическом машиностроении (ОАО «ТМЗ» – Тушинский машиностроительный завод [20]), рисунок 6.20, 6.21. Некоторый опыт имеется и в научных организациях автомобильного профиля. В ФГУП «НАМИ» по этой технологии впервые в России были получены отливки таких сложных деталей, как головка и блок цилиндров автомобильного двигателя. Однако, для многих отечественных предприятий эта технология остается практически неосвоенной.



(Предоставлено ОАО «ТМЗ»)

а

б

в

Рисунок 6.20. Рабочее колесо турбины: а – SLA-модель; б – оболочковая форма; в – отливка, полученная по технологии Quick-Cast [20]

Стереолитография – «конек» фирмы 3D Systems, и фактически в этой области она является монополистом в Европе и США. Модельный ряд машин 2014 года показан на рисунке 6.22 и в таблице 6.2.



(Предоставлено ОАО «ТМЗ» и ФГУП «НАМИ»)

а

б

в

Рисунок 6.21. Рабочее колесо турбины: а, б – выжигаемая SLA-модель; в – отливка из нержавеющей стали, полученная по технологии Quick-Cast

Стереолитография позволяет получать отливки методом «direct manufacturing». SLA-машины серий ProJet 6000 и 7000 активно используются для решения задач НИОКР в университетах, применяются в ювелирной и медицинской промышленности. Точность построения 0,025-0,05 мм на 25 мм линейного размера модели. Машины могут строить модели с толщиной стенки 0,05-0,2 мм, время построения модели зависит от

загрузки рабочей платформы и от шага построения и в среднем составляет 4-7 мм в час по высоте модели.

Для литейного производства в мировой промышленности достаточно активно используются машины серии iPro (новое название серии – ProX). По требованию заказчика машины могут оснащаться ваннами различного размера. Это позволяет экономить дорогостоящий модельный материал – для построения невысоких моделей можно выбрать ванну с меньшей глубиной. В этом случае затраты для первичного наполнения ванны могут быть существенно снижены.

Как уже отмечалось, стереолитография обеспечивает наилучшую чистоту поверхности и наивысшую точность построения моделей. Существенным недостатком технологии является высокая стоимость как покупки, так и владения. Наличие лазера делает SLA-машины относительно дорогими и требует регулярного технического обслуживания. Стоимость расходных материалов находится в пределах 250-300 евро/кг, что сопоставимо со стоимостью модельных материалов других фирм.



(Источник: www.3dsystems.com)

ProJet SD 6000 (7000)

iPro™ 8000

iPro™ 9000

Рисунок 6.22. SLA-машины компании 3D Systems

Стоимость SLA-моделей на аутсорсинге в Европе и России примерно одинаковая, зависит от региона и находится в пределах 1,0-2,0 евро/см³. При этом стоимость собственно расходного материала – фотопо-

лимера (с учетом дополнительного расхода на поддерживающие структуры) составляет 0,35-0,4 евро/см³.

Номенклатура модельных материалов постоянно увеличивается и меняется по качеству. В настоящее время основными материалами являются:

- VisiJet Flex – полипропилен-подобный, эластичный, белый матовый, оптимальный для прототипирования защелок и пр. гибких элементов;
- VisiJet Tough – ABS-подобный, с повышенной ударной прочностью для мастер-моделей, функциональных испытаний;
- VisiJet Clear – поликарбонат-подобный для прототипирования прозрачных изделий;
- VisiJet HiTemp – с повышенной термостойкостью (до 130°C);
- VisiJet e-Stone – для применения в зубопротезировании и т. д.

Таблица 6.2. Основные параметры SLA-машин компании 3D Systems

Модель	Рабочая зона, мм	Мощность лазера, мВт	Толщина слоя построения, мм. В режиме*:		
			HD	UHD	XHD
ProJet 6000 SD	250x250x250	2000	0,125	0,1	-
ProJet 6000 HD	250x250x125				0,05
ProJet 6000 MP	250x250x50				0,05
ProJet 7000 SD	380x380x250	2000	0,125	0,1	-
ProJet 7000 HD	380x380x50				0,05
ProJet 7000 MP					0,05
iPro 8000 (ProX 800)	650x350x300 650x750x50 650x750x275 650x750x550	1450	0,05-0,15		
iPro 9000	1500x750x550	1450			
* HD –High Definition – высокое разрешение; UHD – Ultra HD – повышенное разрешение; XHD – Extra HD – наивысшее разрешение.					

Технология DLP. Разработчиком технологии является международная компания Envisiontec, которая свои первые машины выпустила в 2003 году. В машинах Envisiontec семейства Perfactory применяется ори-

гинальная технология DLP – Digital Light Procession, разработанная компанией Texas Instruments® для получения качественной цифровой проекции. Ключевым элементом проекторов, работающих по DLP-технологии, является цифровое мультизеркальное устройство (Digital Micromirror Device, или DMD) – матрица жестких зеркал из алюминиевого сплава, обладающего высоким коэффициентом отражения (рисунок 6.23). Зеркала крепятся к подложке, которая через подвижные пластины соединяется с основанием матрицы. Под противоположными углами зеркал размещены электроды, соединенные с ячейками памяти. Под действием электрического поля подложка с зеркалом принимает одно из двух положений, отличающихся на 20° благодаря ограничителям, расположенным на основании матрицы. Два этих положения соответствуют отражению поступающего светового потока соответственно в объектив и светопоглотитель. Площадь каждого зеркала матрицы составляет 16 мкм и менее, расстояние между зеркалами – около 1 мкм. Изменением соотношения времени, в течение которого зеркало находится в разных положениях, регулируется яркость проецируемого изображения. В настоящее время разрешение DMD соответствует SXGA. Весь DMD-элемент имеет среднее время жизни около 6 лет при работе проектора 10 час/день.

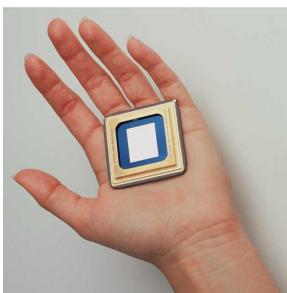


Рисунок 6.23. DMD – Digital Micromirror Device

При построении модели формируется так называемая «маска» каждого текущего сечения САД-модели, которая проецируется на рабочую платформу через систему DMD-элементов (зеркал) с помощью про-

жектора с высокой яркостью света. Причем каждый слой (сечение САД-модели) разбивается не на «плоские» пиксели, а на «объемные» – воксели (voxel) размерами $XYZ=16 \times 16 \times 15$ мкм. Размер вокселя может регулироваться по XY в диапазоне 16-69 мкм, по Z – 15-150 мкм. Таким образом, процесс построения можно представить как сборку модели из мельчайших строительных блоков. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя происходит в течение 3-7 с.

Следовательно, если в SLA-машинах применяется «точечный» принцип засветки, то в машинах Envisiontec – «поверхностный», т. е. осуществляется засветка всей поверхности слоя. Этим объясняется весьма высокая скорость построения моделей – в среднем 25 мм/час по высоте при толщине слоя построения 0,05 мм. Материал поддержек – тот же, что и основной материал – акриловый фотополимер.

Модели Envisiontec используют так же, как и SLA-модели, в качестве мастер-моделей и выжигаемых литейных моделей. Качество моделей уступает SLA-моделям только по точности, что связано с применением акриловых фотополимеров, имеющих коэффициент усадки при полимеризации, равный 0,6%, в машинах 3D Systems используют малоусадочные эпоксидные фотополимеры. Модели Envisiontec (рисунок 6.24) характеризуются достаточно высокой точностью и чистотой поверхности, прочностью и удобством в обращении при весьма умеренной (по сравнению со стереолитографией) стоимости. Преимуществом технологии Envisiontec является высокая скорость построения моделей и, следовательно, производительность АМ-машины, хорошая выжигаемость моделей и малая



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

а

б

Рисунок 6.24. Модели Envisiontec: а – выжигаемая литейная модель; б – функциональная модель

зольность. Технология DLP – весьма перспективна и эффективна для литейного производства. Так, например, время построения с учетом подготовительно-заключительных операций впускной трубы высотой 32 мм и ресивера высотой 100 мм составляет 1,5 и 5 часов, соответственно. На сопоставимой по размерам SLA-машине Viper si2 для построение таких моделей необходимо не менее 5,5 и 16 часов, соответственно.

Компания Envisiontec выпускает несколько видов принтеров, ориентированных на применение в медицине, ювелирном деле. Для целей промышленного литейного производства представляют интерес три модели – Ultra, Xtreme и Xede (рисунок 6.25). Машина Xtreme имеет один цифровой прожектор с разрешением 1400x1050 пикселей, Xede – два прожектора. Модели требуют пост-обработки – удаления поддержек и в ряде случаев, как и стереолитография – дополимеризации.

Эффективная рабочая зона построения и толщина слоя построения регулируются сменой линз оптической системы. Особенностью машин



(Источник: www.envisiontec.com)

Параметры	Ultra	Xtreme	Xede
Размеры зоны построения, мм	266x175x193	254x381x330	457x457x457
Макс. разрешение по XY, мкм	50-100	100	100

Рисунок 6.25. AM-машины компании Envisiontec

серий Xtreme и Xede является то, что в отличие от других технологий, здесь используется не дискретное, пошаговое, а непрерывное движение платформы вниз с малой скоростью. Такой способ засветки делает поверхность модели более гладкой, без ярко выраженных ступенек, характерных для других технологий послойного синтеза.

Большой выбор материалов для мастер-моделей, выжигаемых моделей и моделей для вакуум-формовки (выдерживающих до 150°C), а также для концептуального моделирования делает эти машины особенно привлекательными в тех случаях, когда требуется изготавливать большое количество и широкую номенклатуру моделей в разнообразном спектре назначения. В США и Европе машины Envisiontec широко используются, в частности, в серийном производстве слуховых аппаратов и в изготовлении приспособлений для коррекции зубов.

МММ-технология. По классификации ASTM, технология МММ – Multi Jet Modeling – относится к категории Material Jetting (см. Гл. 2). Применительно к литейным-задачам она используется для получения «восков» - воскоподобные синтез-модели для последующего литья по выплавляемым моделям. Модели строят на 3D-принтерах с использованием специального модельного материала, в состав которого входит светочувствительная смола – фотополимер на акриловой основе и литейный воск (более 50% по массе). Фотополимер является связующим элементом. Материал многоструйной головкой послойно наносится на поверхность рабочей платформы, отверждение каждого слоя производится за счет облучения ультрафиолетовой лампой.

Принтеры серии (рисунок 6.26) компании 3D Systems специально разработаны для «выращивания» моделей для точного литья металлов в гипсокерамические и оболочковые формы (рисунок 6.27, 28).

Модель ProJet 3510 HD имеет два режима построения модели – «стандартный» с разрешением (XYZ) 375x375x790 точек на дюйм (шаг построения 32 мкм) и размерами зоны построения 298x185x203 мм и «высокоточный» UHD – Ultra High Definition с разрешением (XYZ) 750x750x890 точек на дюйм (шаг построения 29 мкм) и размерами зоны

построения 127x178x152 мм. Принтер ProJet 3500 HDMax имеет еще большее разрешение (XYZ) 750x750x1600 точек на дюйм (режим XHD – Xtreme High Definition, шаг построения 16 мкм), но на всей зоне построения 298x185x203 мм. Принтер ProJet 3510 HDPlus может работать в режиме XHD на уменьшенной до 127x178x152 мм зоне построения (см. также таблицу 6.3).



(Источник: www.3dsystems.com)

ProJet 3510 HD (HDPlus)

ProJet 5000

ProJet 5000X

Рисунок 6.26. MJM- машины компании 3D Systems



(Предоставлено 3D Systems)

Рисунок 6.27. Литейные модели

Особенностью технологии MJM так же, как и стереолитографии, является наличие поддерживающих структур – поддержек, которые строятся для удержания нависающих элементов модели в процессе построения. В качестве материала для поддержек используется восковой поли-

мер VisiJet® S300 с низкой температурой плавления, который после построения модели удаляется струёй горячей воды. Модельные материалы VisiJet M3 и материал поддержек VisiJet® S300 содержится в виде баллонов-картриджей.

Машина ProJet 5000 ориентирована на изготовление дизайн- и функциональные прототипы, отличается *большой* зоной построения и *большой* производительностью. Модельные материалы: VisiJet® M5 Back, VisiJet® M5 MX, VisiJet® M5-X – представляют собой ABS- и PP-подобные фотополимерные смолы.



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.28. Оболочковая форма и чугунная отливка корпуса турбины, полученные по восковой синтез-модели

Таблица 6.3. MJM-принтеры компании 3D Systems

Модель	Размер зоны построения, мм	Шаг построения, мм	Модельные материалы VisiJet
ProJet 3510SD	298x185x203	32	M3-X, M3 Black, M3
ProJet 3510HD	298x185x203 127x178x152	29	Crystal, M3 Proplast, M3 Navy, M3
ProJet 3510 HDPlus	298x185x203 203x178x152	32 29, 16	Techplast, M3 Pro-cast
ProJet 3500 HDMax	298x185x203	32, 29, 16	
ProJet 5000	533x381x300	64, 32	M5, M5 MX, M5-X

Принтер ProJet 5000X позволяет производить цветную печать, используя одновременно материалы разного цвета – белый, чёрный, прозрачный и несколько оттенков серого, рисунок 6.29.

В MJM-принтерах компании 3D Systems точность построения (в зависимости от конфигурации, ориентации и размеров модели) – в пределах 0,025-0,05 мм на длине в один дюйм (25,4 мм). Принтеры позволяют строить модели с толщиной стенок до 1 мм, в отдельных случаях до 0,8 мм. Крупные модели могут быть построены частями и затем склеены.



(Предоставлено 3D Systems)

Рисунок 6.29. Литейные модели

Недостаток технологии – относительно высокая стоимость расходных материалов – около 400 евро/кг. Преимущество – скорость получения модели и высокое качество модельного материала с точки зрения собственно технологии литья по выплавляемым моделям (формовки, вытапливания модели).

6.1.3. Технологии и машины для синтеза песчаных литейных форм

6.1.3.1. Общие сведения о технологиях синтеза песчаных форм

В последние годы динамично развивается направление непосредственного «выращивания» песчаных форм для литья металлов. Для производства песчаных литейных форм используется АМ-технологии послойного спекания плакированного песка лазерным лучом (фирма EOS) и

последующего нанесения связующего состава, или Ink-Jet-технология (ExOne).

Технология фирмы EOS (Германия) представляет собой разновидность SLS-технологии. Различие состоит в том, что в качестве модельного материала используется литейный (силикатный или циркониевый) предварительно плакированный полимером песок. Плакирование песка производят в специальном смесителе, где песок смешивают с жидким связующим, и таким способом, каждая частичка песка покрывается тонким слоем связующего. При построении модели в АМ-машине тепловое воздействие лазера приводит к расплавлению связующего, и частички песка «склеиваются». После спекания получается «грин-модель», требующая аккуратного обращения при очистке. Для закрепления очищенных мест их сразу обрабатывают вручную пламенем газовой горелки. После завершения очистки фрагменты формы помещают в прокалочную печь и окончательно (при температуре 300-350°C) отверждают массив формы. Затем «выращенные» фрагменты формы собирают и подготавливают к заливке металлом обычными методами.

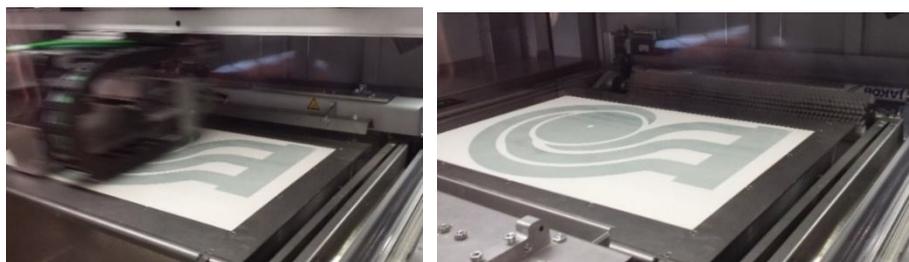
Технология фирмы ExOne – это технология последующего нанесения связующего состава, или Ink-Jet-технология. Она отличается от ММ-технологии тем, что на рабочую платформу впрыскивается не строительный материал, а связующий состав, рисунок 6.30.

Строительный материал (литейный песок) подают и разравнивают на рабочей платформе послойно с шагом 0,2-0,4 мм аналогично SLS-системам. После завершения построения рабочий бункер извлекают из машины, модели очищают и подготавливают к сборке. В этом случае дополнительной термообработки «выращенных» песчаных моделей не требуется.

Независимо от метода построения собственно формы алгоритм действий конструктора-технолога практически одинаков – последовательность операций выглядит следующим образом (рисунки 6.31, 32):

- создают САД-модель изделия, назначают припуск на обрабатываемые поверхности, рисунок 6.31а;

- согласно рекомендациям технолога, проектируют литниковую систему, которая сочленяется с основной САД-моделью, модель масштабируют в соответствии с коэффициентом усадки литейного материала, получают технологическую САД-модель, рисунок 6.31б;
- создают САД-модели стержней (рисунки 6.31в, г) и внешних форм, рисунок 6.31д.



(Экспонаты выставки Euromold 2014)

а

б

Рисунок 6.30. Построение литейной формы: а – многосопловая головка селективно впрыскивает связующее на свежесформированный слой песка; б – связующее нанесено, машина готова к формированию следующего слоя песка

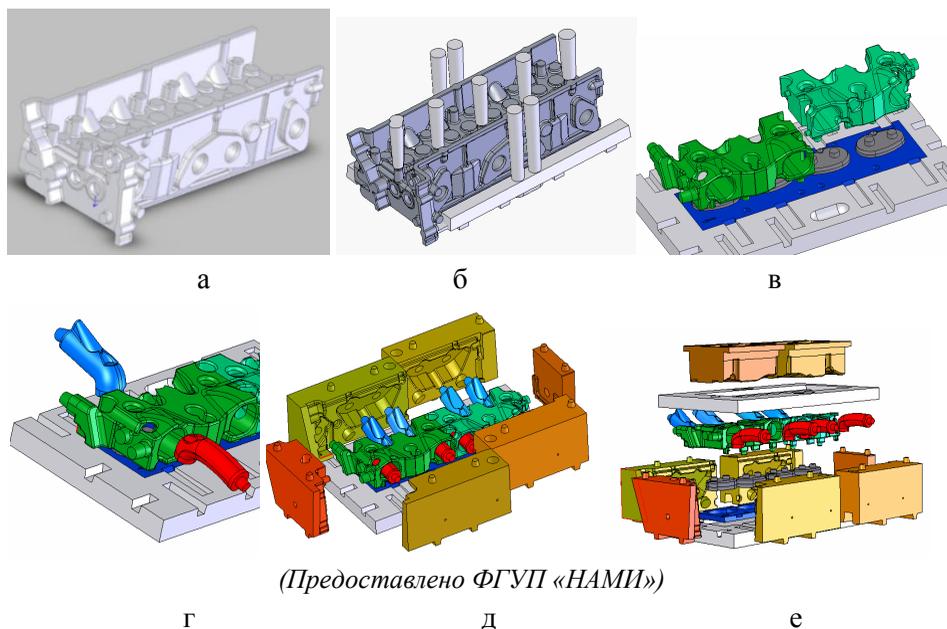
В завершение процесса проектирования создаются stl-файлы литейной формы, расчлененной на фрагменты в соответствии с размерами рабочей камеры АМ-машины, рисунок 6.31е. На этом завершается основной конструкторско-технологический этап.

Следующим этапом является моделирование процесса литья. Современные программные продукты, такие как:

- Magma (Magma GmbH, Германия);
- ProCAST (ESI Group, Франция);
- QuikCAST (ESI Group, Франция);
- СКМ ЛП «ПолигонСофт» (ООО «Полигон», Россия);
- LVMFlow (НПО МКМ, Россия),

позволяют произвести виртуальную заливку металла и рассчитать основные параметры состояния металла как при заливке, так и в процессе кристаллизации и остывания. Такое моделирование позволяет оптимизировать потоки металла в форме, оценить вероятность «замораживания» потока, возникновения газовых пробок, усадочных раковин, внутренних напряжений и т. д. В случае необходимости в конструкцию формы вносят изменения, и процесс повторяют до получения удовлетворительного результата.

Этап расчётного моделирования может быть проведён до проектирования литейной формы и совмещён с процессом создания литниковой системы. После этого в процесс создания отливки подключается АМ-машина. Оператор машины формирует задание на построение: распола-



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.31. Проектирование литейной формы:

- а – исходная САD-модель; б – проектирование литниковой системы;
- в, г – проектирование стержней; д – проектирование внешних формообразующих; е – литейная форма в сборе



а



б



в



г



д



е

(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.32. Изготовление песчаной формы для литья головки цилиндров ДВС: а – процесс спекания плакированного песка (SLS-технология); б – извлечение фрагментов формы из АМ-машины; в – очистка; г, д – фрагменты, очищенные и предварительно обработанные пламенем горелки; е – сборка формы



Ж



З



И



К

(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.32. Изготовление песчаной формы для литья головки цилиндров ДВС (продолжение): ж, з – установка формы в опоку и заливка металла; и – выбивка формы, очистка отливки; к – отливка после очистки и обрезки литников

гает фрагменты формы в виртуальном пространстве рабочего бункера; назначает параметры рабочего процесса (шаг построения и пр.) и включает машину в режим работы – начинается послойный синтез.

После завершения построения фрагменты песчаной формы с известными предосторожностями извлекают из бункера и очищают (рисунок 6.32 б, в, г, д), если необходимо, проводят пост-обработку, собирают (6.32 е), стыкуют, герметизируют швы, устанавливают холодильники

и т. д., помещают в опоку (6.32 ж) и заливают металл (6.32 з). После остывания форму разбивают, извлекают отливку (6.32 и) и обрезают литники (6.32 к).

6.1.3.2. Машины для синтеза песчаных форм

Машины компании ExOne, рисунок 6.33, 34, ранее производились под брендом «ProMetal», отличаются высокой производительностью и ориентированы для производства не только штучной, но и серийной продукции.



(Источники: www.exone.com, экспонат выставки Euromold 2014)

Рисунок 6.33. Машины ExOne: S-Max и S-Print

Выработка всего объема бункера машины S-Max – около 800 кг, при непрерывной работе машины требуется два дня. Скорость построения моделей – 12-28 мм/ч по высоте, на формирование слоя необходимо около 40 с. Машина может работать с тремя видами связующего: фурановым, фенольным и специально разработанным неорганическим (для «экологически чистого» литейного производства). Машина чувствительна к качеству песка – размер частиц не должен превышать 140 мкм. Производительность машины является существенным преимуществом в условиях промышленного производства. Базовая стоимость машины S-Max составляет 1,4 млн. евро.

В упомянутых выше машинах Voxeljet VX200, VX500, VXC800, VX 1000, VX 2000 и VX 4000, см. рисунок 6.7, модельным материалом

для послойного синтеза может быть не только полимерный порошок РММА, но и литейные пески. Машины Voxeljet работают по такому же принципу, что и машины ExOne.



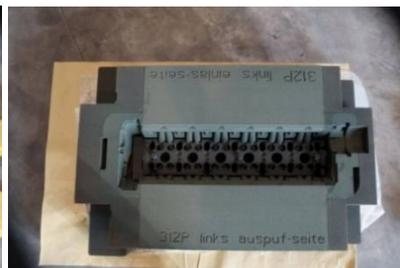
(Предоставлено ОАО «НИИТ»)

а



(Экспонат выставки Euromold 2014)

б



(Источник: www.3ders.org/articles/20140521-legendary-ferrari)

в

Рисунок 6.34. Машина S-Max: а – процесс очистки и извлечения фрагментов песчаных форм; б – песчаные стержни для литья головки цилиндров ДВС; в – синтезированная песчаная форма для литья головки цилиндров двигателя Ferrari

Основным преимуществом машин ExOne и Voxeljet является высокая производительность и возможность построения относительно крупногабаритных форм и стержней (рисунок 6.35).

В машине EOS S750 (рисунок 6.36) используется SLS-технология. Возможности машины позволяют строить филигранные фрагменты формы размерами до 1 мм. Рабочая зона построения составляет 720x380x380 мм, шаг построения – 0,2 мм, точность построения – 0,3 мм (на длине 720

мм). Машина отверждает до 2500 см^3 песка в час (S-Max – $7500 \text{ см}^3/\text{час}$). Несмотря на трудоемкость получения моделей и меньшую производительность машины, EOS S750 обладает несомненным преимуществом по точности построения моделей и чистоте поверхности. EOS S750 изготавливает формы и стержни, недоступные по сложности другим технологиям. Эти машины применяются там, где существуют повышенные требования к точности литья и чистоте поверхности отливок (рисунок 6.36).



(Экспонаты выставки Euro mold 2012)

Рисунок 6.35. Синтезированные песчаные формы (ExOne)

Особенностью технологии является то, что для работы машины необходим плакированный песок, который нужно закупать у фирмы-изготовителя машины или создать на месте производственные мощности для плакирования песка. Для увеличения скорости работы в машине используется система с двумя лазерами.

Стоимость машины относительно высокая – от 800 тыс. евро. Стоимость содержания (пост-гарантийного обслуживания) также достаточно высокая – стоимость годового сервисного контракта составляет более 30 тыс. евро.



(Предоставлено EOS GmbH)

Рисунок 6.36. Машина EOS S750

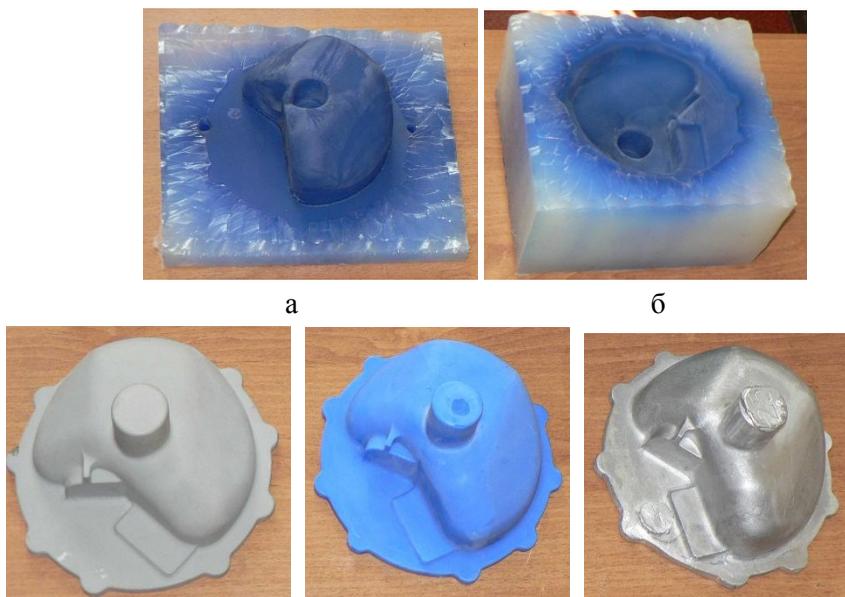
Таблица 6.4. Машины для послойного синтеза песчаных форм и стержней

Фирма	Модель	Зона построения, мм	Шаг построения, мкм	Произво- дительность, см ³ /ч
ExOne	S-Max	1800x1000x700	280-500	60000-85000
	S-Print	800x500x400	280-500	20000-36000
Voxeljet	VX500	500x400x300	80-150	3000
	VXC800	850x500x1500/2000	80-200	18000
	VX 1000	1060x600x500	100-300	23000
	VX 2000	2060x1060x1000	120-400	47000
	VX EOS 4000	4000x2000x1000	120-300	123000
EOS	EOS S750	720x380x380	200	2500

6.2. Литье полимеров с использованием синтезированных мастер-моделей

Изготовление высокоточных мастер-моделей - это наиболее динамично развивающаяся ветвь АМ-технологий. Синтезированные из фотополимерных композиций модели используются в качестве мастер-

моделей для изготовления эластичных (силиконовых) форм, посредством которых затем получают восковые литейные модели (восковки) либо отливки из литейных полимеров, например, полиуретановых смол. Использование силиконовых форм чрезвычайно эффективно при штучном и малосерийном производстве восковок. При этом достигается высокое качество восковок (рисунок 6.37).



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

в

г

д

Рисунок 6.37. Литье в силиконовые формы:

а, б – силиконовая форма; в – мастер-модель; г – восковая модель;
д – металлическая отливка.

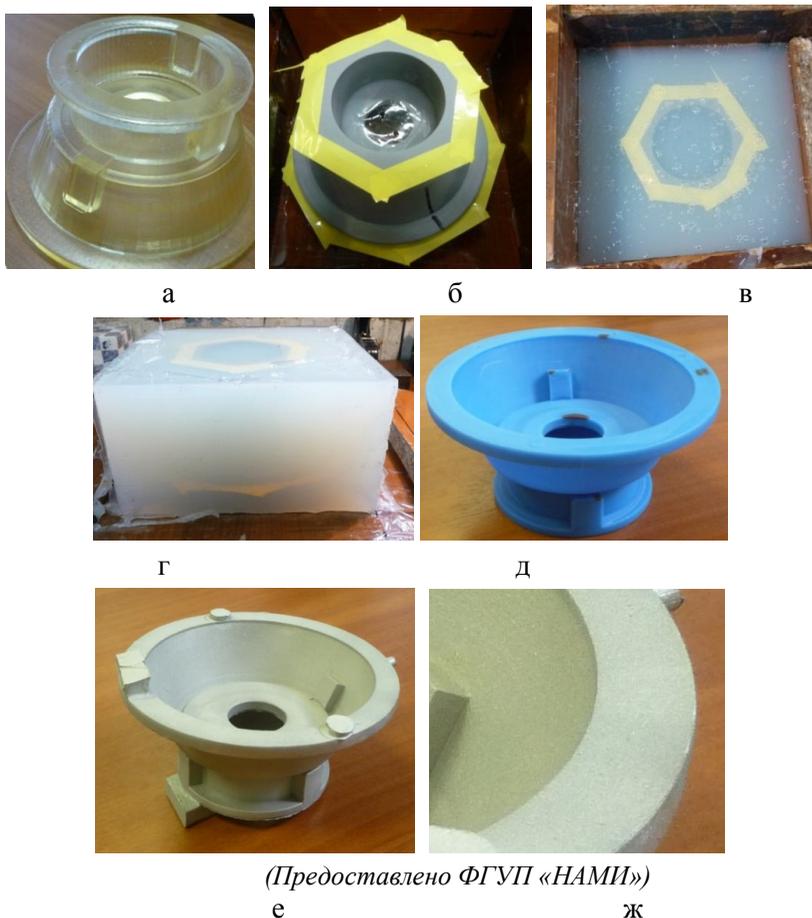
Мастер-модели обычно «выращивают» на SLA- или DPL-установках, обеспечивающих наилучшую чистоту поверхности и высокую точность построения модели. Достаточно высокое качество для использования в указанных целях имеют также модели, полученные на 3D-принтерах типа ProJet (3D Systems) и Objet Eden (Stratasys).

Технологии литья в эластичные формы получили широкое распространение в мировой практике. В качестве материала форм используют различные силиконы (смесь двух исходно-жидких компонентов, А и В, которые при смешении в определённой пропорции полимеризуются и образуют однородную относительно твёрдую массу). Силикон – как материал, обладающий малым коэффициентом усадки и относительно высокой прочностью и стойкостью. Эластичные формы получают путём заливки мастер-моделей силиконом в вакууме. Мастер-модель располагают обычно в деревянной опоке (рисунок 6.38 б, в), опоку помещают в вакуумную литейную машину, где предварительно в специальной ёмкости производят смешение компонентов А и В, затем силикон выливают в опоку. Вакуум применяют с целью удаления воздуха из жидких компонентов и обеспечения высокого качества формы и отливок. После заливки в течение 20-40 мин силикон полимеризуется.

В комплект поставки оборудования для вакуумного литья, как правило, входит собственно вакуумная машина (одно- или двухкамерная) и два термощкафа. Один термощкаф предназначен для хранения расходных материалов при температуре около 35°С. Второй термощкаф, в котором поддерживается температура около 70°С, используется для предварительной термоподготовки силиконовой формы непосредственно перед заливкой. Размеры второго термощкафа должны соответствовать размерам вакуумной камеры машины. После заливки полиуретановой смолы форму возвращают в печь, где происходит полимеризация смолы в оптимальных условиях.

Используя специальные технологические приёмы, форму разрезают на две или несколько частей, в зависимости от конфигурации модели, затем модель извлекают из формы. После этого форму снова собирают и используют для заливки воска – получения «восковок», рисунок 6.38 г. Обычно стойкость формы – до 100-500 циклов, что достаточно для изготовления отливок опытной серии деталей. Эти технологии весьма эффективны для производства опытно-промышленных партий и малосерийной продукции в авиационной, медицинской и приборостроительной

отраслях. Широкий спектр силиконов и полиуретановых смол позволяет изготавливать отливки с ударо- и термостойкими свойствами, различной жёсткости в разнообразной цветовой гамме.



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»
 е ж

Рисунок 6.38. Технологический процесс получения металлической отливки методом быстрого прототипирования: а – SLA-мастер-модель; б – мастер-модель окрашена и подготовлена к заливке силиконом; в – заливка силиконом; г – силиконовая форма; д – восковка, полученная заливкой воска в силиконовую форму; е – алюминиевая отливка; ж – увеличенный фрагмент отливки

Современные предприятия, изготавливающие металлические отливки по выплавляемым моделям для целей опытного и мелкосерийного производства, обычно имеют в составе технологического оборудования АМ-машину для «выращивания» мастер-моделей и машину для вакуумного литья в силиконовые формы (рисунок 6.39).

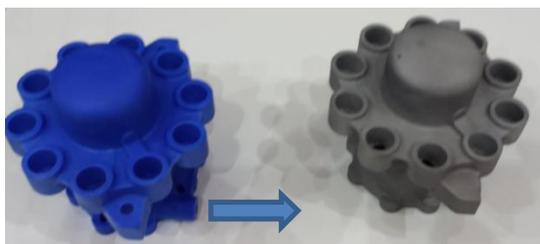


Рисунок 6.39. Литейные машины SLM Solutions

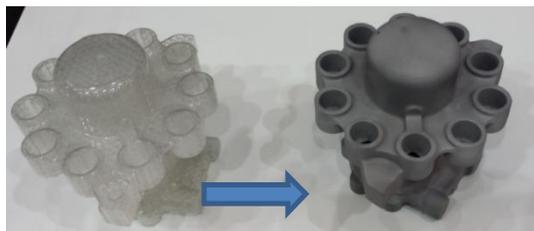
АМ-технологии позволяют получать детали сложной конфигурации, которые в принципе невозможно изготовить традиционными методами, например неразъемные пресс-формы с внутренними каналами охлаждения.

Для литейного производства эти технологии представляют несомненный интерес, в частности для изготовления литейной оснастки – форм, как для получения восковых моделей в серийном производстве или отливок из пластмасс, так и для непосредственного литья металлов (кокили, формообразующие литейной оснастки).

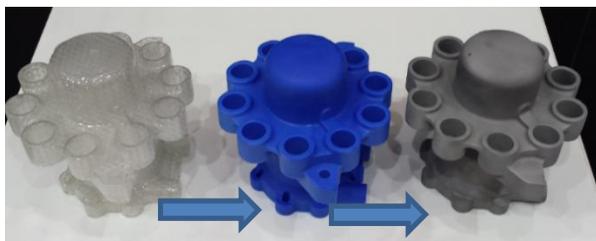
Таким образом, в зависимости от конкретной ситуации одна и та же деталь может быть получена либо методом «выращивания» «восковки» на принтере типа ProJet 3510 HD, рисунок 6.40 а; либо используя фотополимерную модель по технологии Quick-Cast, рисунок 6.40 б, либо с использованием «выращенной» мастер-модели и восковки, полученной через силиконовую форму, рисунок 6.40 в).



а



б



в

(Экспонаты выставки Euromold 2014, 3D Systems)

Рисунок 6.40. Методы получения металлической отливки, используя: а – синтезированную восковую модель; б – Quick-cast модель; в – выращенную мастер-модель и восковку, полученную в силиконовой форме

Для эффективного использования аддитивных технологий в литейном деле инженер-технолог, помимо знаний нюансов различных видов АМ-технологий и АМ-машин, должен знать:

- точное число деталей;
- реальные сроки изготовления деталей;
- приоритетные требования (точность, чистота поверхности и т. д.);

- стоимость расходных материалов;
- стоимость обслуживания и амортизации оборудования;
- стоимость труда обслуживающего персонала и других производственных затрат.

Точный учёт всех составляющих технологического процесса, умелое сочетание аддитивных технологий и традиционных методов литья позволяют вывести литейное производство на качественно новый уровень.

6.3. Оснащение литейного участка для эффективного использования аддитивных технологий

Литейное производство – одна из отраслей промышленности, в которой аддитивные технологии нашли практическое применение в самой ранней стадии своего становления. С середины 90-х годов АМ-технологии стали использоваться в опытном и малосерийном производстве, и к настоящему времени именно эта ниша оказалась наиболее благоприятной для дальнейшего развития АМ-технологий как самих по себе, так и в сочетании с традиционными технологиями литья. Как показал опыт, именно такое сочетание дает максимальный экономический эффект. Использование АМ-технологий позволяет создать очень компактные производственные участки, не требующие больших производственных и вспомогательных площадей, многочисленного персонала. Применение АМ-технологий позволяет минимизировать или вовсе исключить труд модельщика, формовщика в привычном понимании. Ручной труд в значительной степени вытесняется квалифицированным интеллектуальным трудом конструкторов-технологов, операторов 3D-принтеров и ЧПУ-станков, разрабатывающих программные средства для управления оборудованием. За рубежом динамичное развитие получили так называемые сервис-бюро или Центры аддитивных технологий, часть из которых ориентирована на изготовление продукции с активным применением аддитивных технологий (Одним из лучших европейских предприятий такого типа является компания АСТech GmbH). Это не значит, что такой

Центр оснащен исключительно АМ-машинами. Это значит, что ключевой технологией, позволяющей достичь конкурентного преимущества, является технология послойного синтеза в том или ином её виде. И, как правило, такие Центры ориентированы на изготовление не просто отливки, а конечной детали с необходимой механо-, термообработкой, окраской и т. д., то есть изделия с максимальной добавленной стоимостью. В таких Центрах аддитивные и традиционные технологии дополняют друг друга и усиливают коммерческий эффект.

В оснащение типичного Центра аддитивных технологий входят следующие основные группы оборудования:

- Аддитивные машины (изготовление литейных и мастер-моделей).
- Формовочное оборудование (изготовление гипсокерамических монолитных и керамических оболочковых форм).
- Термическое оборудование (вытапливание восковых и выжигание полистирольных моделей, прокалка форм, термообработка отливок).
- Литейное оборудование (атмосферное, вакуумное, центробежное и т. д. литьё).
- Контрольно-измерительное оборудование (контроль химического анализа металла, измерение твердости, контроль геометрии моделей и отливок, контроль внутренней структуры отливок, входной и выходной контроль).
- Механообрабатывающее оборудование (финишная обработка).

В структуре Центра должны быть предусмотрены также и традиционные вспомогательные службы: склад для хранения металлов и расходных материалов, участок для очистки и сборки моделей, участок для размывки опок и очистки отливок от формомассы, склад готовой продукции и т. д.

В России большой практический опыт в этой области имеет Центр Быстрого Прототипирования ФГУП «НАМИ» (сейчас – Центр Технологий «НАМИ»), Научно-технический комплекс (НТК) «Цифровые технологии» ОАО «НИАТ», компания АБ Универсал – все Москва, а также

предприятия из Санкт-Петербурга - «НИИМаштех», СПбГПУ и ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

НТК «Цифровые технологии», например, разрабатывает и предлагает производственные комплексы, ключевым звеном которых являются технологии послойного синтеза. Компания проповедует модульный принцип построения комплексов, которые могут быть легко переформатированы под задачи конкретного производства. Комплекс содержит следующие основные модули (рисунки 6.41-6.45):

- конструкторско-технологический модуль или САД-модуль — разработка 3D моделей деталей, отливок, оснастки. Компьютерное моделирование процессов литья. Разработка специальной технологии изготовления литых заготовок различных габаритов;
- модуль «Песчаные формы» — прямое изготовление песчаных форм и стержней для гравитационного литья, литья под низким давлением и изготовление форм для точного литья заготовок штамповой и кокильной оснастки, рисунок 6.41;
- модуль «Силиконовые формы» - создание силиконовых форм для последующего изготовления восковых моделей или литья пластмассовых деталей из полиуретановых композиций, рисунок 6.42;
- модуль «Выжигаемые модели» — прямое изготовление выжигаемых моделей для точного литья в керамические формы алюминиевых и титановых сплавов, сталей и чугунов, рисунок 6.43;
- модуль «Синтез» — прямое изготовление прототипов, функциональных металлических деталей, формообразующих частей оснастки селективным лазерным плавлением металлических порошков, рисунок 6.44;
- модуль «Литье» — литье заготовок деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, сталей, чугуна, титана;
- модуль «Контроль геометрии» — бесконтактная оптическая оцифровка, контроль геометрии и реверсивный инжиниринг деталей, заготовок и оснастки, рисунок 6.45;
- модуль «Неразрушающий контроль» — неразрушающий контроль деталей, литых заготовок и оснастки на основе компьютерной томографии.

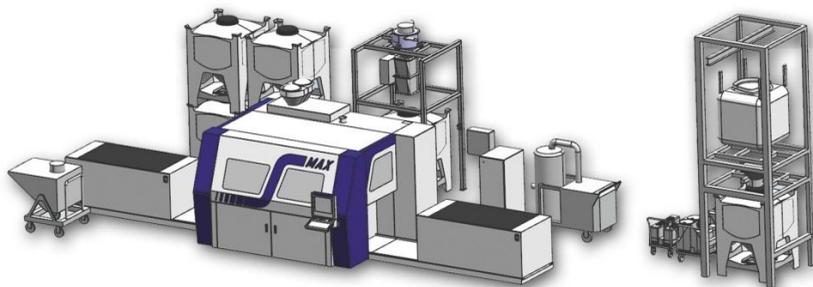


Рисунок 6.41. Модуль «Песчаные формы» на базе АМ-машины S-Max

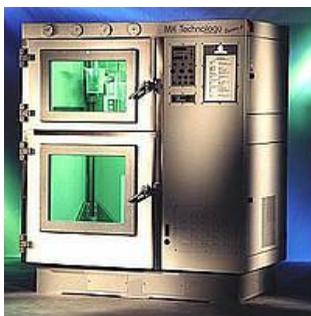


Рисунок 6.42. Модуль «Силиконовые формы» на базе вакуумной машины System 2 (МК Technology)

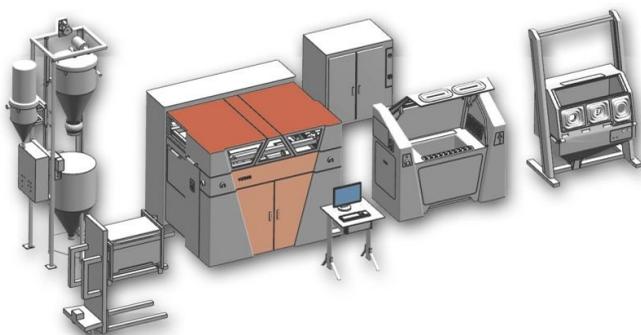


Рисунок 6.43. Модуль «Выжигаемые модели» на базе АМ-машины Voxeljet

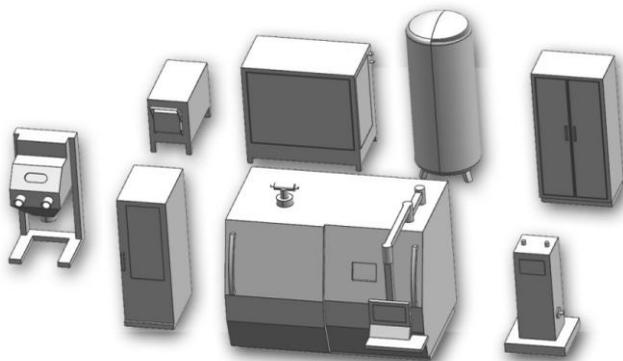


Рисунок 6.44. Модуль «Синтез»
на базе АМ-машин компании Concept Laser



Рисунок 6.45. Роботизированный модуль «Контроль геометрии»
на базе фотограмметрической системы ATOS Triple Scan

Технологический комплекс измерений и инспекционного контроля геометрии на базе системы ATOS Triple Scan позволяет за короткое время с высокой точностью оцифровать объект с поверхностью любой сложности и получить его трёхмерную полигональную модель. При этом решаются задачи, возникающие в производстве и при его подготовке, требующие эффективных измерительных технологий. Состав каждого модуля ПТК сформирован таким образом, что может выполнять свои функции самостоятельно при решении отдельной задачи, а также может интегрироваться с другими модулями и технологиями действующего ли-

тейного производства. Такой подход позволяет создавать единое информационное конструктивно-технологическое пространство и реализовать принцип сквозных цифровых технологий [29].

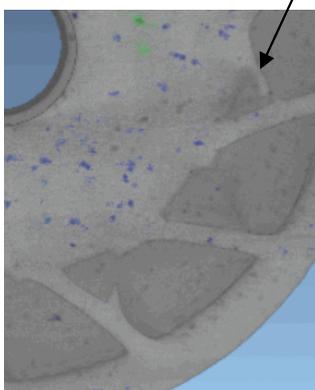
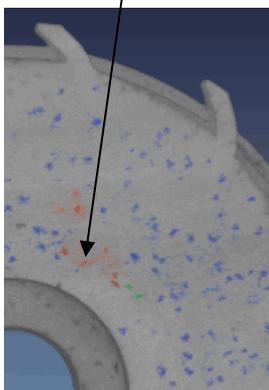
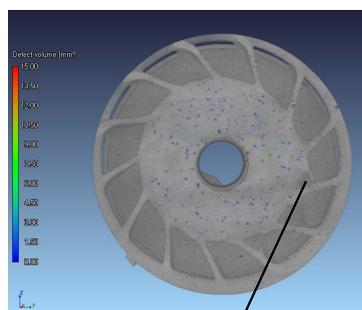
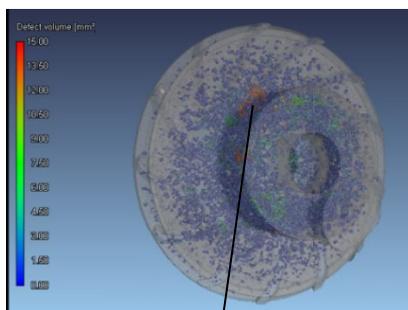
Для металлургических исследований, дефектоскопии и широкого круга инженерных задач большой интерес представляют системы компьютерной томографии, позволяющие «увидеть» внутреннюю структуру изучаемого объекта (рисунок 6.46). Компьютерная томография позволяет получать трёхмерное изображение при рентгеновском просвечивании отливок и определять геометрию внутренних поверхностей и каналов, получая объемную картину расположения металлургических дефектов.

Томографы представляют особый интерес для отработки технологии литья ответственных изделий, позволяют оперативно исследовать проблемные места в отливке, объективно оценить степень их значимости, провести варианты исследования литниковой системы, режимов пред- и пост-обработки отливки и таким методом в сжатые сроки отработать бездефектную технологию получения литых изделий.

Современные компьютерной томографии позволяют идентифицировать объекты (поры, раковины, включения и т. д.) с высоким разрешением, получать по сути трёхмерный скан детали.

По томограмме можно получить наглядное изображение и любого сечения объекта, и трёхмерной модели в целом, которая также может быть сопоставлена с исходной CAD-моделью.

Важным параметром системы является размер пятна фокуса при фокусировании рентгеновских лучей. Чем меньше его размер, тем выше разрешение системы, тем более чёткое и достоверное изображение проецируется на детектор. В современных системах для промышленных задач размер пятна фокуса составляет 200 и менее нм (0,2 мкм), что позволяет создавать томографы для достаточно габаритных объектов, таких как блоки и головки цилиндров двигателей, корпусные детали энергетических машин и т. д.



(Предоставлено ФГУП «НАМИ»)

Рисунок 6.46. Инспекционный контроль и анализ качества литейных деталей: CAD-модель, отливка и результаты томографических исследований (с указанием дефектных мест)

Технологический комплекс неразрушающего контроля деталей, литых заготовок и оснастки на основе компьютерной томографии позволяет проводить следующие операции:

- неразрушающий контроль качества отливок;
- анализ дефектов и пористости в отливках;
- определение внутренней геометрии объекта;
- реверсивный инжиниринг.

Ряд компаний, например, YXLON и Werth (Германия) выпускают специальные томографы YXLON.CT Universal и Tomoscope, имеющие в своем составе макро- и микрофокусные трубки, линейный и плоскопанельный детекторы. Микрофокусные трубки открытого типа с мощностью излучателей 10-225 кэВ/0.01-3.0 мА. Макрофокусные трубки 60 - 450 кэВ/2.0-9.0 мА. Масса инспектируемой детали в модели Y.CT Modular (рисунок 6.47) – до 65 кг, высота – до 650 мм, диаметр – до 635 мм.



Рисунок 6.47. Томограф Y.CT Modular

Томограф имеет гранитное основание и может быть использован в качестве контрольно-измерительной машины. Разрешение до 1 мкм, точность измерений 10 мкм. Томографы позволяют проводить регистрацию и анализ дефектов и внутренней структуры деталей практически всех конструкционных материалов. Эти машины чрезвычайно удобны и полезны для отработки технологии литья, а также для входного и выходного контроля особо ответственных отливок и металлопорошковых изде-

лий с повышенными требованиями на герметичность и качество внутренней структуры материала.

Известными производителями компьютерных томографов являются также: Nikon (Япония, производство в Бельгии), General Electric (подразделение Phoenix, США), Carl Zeiss, Werth, Matrix Technologies (Германия).

Для лабораторных исследований представляют интерес относительно недорогие (80-120 тыс. евро) томографы CTportable (Fraunhofer EZRT) и томографы серии SHR (Shake GmbH) с трубками 50-160 кэВ. Наиболее популярным программным продуктом для обработки данных томографирования, контрольных измерений и анализа является VGStudio Max 2.1 компании Volume Graphics.

ГЛАВА 7. Аддитивные технологии и порошковая металлургия

7.1. Материалы для «металлических» АМ-машин

7.1.1. Общие положения

Под порошками понимают сыпучие материалы с характерным размером частиц до 1,0 мм. Порошки классифицируют по размерам частиц (по условному диаметру d), подразделяя их на нанодисперсные с $d < 0,001$ мкм, ультрадисперсные $d = 0,01-0,1$ мкм, высокодисперсные $d = 0,1-10$ мкм, мелкие $d = 10-40$ мкм, средние $d = 40-250$ мкм и крупные $d = 250-1\ 000$ мкм [18].

В настоящее время не существует общих требований к металлопорошковым композициям, применяемым в АМ-технологиях. Разные компании – производители АМ-машин предписывают работу с определенным перечнем материалов, обычно поставляемых самой компанией. В разных машинах используются порошки различного фракционного состава. Одним из параметров, характеризующих порошок, является величина d_{50} – «средний диаметр частиц». Например, $d_{50} = 40$ мкм означает, что у 50% частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм. Так, в машинах Phenix (3D Systems) используется порошок с размерами частиц $d_{50} = 10$ мкм; для машин Conzept Laser дисперсность порошка – в пределах 25...52 мкм при $d_{50} = 26,9$ мкм; для машин Arcam размер частиц составляет 45-100 мкм, для машин SLM Solutions $d_{50} = 10-30$ мкм и т. д. Существует определенное недоверие к порошкам разных производителей. Нет никакой гарантии того, что, купив материал у одного производителя и дополнительное количество у другого, вы получите изделия одинакового качества. Всё это диктует необходимость совершенствования методов по стандартизации материалов для АМ-технологий. Здесь тоже необходима большая исследовательская работа, поскольку современные методы, применяемые для оценки свойств материалов для традиционных технологий, не могут быть применены к аддитивным техноло-

гиям в силу наличия анизотропии, неизбежной при послойном принципе создания изделия.

За рубежом вопросы стандартизации по материалам для аддитивных технологий находятся в компетенции NIST – National Institute of Standards and Technology (США); Международной организации по стандартизации ISO (комитет TC261 по аддитивным технологиям) и ASTM (международный комитет F42 по аддитивным технологиям). В настоящее время разработан только один стандарт (ASTM F2924) на материал Ti-6Al-4V для применения в технологиях Powder Bed Fusion.

Особенностью процесса лазерного синтеза, например, по технологии SLM является то, что при построении детали лазерный луч не только сплавляет частицы порошка, формируя тело детали, но и «портит» материал, непосредственно прилегающий к поверхности строящейся детали. Поэтому в практике работы с SLS-машинами применяют методы просеивания отработанного материала с целью удаления «бракованной» части с дальнейшим перемешиванием «работавшего» порошка со свежим. В какой пропорции – каждая компания решает по-своему. Однако, идентичность образцов, построенных на одной машине, из одного и того же порошка, но с учетом этих нюансов, также не гарантирована.

Общим требованием к порошкам для АМ-машин является сферическая форма частиц. Это связано, во-первых, с тем, что такие частицы более компактно укладываются в определенный объем. И, во-вторых, необходимо обеспечить «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением, что как раз достигается при сферической форме частиц.

Общим требованием к машинам, работающим с пиреформными материалами, такими как алюминий и титан, является наличие противопожарной системы и системы предупреждения о возгорании. При работе с мелкодисперсными порошками (особенно при $d_{50} < 10$) в силу их летучести необходимо также соблюдать правила техники безопасности.

С одной стороны, чем меньше величина d_{50} , тем меньше шаг построения может быть задан, тем более рельефно могут быть проработаны

мелкие элементы детали и тем более гладкую поверхность можно получить у построенной детали. С другой стороны, как уже отмечалось, в процессе построения в зону пятна лазера моментально вводится большое количество энергии: процесс плавления идет очень бурно – металл вскипает, происходит разбрызгивание расплава и часть металла (строительного материала) вылетает из зоны построения. Визуально это заметно по интенсивному искрообразованию. Если порошок имеет слишком малый размер частиц, то в процессе построения легкие частицы будут «вылетать» из зоны расплава, что приведет к обратному результату – повышенной шероховатости детали, микропористости. Еще один нюанс: для того, чтобы вылетающие из зоны расплава частицы не попадали на соседние, уже сплавленные участки, на поверхность строящегося слоя, внутри рабочей камеры создают направленный «ветер», который сдувает вылетевшие частицы в сторону. Это также может привести к слишком интенсивному выносу строительного материала из зоны построения. В силу этих нюансов при работе с мелкодисперсными порошками с $d_{50} < 10$ мкм используют маломощные лазеры, следовательно, малопроизводительные. Такие порошки (с соответствующими настройками машины) применяют в основном для изготовления микро-деталей, которые иным способом получить не представляется возможным.

Определенные трудности при работе с мелкодисперсными порошками возникают в связи с их свойством – повышенное комкование. Это накладывает особые требования к условиям хранения материалов и эксплуатации АМ-машин.

Проблема получения порошковых материалов актуальна не только для развития АМ-технологий, но и для целой классической порошковой металлургии. Металлопорошковые композиции находят применение в таких высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетика, военная и космическая техника, судостроение, приборостроение (таблица 7.1).

Таблица 7.1. Области применения порошковых материалов

Компоненты порошка	Применение
Al-Ni-Co, Fe-Nd-B	Производство магнитов, магниты
Al-Si-Mg	Сплавы с термостабильной структурой
Al-Sn-Cu	Подшипники скольжения
Al-переходные лантаноиды	Сплавы с повышенной термпрочностью
Bi-Te, теллурид висмута	Устройства, использующие эффект Пельтье
Cr-Al	Защитные покрытия
Co-Cr	Сплавы для зубопротезирования
Cu-Ba, Cu-Y	Суперпроводники
Cu-Cr-Zr	Электропроводники без бериллия
Cu-In-Ga- Selenide	Фотогальванические материалы
Cu-Mn-Ni, Cu-Ti-Sn	Режущий инструмент
Au-Pt-Pd-Ag-In, Ni-Ti-Si-B, Ag-Cd-Zn-Cu	Сплавы для пайки
Au-Ag-Cu	Тонкопленочные покрытия
Fe-14%Cr-0,4%C	Специальный инструмент и оснастка
Fe-Mn	Износостойкие опоры прокатных станов
Fe-6%Si	Сердечники трансформаторов
Fe-Si-Al	Магнитные компоненты
Сплавы Mg	Металлические матрицы
Ni-алюмиды	Структурные компоненты и покрытия
Ni-Ce	Катализаторы
Ni-Cr-Fe-Si-B	Порошки для плазменного напыления
Ni-Cr-Mo-B	Антикоррозионные покрытия
Ni-лантаноиды	Топливные элементы
Нержавеющая сталь 304/316	MIM-технология
Сталь T42	Инструментальная оснастка
Tb-Fe	Опико-электронные устройства

7.2. Методы получения металлических порошков

Существуют разнообразные методы получения металлопорошков, условно их разделяют на физико-химические и механические.

К физико-химическим относят методы, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья, при этом химический состав и структура конечного продукта – порошок – существенно отличается от исходного материала. Механические методы обеспечивают производство порошка из сырья без существенного изменения химического состава. К механическим методам относятся, например, многочисленные варианты размола в мельницах, а также диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости, этот процесс называют также атомизацией.

Частицы порошков, получаемые механическими методами размола, имеют осколочную, неправильную форму. В изготовленном порошке содержится относительно большое количество примесей – продуктов износа размольных тел и футеровки мельницы. Поэтому эти методы не применяют для получения порошков, используемых в аддитивных технологиях.

Диспергирование расплава – наиболее производительный, экономичный и эффективный способ получения мелких и средних порошков металлов: 60-70 % объема всех промышленных порошков получают именно этим методом [18]. Распыление (атомизация) широко применяется при производстве порошков многокомпонентных сплавов, в частности с аморфной структурой, которая позволяет достичь равномерного химического состава композиции, даже при содержании легирующих компонентов, выше их предела растворимости в основном компоненте сплава. Кроме того, порошки, полученные с использованием методов диспергирования расплавов, имеют форму частиц, близкую к сферической.

Более 90% всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях, получают методами диспергирования расплава. Основными технологиями получения порошков для АМ-машин являются следующие атомизации: газовая; вакуумная; центробежная.

7.2.1. Газовая атомизация

Согласно данной технологии металл расплавляют в плавильной камере (обычно в вакууме или инертной среде) и затем сливают в управляемом режиме через специальное устройство – распылитель, где производится разрушение потока жидкого металла струей инертного газа под давлением. Для получения мелких порошков ($d = 10-40$ мкм), наиболее часто применяемых в аддитивных технологиях, используют так называемые ВИМ-атомайзеры (Vacuum Induction Melting), в которых плавильную камеру для минимизации контакта расплава с кислородом и азотом вакуумируют.

Технологию получения порошков с использованием машин для вакуумного плавления называют VIGA – Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization, т. е. «технология газового распыления металла, расплавленного в вакуумной камере, методом индукционного нагрева», рисунок 7.1. Применяют как поворотные тигли, так и тигли с донным сливом. Для плавки можно использовать керамические или графитовые тигли. В зависимости от материала тигля температура плавления может достигать 1900°C . Расплавленный металл сливают в специальный приемник, к которому подводят инертный газ под давлением (обычно аргон, иногда азот).

Процесс распыления металла имеет три фазы – начальную, рабочую и заключительную. В начальной фазе система выходит на рабочий режим: открывается клапан для слива металла (необходимо некоторое время для стабилизации потока), включается подача распылительного газа, причем в точно определенном соотношении между количеством металла и объемом распылительного газа. Эта фаза длится несколько секунд. Далее начинается рабочая фаза, в которой процесс слива металла стабилизируется и достигается требуемое соотношение расхода металла и аргона в распылителе.

В конце рабочего процесса (заключительная фаза) скорость выхода металла из тигля снижается, параметры потока изменяются и нарушается баланс между соотношением массы металла и газа. Процесс также

длится несколько секунд. В первой и заключительной фазах порошок получается некондиционным. Поэтому для повышения производительности и эффективности системы необходимо увеличивать долю рабочей фазы в общем балансе времени цикла атомизации.

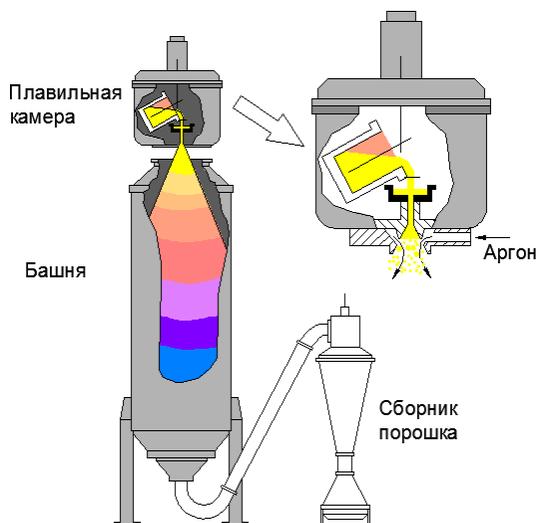


Рисунок 7.1. Схема атомайзера VIGA

Узел атомизации – там, где происходит собственно процесс распыливания металла, это весьма сложное устройство, которое по конструктивным и технологическим соображениям не может быть выполненным с размерами, меньше определенных. Для качественного распыления должно быть выдержано определенное соотношение между расходом металла и расходом газа. Минимальный расход металла составляет примерно 8 кг/мин или около 1,0 л/мин (по стали). Поэтому, если атомайзер имеет тигель объемом 1,0-3,0 л, использовать его для коммерческого получения порошков нецелесообразно. Весь процесс будет слишком кратковременным для стабилизации распыливания в рабочей фазе, и выход кондиционного порошка будет невелик. Это приемлемо для исследовательских целей, но нецелесообразно для коммерческого использования.

Для производства порошков технически рациональной нижней границей объема тигля считается 5,0 л (около 40 кг по стали). В этом случае время распыления составит примерно 5 мин и длительность рабочей фазы – около 4,5 мин. Фракционный состав порошка может быть расширен вследствие увеличения расхода металла через сливной канал (рисунок 7.2).

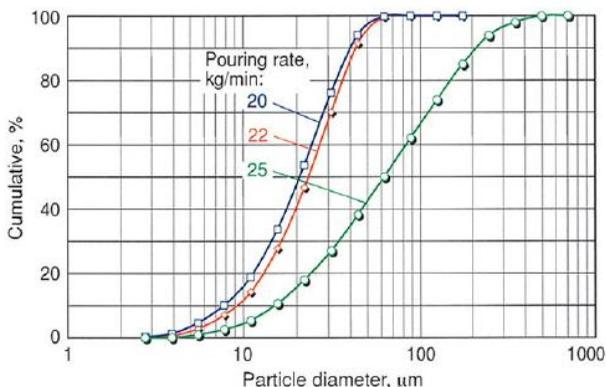


Рисунок 7.2. Фракционный состав порошка в зависимости от расхода металла через сливной канал (20, 22 и 25 кг/мин) [19]

Атомайзеры типа VIGA применяется, в частности, для получения следующих порошков:

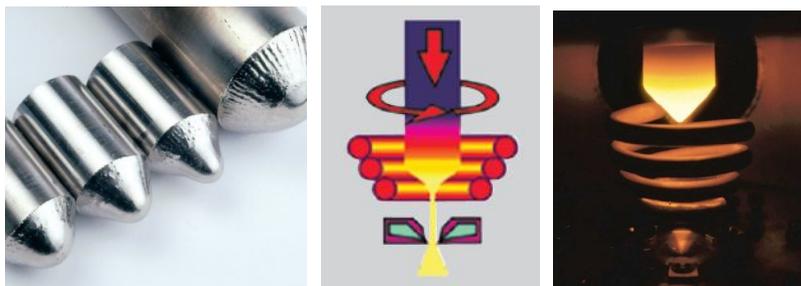
- никелевые жаропрочные сплавы (например, Inconel 718, Rene 88 и т.д.) для деталей авиационных и стационарных турбин;
- сплавы на основе кобальта для использования в медицине, стоматологии и производстве мишеней ионного распыления;
- порошки для плазменного напыления (например, NiCrAlY, CoCrAlY, и т. д.) защитных покрытий на детали из жаропрочных сплавов;
- порошки для гранульной металлургии (например, 17-4 PH, 316L) для автомобильных деталей массового производства;
- композиции для спекания в порошковом слое (например, кобальтовые сплавы и драгоценные металлы) для применения в АМ-машинах;

- высоколегированные стали (например, инструментальная и быстрорежущая сталь) с очень высоким содержанием карбидов;
- цветные металлы (например, медные или оловянные сплавы) для различного применения.

Технология EIGA (Electrode Induction Guide Inert Gas Atomization – индукционная плавка электрода с распылением газом) является одним из видов газовой атомизации. Данная технология разработана для получения порошков реактивных металлов – Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo и т. д., поскольку плавка этих металлов в керамических тиглях затруднена даже в условиях вакуума.

EIGA-атомайзеры применяют для получения металлических порошков методом распыления в струе аргона. В конструкции атомайзера может быть предусмотрена возможность слива металла в изложницы, т. е. он может быть использован в качестве плавильной установки.

Согласно технологии EIGA (рисунок 7.3) предварительно выплавленные в форме электродов прутки (feed stock – сырье, исходный материал) подвергаются индукционной плавке. Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в кольцевой индуктор (рисунок 7.3 б). Капли металла попадают в систему форсунок и распыляются инертным газом.



(Предоставлено ALD)

а

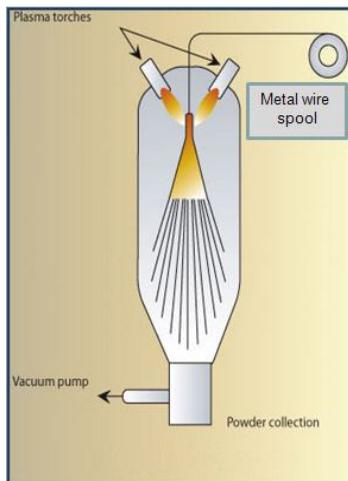
б

в

Рисунок 7.3. Технология EIGA: а – исходный материал (feed stock) для получения порошка; б – схема процесса; в – процесс EIGA

Типичными материалами, получаемыми по технологии без использования керамики, являются тугоплавкие и активные материалы, например TiAl, FeGd, FeTb, Zr и Cr. Технология EIGA может также использоваться для многих других конструкционных материалов на основе Fe, Ni и Co. Машины EIGA имеют невысокую скорость распыливания – около 0,5 кг/с, однако позволяют распылять достаточно большой объем материала в течение одной плавки – от единиц до десятков килограммов.

Еще одна разновидность газовой атомизации – это технология Plasma Atomization, позволяющая получать высококачественный, особо чистый порошок сплавов на основе Mo, Ti, Ni, Ta и Co-Cr в широком и управляемом диапазоне фракционного состава. В технологии Plasma Atomization плавление металла производят с помощью плазмы [20]. Например, атомайзер компании Raymor (Канада) содержит три плазматрона – генератора потока ионизированного газа, сфокусированных в точку подвода металла в виде прутка (рисунок 7.4) [21]. Недостаток технологии – необходимость наличия специального производства фидстока –



а



б

Рисунок 7.4. Технология Plasma Atomization: а – схема процесса плазменной атомизации; б – атомайзер Raymor [21]

прутка диаметром 1-5 мм. Однако эта технология позволяет получать порошки высокого качества.

Определенный интерес представляет разновидность газовой атомизации с использованием энергии плазмы. Эта технология предназначена для изменения морфологии порошков, полученных не методами диспергирования расплава, или «исправления» геометрии некондиционных порошков. Суть процесса (рисунок 7.5 [22]) состоит в том, что исходный «неправильный» порошок дообработывают в струе плазмы, в результате этого частицы порошка приобретают правильную сферическую форму (рисунок 7.6).

7.2.2. Вакуумная атомизация

Процесс вакуумной атомизации в зарубежной литературе часто называют *Soluble gas atomization* [23, 24], т. е. атомизация за счет растворенного в расплаве газа. Суть его в следующем. Атомайзер (рисунок 7.7) состоит из двух камер – плавильной и распылительной. В плавильной камере создают избыточное давление газа (водород, гелий, азот), который растворяется в расплаве. Во время атомизации металл под действием давления в плавильной камере поступает вверх к сопловому аппарату, выходящему в распылительную камеру, где создают вакуум. Возникающий перепад давлений побуждает растворенный газ к выходу на поверхность капель расплава и «взрывает» капли изнутри, обеспечивая при этом сферическую форму и мелкодисперсную структуру порошка.

7.2.3. Центробежная атомизация

Технологии центробежной атомизации весьма разнообразны [23, 24]. Наибольший интерес представляют технологии, которые позволяют получать порошки реактивных и тугоплавких металлов, являющихся наиболее ценными для аддитивных технологий. Технология REP – Rotating Electrode Process – предполагает распыливание расплава, создаваемого электрической дугой между прутком (обычно Ø15-75 мм) материала и вольфрамовым электродом (рисунок 7.8). Главным достоинством такой

технологии является полное исключение контакта расплава с тиглем и разливочными устройствами, как в технологии VIM или при центробежном распылении на вращающемся диске. Вариант этой технологии – процесс PREP – Plasma Rotating Electrode Process [23, 24], в соответствии с которым плавление фидстока производят высокоскоростным потоком

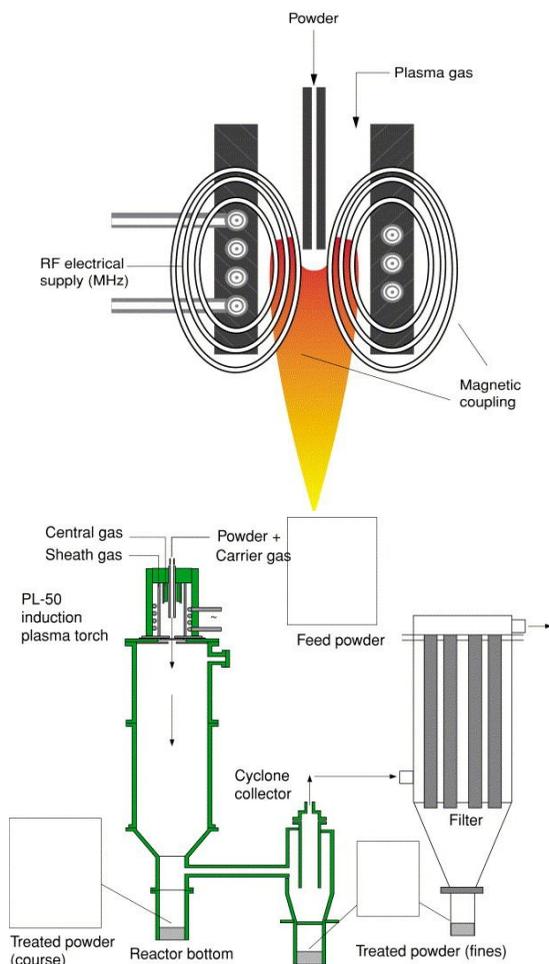
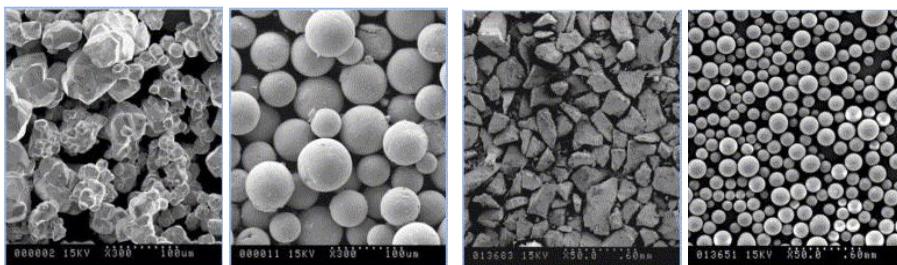


Рисунок 7.5. Схема процесса плазменной обработки порошка: стрелки Powder и Plasma gas – направление подачи исходного порошка и газа, ионизируемого в плазматроне [22]



а б в г

Рисунок 7.6. Сравнение морфологии исходного порошка и порошка, прошедшего плазменную обработку [22]: а – вольфрам до обработки; б – вольфрам после обработки $d_{50} = 50$ мкм; в – SiO_2 до обработки; г – SiO_2 после обработки

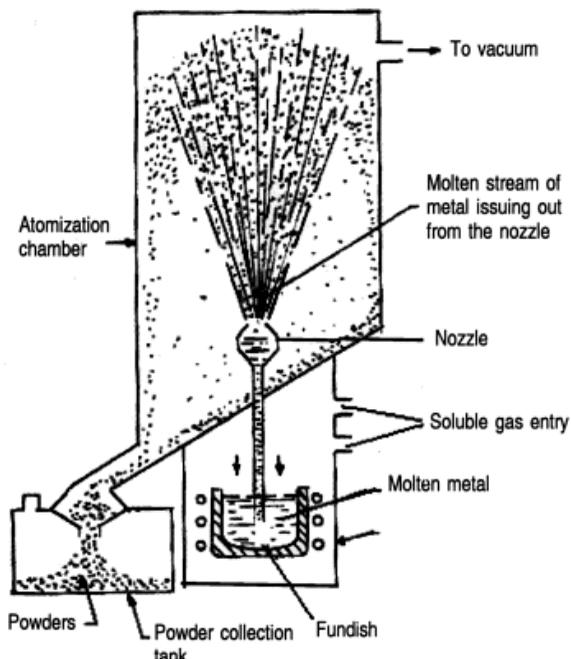


Рисунок 7.7. Схема процесса Soluble gas atomization [23]

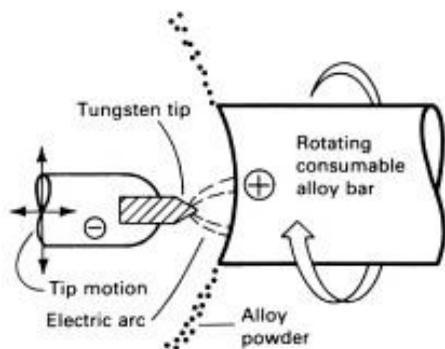
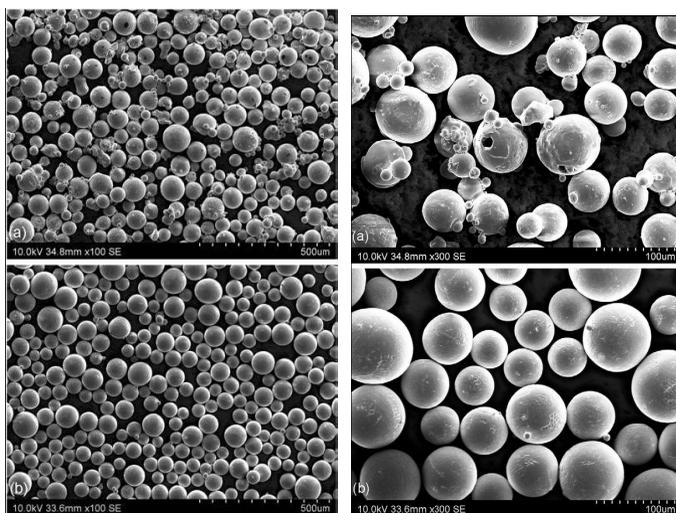


Рисунок 7.8. Схема процесса REP [23]

ионизированного инертного газа. Технологии REP и PREP применяют для получения особо чистых мелкодисперсных порошков сферической формы. Сравнение структуры порошков Ti-6Al-4V (рисунок 7.9),



а

б

Рисунок 7.9. Морфология порошков Ti-6Al-4V, полученных разными методами: а – атомизация инертным газом; б – центробежная плазменная атомизация (PREP) [25, 26]

полученных методами атомизации инертным газом и центробежной плазменной атомизацией (PREP) [25, 26], показало, что частицы порошка, полученного методом PREP, отличаются правильной сферической формой и отсутствием «сателлитов» – пылевидных частиц, налипающих на более крупные в результате соударения в процессе газовой атомизации.

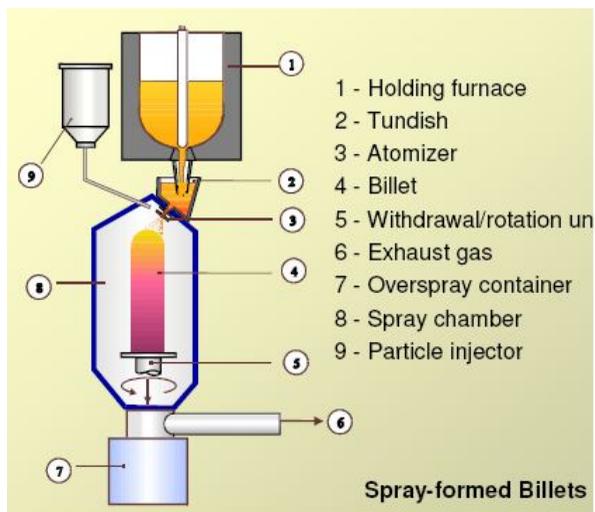
7.3. Технология Spray forming

Существует ряд новых технологий, находящихся на стыке разных традиционных технологий. К ним относится и так называемая технология Spray forming, объединяющая процессы литья (плавка металла) и распыления металла (порошковая металлургия). В конечном итоге получается заготовка – заготовка, полученная послойным синтезом, что и «роднит» технологию Spray forming с АМ-технологиями.

Технология Spray forming, рисунок 7.10, разработана в первую очередь для изготовления ответственных деталей аэрокосмического назначения из специальных сплавов с повышенными требованиями. Она также нашла коммерческое применение в серийном производстве, в частности, для изготовления гильз цилиндров из Al-Si сплавов для двигателей автомобилей Mercedes. Данная технология успешно применяется для получения заготовок из сплавов, склонных к ликвации при кристаллизации, в частности сплавов, содержащих медь и использующихся для производства суперпроводников (CuSn), высокопрочных инструментов (CuMnNi, CuAlFe) для нефтедобывающей и горнорудной промышленности.

Spray forming – технология получения заготовок из конструкционных и специальных сплавов распылением (атомизацией) металла – была предложена в 1970 г. профессором Singer (Swansea University, Великобритания). Суть технологии заключается в послойном напылении металла на подложку и «выращивании» болванки (заготовки) для последующей механообработки. Металл расплавляют в плавильной камере, затем сливают и в специальном распылителе измельчают струю металла пото-

ком инертного газа, частички металла размером 10-100 мкм осаждаются на подложку, формируя тело болванки (рисунок 7.10, поз. 4).



(Источник: http://www.lagermetall.com/high_tensile/spray.aspx?i=2)

Рисунок 7.10. Схема технологии Spray forming: 1 – тигель; 2 – сливное устройство; 3 – подвод газа; 4 – «выращиваемая» болванка; 5 – вращающаяся подложка; 6 – отвод газа; 7 – бункер для порошка; 9 – (опция) бункер для подшихтовки дополнительного материала

В отличие от литой, полученной заливкой металла в изложницу, заготовка, изготовленная методом Spray forming, имеет высокую однородность микро- и макроструктуры материала (рисунок 7.11).

Равномерность распределения ингредиентов по массиву заготовки и равномерность микроструктуры (рисунок 7.12) – главные преимущества указанной технологии. К недостаткам следует отнести относительно высокие потери материала (до 20%) при атомизации и осаждении металла на подложку и относительную сложность управления процессом, требующим высоких профессиональных навыков персонала.

Особенностью Spray forming является наличие микропор в структуре материала, появление которых связывают с «захватом» молекул газа

при атомизации и осаждении частичек металла и с «неплотным» спеканием частиц при кристаллизации. Пористость металла устраняют горячим изостатическим прессованием (HIP), рисунок 7.13, и последующей обработкой давлением – прокаткой или ковкой.

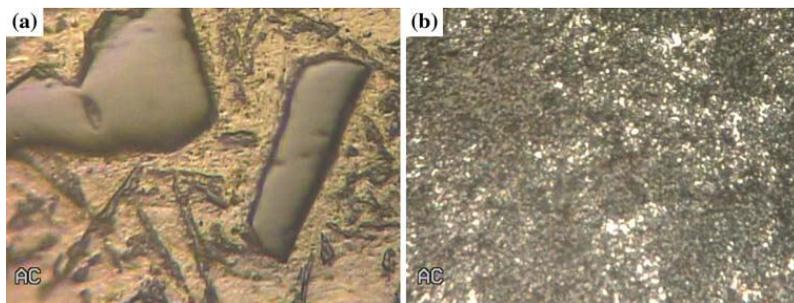


Рисунок 7.11. Микроструктура сплава Al-15% Si: а – отливка; б – Spray forming (x400)

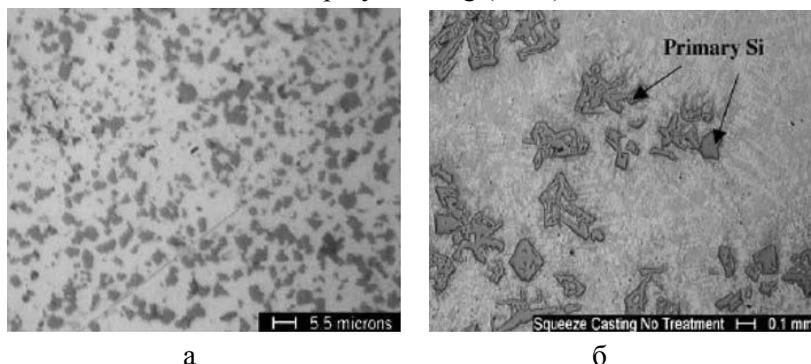


Рисунок 7.12. Распределение Si в образце сплава Al-25%; Si-0,89%; Cu-1%; Ni-0,84%; а – spray forming; б – отливка + ковка

Платформа с подложкой, на которой «выращивается» заготовка, может совершать возвратно-поступательное движение – тогда получается заготовка в виде ленты (рисунок 7.14 а), или вращательное движение относительно оси потока распыляемого металла – для получения цилиндрической заготовки в виде болванки (рисунок 7.14 б). Вращательное

движение относительно оси, перпендикулярной оси потока, позволяет получать заготовки типа «кольцо» или «труба» (рисунки 7.14 в, 7.15).



Рисунок 7.13. Установка горячего изостатического прессования AVURE

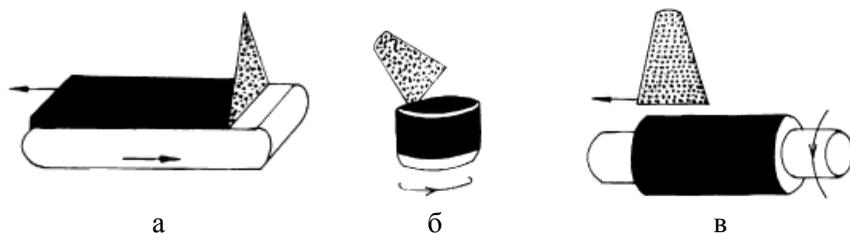


Рисунок 7.14. Получение заготовок разных типов по технологии Spray forming

Технология Spray forming открывает широкие возможности для создания так называемых градиентных материалов (с переменными по сечению физико- химическими свойствами), которые могут быть получены методом послойного нанесения различных материалов через два (или более) распылительных сопла.

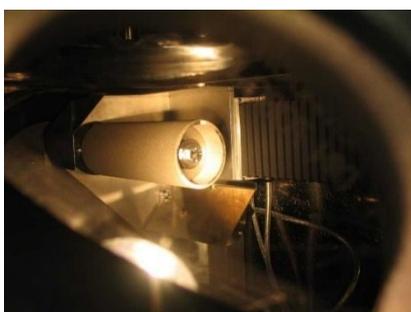


Рисунок 7.15. Цилиндрическая заготовка, полученная по технологии методом Spray forming

В связи с развитием и повышением технического уровня прототипирующих машин может представлять интерес практическое применение технологии Spray forming для получения изделий методом напыления металла на керамическую модель (реплику), рисунок 7.16.

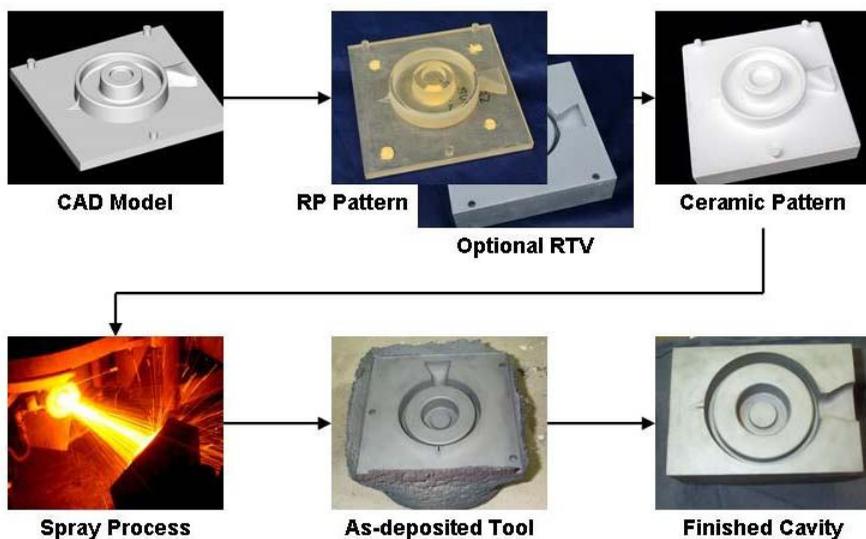


Рисунок 7.16. Процесс получения изделий напылением металла на керамическую модель [27]

Суть технологии в следующем. По CAD-модели на АМ-машине, например, SLA-установке, «выращивается» стереолитографическая мастер-модель, по которой изготавливается силиконовая или RIM-форма. В форму заливают жидкую керамику и получают керамическую модель-реплику (на рисунке – «Ceramic Pattern»). Керамическую модель устанавливают в Spray forming-машину и послойно напыляют на её поверхность расплавленный металл. Таким способом получают «слепок» с керамической реплики. После механической обработки (удаления облоя и обработки в размер по посадочным поверхностям) получают конечное изделие – металлическую форму. Эта технология представляет наибольший интерес для получения технологической оснастки, в частности пресс-форм.

Компания RSP Tooling (RSP – Rapid Solidification Process, США [27]) стала разработчиком нового способа изготовления инструментальной оснастки с использованием технологии Spray forming. Машина RSP (рисунок 7.17) представляет собой сочетание плавильной машины и атомизатора (устройства для распыливания металла). Металл (это могут быть различные сплавы) плавится в тигле в инертной атмосфере и под давлением направляется к распылительному соплу, где посредством струи



Рис. 7.17. RSP-машина компании RSP Tooling [27]

азота происходит мелкодисперсное дробление жидкого металла и быстрое отверждение частиц (рисунок 7.18). Около 70% частиц «долетают» до керамической модели уже в твердом состоянии, остальные 30 % – в полужидкой фазе. Оставшегося тепла достаточно, чтобы связать (сварить) между собой все частицы. Исследования показали, что металл имеет более однородную и мелкозернистую структуру с менее выраженной сегрегацией, чем при литье. Частицы металла налипают на керамическую модель, формируя тело «слепка». Платформа, на которой закреплена керамическая модель, имеет возможность перемещения в пространстве рабочей камеры машины, и оператор, поворачивая платформу, обеспечивает равномерное нанесение металла. После завершения процесса и остывания в течение 1,5-2 часов керамическая модель извлекается из металлического «слепка» и производятся стандартные технологические операции: механо- и термообработка.

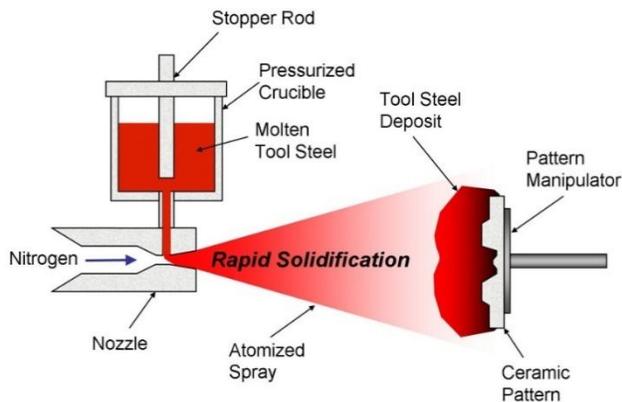


Рисунок 7.18. Схема работы RSP-машины [27]

Машина RSP может изготавливать детали с максимальными размерами – 180x180x100 мм. Продолжительность рабочего цикла составляет 3-4 час, в течение одного рабочего дня может быть изготовлено 2-4 изделия.

Преимущество RSP-технологии – возможность получения биметаллических композиций. Например, рабочая часть кокиля формируется из специальной стали, а тело – из обычной недорогой стали или цветного металла с повышенной интенсивностью теплоотдачи (рисунок 7.19 [27]). Данная технология пока не находит коммерческого применения, но представляет, несомненно, интерес.

Сплавы системы Al-Zn-Cu-Mg относят к высокопрочным материалам. Дальнейшее улучшение их прочностных характеристик сдерживается макросегрегацией, возникающей в литой заготовке. Технология Spray forming способствует устранению этой проблемы. Сплав 7XXX, полученный новым способом, показал более высокую ударную вязкость и усталостную прочность, чем кованный алюминий.

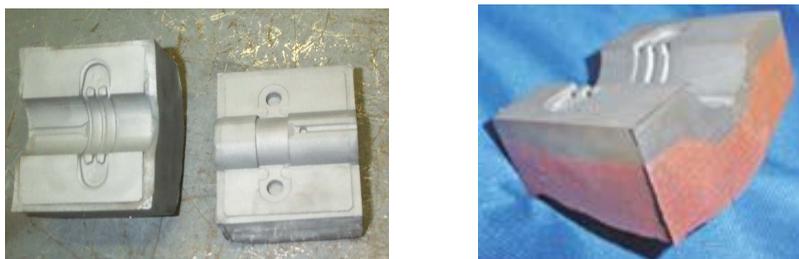


Рисунок 7.19. Биметаллические композиции [27]

Одним из ограничений в применении сплавов Al-Li является анизотропия у деталей, изготавливаемых из литых заготовок. Сплав, полученный по технологии Spray forming с увеличенным содержанием лития, имеет меньшую анизотропию: экспериментально показано отсутствие проблем с растрескиванием отливки и макросегрегацией, которые имеют место при получении заготовки литьем. Получен сплав с содержанием лития 4% по весу, имеющий плотность $2,4 \text{ г/см}^3$ и с удельной жесткостью на 30% выше, чем у обычных алюминиевых сплавов. Также были получены сплавы Al-Cu-Mg-X с улучшенными, по сравнению с литейными сплавами, прочностными свойствами и характеристиками износа при повышенных температурах.

Достоинством технологии spray forming является возможность создания новых материалов с уникальными свойствами, а также разнообразных покрытий. Получены композиционные материалы (ММС, Metal Matrix Composite), в которых матричная основа усилена керамикой до 15% по объему и которые показывают повышенную жесткость и имеют повышенное сопротивление износу. Эти материалы изготовлены путем вдувания частиц керамики в распыленный поток металла в процессе осаждения металла по технологии Spray forming.

Получен уникальный материал Al-Si с содержанием кремния 70% по весу – такой сплав невозможно получить методами литья из-за катастрофического охрупчивания вследствие выпадения крупных зерен кремния при кристаллизации и засорения оксидами. Изменяя соотношение кремния и алюминия, можно получить сплавы с заданным коэффициентом термического расширения (постоянным в широком диапазоне температур). Эти сплавы имеют перспективы применения в микроволновых устройствах и пленочных радиаторах, которые используются в телекоммуникационных системах, аэрокосмической и оборонной промышленности. Образцы деталей авиадвигателя, полученные с использованием технологии Spray forming, показаны на рисунке 7.20.



Рисунок 7.20. Детали авиадвигателя, полученные по технологии Spray forming

Европейскими лидерами в освоении технологии Spray forming являются компания Sandvik Osprey (Великобритания), которая также занимает передовые позиции по выпуску порошковых металлов и оборудова-

ния для их производства (рисунок 7.21), и немецкая фирма ALD, специализирующаяся на выпуске литейного оборудования, вакуумных печей и технологического оборудования для термообработки и порошковой металлургии.



Рисунок 7.21. Установка «Spray forming»: емкость до 80 кг по Al.
Оксфордский университет

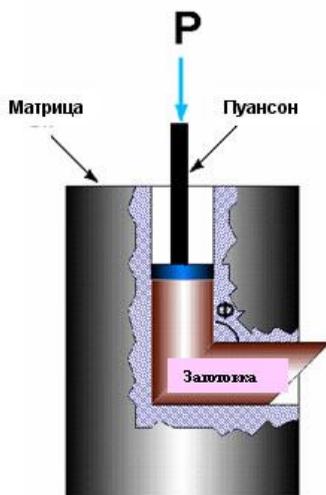
В США ведущие позиции в этой области занимают General Electric, Teledyne Allvac, а также компания Sprayform Technologies International – совместное предприятие Pratt & Whitney и Howmet, разработавшее технологию получения пресс-форм (заготовок) турбинных дисков диаметром до 1400 мм.

Фундаментальные исследования и разработки по практическому применению возможностей технологии Spray forming активно ведут также: U.S. Navy Labs, Pennsylvania State University, University of California at Irvine (США), Applied Research Labs, Advanced Institute of Science and Technology (Ю. Корея), National Cheng Kung University (Тайвань), IPEN (Бразилия), Oxford University Centre for Advanced Materials and Composites (Великобритания), Inner Mongolia Metals Institute (Китай), Bremen University (Германия), Katholieke Universiteit Leuven (Бельгия). Компания

Spray Steel производит в год до 4000 т заготовок из сталей различного назначения, из которых, в частности фирма BÖHLER-UDDEHOLM AG (Австрия), изготавливает металлорежущий инструмент.

Технология Spray forming имеет большие перспективы для создания новых конструкционных, наноструктурных материалов, в частности, для дальнейшего развития отечественной технологии интенсивной пластической деформации (ИПД).

Разновидность ИПД – равноканальное угловое прессование (РКУП) – позволяет получать массивные наноструктурные заготовки диаметром до 85 и длиной до 300 мм, пригодные для использования в машиностроении. В процессе РКУП (рисунок 7.22) заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два пересекающихся под углом 90° канала с одинаковыми поперечными сечениями (в зависимости от деформируемого материала при комнатной или повышенной температуре). «Наноструктурность» материала получают за счет деформации сдвигом.



(Источник: www.vniief.ru)

Рисунок 7.22. Схема процесса РКУП

Наноструктурированные материалы, вследствие очень малого размера зерен, содержат в структуре большое количество границ зерен, которые имеют определяющее значение в формировании их необычных физических и механических свойств. При «традиционных» методах упрочнения – прокатке, волочении и ковке – повышение прочности материала, как правило, сопровождается уменьшением его пластичности. Наноструктурированные материалы за счет ИПД имеют высокую прочность и уникальную пластичность.

Для формирования наноструктур методом ИПД весьма важным является не только число проходов, но и однородность исходного массива, равномерность распределения веществ, составляющих сплав, по объему исходного материала. Технология Spray forming позволяет получить хорошо подготовленный для ИПД материал.

Одним из направлений использования наноматериалов является подшихтовка ультрадисперсных порошков в распыляемый расплав основного матричного металла. Такой метод позволяет создавать уникальные сплавы с равномерным включением в объемную структуру наночастиц различных материалов – металлов, включая редкоземельные, оксидов и пр.

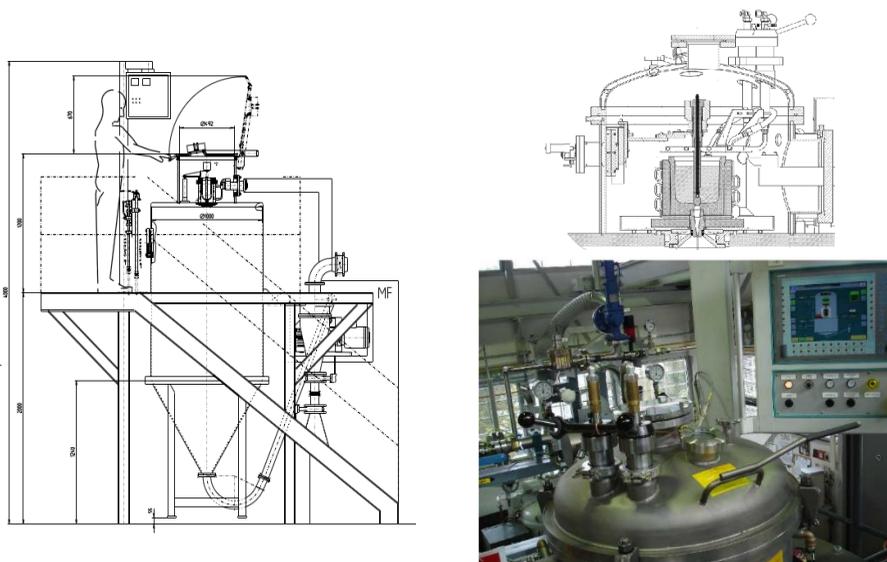
7.4. Производители атомайзеров и поставщики металлопорошковых композиций для использования в АМ-машинах

В мире существует несколько десятков крупных компаний – производителей металлопорошков по технологиям атомизации (США, Франция, Германия, Швеция, Япония, Китай и др.). Компании приобретают атомайзеры у других компаний или разрабатывают свои собственные конструкции. Большинство компаний не продает свои технологии, даже в качестве лицензий, акцентируя свой бизнес только на производстве порошков. Редким исключением является шведская компания Sandwik Osprey (Швеция), которая в 80-х гг. XX в. продала лицензию на технологии атомизации компании ALD Vacuum Technologies (Германия). Сама же Sandwik Osprey, имея оборудование собственной конструкции и

«ноу-хау», превратилась в одного из лидеров мирового рынка по производству металлических порошков.

В Европе лишь три компании – ALD (Германия), PSI (Phoenix Scientific Industries Ltd.) и Atomising Systems Ltd. (Великобритания) – производят атомайзеры в качестве товарной продукции.

Мировой лидер в производстве оборудования для газовой атомизации – компания ALD – в настоящее время входит в группу AMG Advanced Metallurgical Group N.V. В производственной линейке компании атомайзеры как лабораторного (объем тигля 1,0-2,0 л), так и промышленного назначения с производительностью до 500 кг за одну плавку и более. Лабораторные атомайзеры ALD VIGA 1-B, VIGA 2 (рисунок 7.23) предназначены для получения порошков стали и спецсплавов в основном в исследовательских целях.



(Предоставлено ALD)

Рисунок 7.23. Атомайзер VIGA 2 и его плавильная камера

Атомайзеры ALD VIGA 1-B, VIGA 2 используются для получения небольших партий порошков различных конструкционных сталей, никелевых сплавов, кобальта, меди и др. Стандартная конструкция вклю-

чает печь для вакуумного индукционного плавления (VIM), где происходят процессы плавления, очищения и дегазации. Очищенный расплав сливается по предварительно нагретому жёлобу в газовую форсунку, где металл распыляется струей инертного газа под высоким давлением. Полученный металлический порошок затвердевает, свободно падая в башне, расположенной прямо под распылительной форсункой. Смесь порошка и газа транспортируется по трубопроводу в циклонную установку, где крупные и мелкие фракции порошка отделяются от распылительного газа. Металлический порошок собирается в герметичные контейнеры, расположенные под циклонной установкой. Конфигурация машины обычно согласовывается с заказчиком с учетом конкретных условий установки.

Для коммерческого получения порошков рекомендуются атомайзеры с большей производительностью, например VIGA-6 (около 40 кг по стали) и VIGA-8 (50 кг). Максимальная емкость тигля для машин типа VIGA составляет 250-300 л. Дисперсность распыливания зависит от материала и варьирует в пределах $d_{50} = 15-60$ мкм. Фракционный состав получаемого порошка может быть откорректирован с помощью настройки параметров газового распылителя и сливного устройства.

Компания ALD является также изготовителем атомайзеров для получения порошковых композиций по технологии EIGA – индукционная плавка с распылением инертным газом. Базовые модели EIGA 50 (рисунок 7.24) и EIGA 100 отличаются размерами применяемого фидстока, соответственно, 50 и 100 мм.

Машина может быть оснащена функцией Spray forming для «выращивания» болванок диаметром до 50 мм и длиной до 500 мм. Spray forming – относительно новая прогрессивная технология в металлургии, позволяющая получать болванки (заготовки для последующих переделов) посредством осаждения распыливаемого металла на подложку.

Технология VIGA позволяет получать порошки металлов (кроме титановых сплавов и реактивных металлов) с дисперсностью $d_{50} = 30$ мкм. Технология EIGA весьма производительна (при двух сменной рабо-

те может быть получено до 500 кг порошка в день) и универсальна по распыливаемым металлам, но порошки имеют размер частиц, равный $d_{50} = 60-80$ мкм в зависимости от материала (рисунок 7.25).

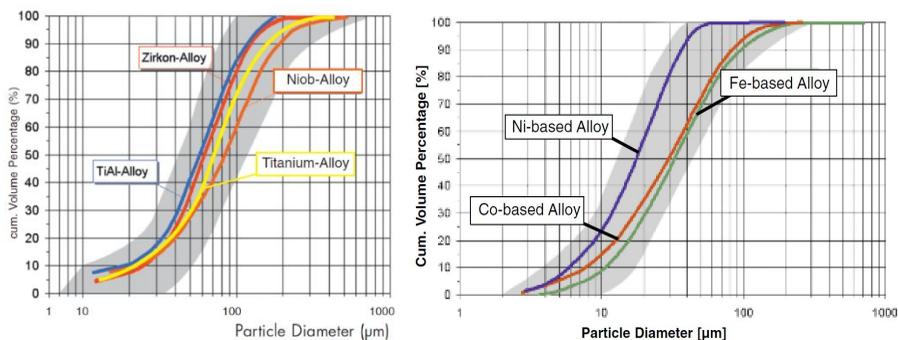


(Предоставлено ALD)

а

б

Рисунок 7.24. Атомизер EIGA 50: а – общий вид; б – плавильная камера



а

б

Рисунок 7.25. Фракционный состав порошков различных сплавов, полученных по технологиям: а – VIGA, б - EIGA (по данным ALD)

Металлопорошковые композиции, полученные на установках VIGA и EIGA, могут быть использованы и в целях традиционной порошковой металлургии, в частности в PIM-технологиях. Общий термин PIM – Powder Injection Molding – обозначает технологии формования порошковых материалов посредством предварительной пластификации (с помощью связующего состава) и специальной термообработки на стадии получения конечного изделия.

Атомизеры Hermiga 75/3 (рисунок 7.26 а) и Hermiga 75/5 компании PSI предназначены для получения порошков спецсталей и титановых сплавов. Машины отличаются объемом тигля (3 и 5 кг по стали, соответственно) и позволяют получать металл в слитках или в виде порошка сферической формы. Скорость охлаждения при атомизации – от 10^3 до 10^6 К/с. Дисперсность порошка варьируется от 10 до 100 мкм. Спектр расплавляемых металлов весьма широкий – включает пиррофорные сплавы и сплавы редкоземельных металлов.



Рисунок 7.26. Атомизеры PSI: а – Hermiga 75/3; б – Hermiga 100/10 VI

При получении алюминиевых порошков с целью снижения опасности взрыва предусмотрено регулируемое пассивирование. Как опция – атомизация в воде для получения металлических гранул. Технология Wirecasting (быстрое охлаждение путем погружения расплавленного металла во вращающуюся водяную ванну) позволяет получать металличе-

скую нить с высокими магнитными и прочностными свойствами и диаметром от 0,1 мм. Габариты – 2100х3200х2400 мм, вес – 2500 кг.

Атомайзер Hermiga 100/10 VI (рисунок 7.26 б) – лабораторно-исследовательская машина с донным сливом и с аргоновым распылителем для получения порошков спецсталей, титановых сплавов, редкоземельных металлов, пиррофорных сплавов, а также заготовок методом Spray forming. Машина может также выполнять функцию «поставщика» расходных (строительных) материалов для аддитивных машин, для «выращивания» изделий (в частности, литейных форм) из металлических порошков. Модель имеет съемный тигель емкостью 10 кг по стали. Дисперсность порошка варьируется от 10 до 100 мкм. Габаритные размеры атомайзера – 5050х5950х5070 мм.

Машины PSI имеют в качестве специальной опции возможность атомизации титановых сплавов. Реализация такой опции требует установки дополнительного оборудования, которое существенно увеличивает габариты и стоимость системы. В линейке оборудования фирмы PSI имеются модели с донным сливом (Hermiga 100/25VI) и модели с поворотным тиглем (Hermiga 100/50V21, Hermiga 120/100 V21, Hermiga 100/200 V21). Эти машины, имеющие емкость тигля по стали, соответственно, 25, 50, 100 и 200 кг, предназначены для мало- и среднесерийного производства металлических заготовок и порошков.

Компания Atomising Systems Ltd. специализируется на выпуске оборудования для атомизации металлических и неметаллических материалов различными технологиями:

- распылением водой;
- распылением инертным газом;
- ультразвуковым распылением;
- центробежным распылением.

Atomising Systems имеет опыт в производстве оборудования, в частности, для получения порошков легкоплавких материалов, из которых изготавливаются припои для электронной промышленности. В линейке оборудования имеются как лабораторные атомайзеры, позволяю-

щие получать в день 1-5 кг порошка, так и промышленные установки производительностью более 5 т в день (рисунок 7.27).



Рисунок 7.27. Атомайзер фирмы Atomising Systems

В России компания Atomising Systems Ltd работает в содружестве с «Уральской фирмой нетрадиционных методов обработки и новых материалов (НЕТРАММ)». Эта фирма изготавливает и поставляет лабораторные установки для получения порошков цветных и черных металлов с регулируемой дисперсностью (от 10 до 1000 мкм), формой частиц (от нитевидной до сферической) и скоростью охлаждения (от 10^3 до 10^7 К/с) различными методами, включая и газовую атомизацию [28].

Обычно фирмы-производители АМ-машин являются и поставщиками расходных материалов. Порошок закупают на фирмах-изготовителях порошковых материалов, закупленный порошок подвергается просеиванию и разделению на фракции, далее производится смешение фракций в определенных соотношениях и фасовка в герметичную тару. Так производители АМ-машин страхуют себя от возможных претензий к качеству порошков со стороны потребителей. В таблице 7.1 приведен перечень порошковых композиций, предлагаемый компания-

ми–производителями АМ-машин. Из приведенных данных видно, что большинство компаний предлагает практически идентичный набор строительных материалов, однако при этом нет никаких гарантий того, что порошки, например EOS, можно применять в машинах SLM Solutions или Realizer.

Таблица 7.1. Порошковые композиции, поставляемые компаниями – производителями АМ-машин

Фирма	Материал	Фирменное обозначение	Стандарты Европы	Стандарты США
Concept Laser	Нерж. сталь	CL 20ES	1.4404	316L
	Инструм. сталь (Cr>12%)	CL 90RW	1.2083	
	Инструм. сталь	CL 91RW		
	Мартенситноста-реующая сталь	CL 50/60WS	DIN 1.2803 1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13
	Al- сплав AlSi12	CL 30AL	ISO AlSi12	AA 4047 ASTM A04130
	AlSi10Mg	CL 31AL	ISO 3522	A03600
	Ti6Al4V ELI	CL 40TI ELI		ASTM F136
	Ti6Al4V	CL 40TI	ISO 5832-3	ASTM F1472, AMS 4928, AMS 4967
	Никелевый сплав Inconel 718	CL 100NB	ISO 6208 UNS N07718	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
	Сплав Co-CR (remanium star)	CL 111 CoCr	DIN EN ISO 9693/DIN EN ISO 22674	ASTM F75
EOS	AlSi10Mg	AlSi10Mg	ISO 3522	A03600
	Сплав CoCrMo, биосовместимый	CobaltChrome MP1	ISO 5832-4, ISO 5832-12, UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
	Сплав Co-Cr	CobaltChrome SP1	ISO 5832-4, ISO 5832-12, UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
	Мартенситноста-реующая сталь	MaragingSteel MS1	1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13

Продолжение таблицы 7.1

E	Инконель 625	NickelAlloy IN625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F,
---	--------------	-------------------	--------------------------------	---------------------------

	Инконель 718	NickelAlloy IN718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	AMS 5599G UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
	Нерж. сталь	St.Steel GP1	1.4542	17-4 PH
	Нерж. сталь	St. Steel PH1	DIN 1.4540	UNS S15500
	Сплав Ti6Al4V	Titanium Ti64	ISO 5832-3	ASTM F1472
	Сплав Ti6Al4V ELI	Titanium Ti64 ELI	ISO 5832-3, UNS R56401	ASTM F136
	3D Systems	Нерж. сталь	ST4404D	1.4404
Мартенситноста-реющая сталь		ST2709B	1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13
Сплав Co-Cr		ST2724G	ISO 5832-4	
SLM Solutions	Коммерчески чистый титан	CP Titanium	ISO 5832-2 UNS R50400	ASTM Grade 2
	Сплав Ti6Al4V	Ti6Al4V	ISO 5832-3	ASTM F136 ASTM F1472
	Сплав TiAl6Nb7	TiAl6Nb7	ISO 5832-11	ASTM F1295
	Мартенситноста-реющая сталь	1.2709	1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13
	Нерж. сталь	1.4404	1.4404	
	Жаропрочная сталь	1.2344	1.2344	AISI H13
		1.4542	1.4542	
	Алюминиевые сплавы	AlSi12	ISO AlSi12	ASTM AA 4047, ASTM A04130
		AlSi10Mg	ISO AlSi10Mg	A03600
		AlSi7Mg	ISO AlSi7Mg	ASTM A13560
		AlSi9Cu3	ISO AlSi9Cu3	
	AlMg4,5Mn0,4	ISO 5182		
	Сплав Co-Cr	Co212-f		ASTM F75
Инконель 625	Inconel 625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G	
Инконель 718	Inconel 718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	AMS 5662, AMS 5664	
Инконель HX	Inconel HX	2.4665		

Продолжение таблицы 7.1

R	Мартенсит-ностареющая	Tool steel H13	DIN 1.2803, 1.2709	18% Ni Maraging 300, AISI H13
---	-----------------------	----------------	-----------------------	-------------------------------

сталь			
Коммерчески чистый титан	CP Titanium	ISO 5832-2, UNS R50400	ASTM Grade 2
Титановый сплав	Titanium V4	ISO 5832-3	ASTM F136, ASTM F1472
Al-сплав	н/д	н/д	н/д
Сплав Co-Cr	Cobalt chrome	ISO 5832-4, ISO 5832-12, UNS R 31538	ASTM F75, ASTM F1537
Нерж. сталь	316L	1.4404	316L
Никелевый сплав Inconel 718	Inconel 718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
Золото, серебро, платина	н/д	н/д	н/д

Рынок аддитивных технологий стремительно изменяется. Происходит слияние и поглощение компаний – производителей АМ-машин, возникают новые центры оказания услуг в области АМ-технологий, эти центры объединяются в европейскую, а теперь уже и в глобальную сеть оказания услуг. С другой стороны, происходит специализация: компании сворачивают бизнес в мало доходной для них области, но развивают направления, в которых компетенции компании наиболее конкурентоспособны.

То же происходит и в сфере разработки, создания, производства и поставок модельных материалов. Ряд ведущих компаний – производителей порошков широкого спектра, например Sandvik Osprey, уже выделяют отдельную технологическую «нитку» для производства порошков специально для нужд аддитивных технологий. Возникают фирмы-сателлиты, адаптирующие «серийные», массовые порошки для аддитивных технологий. В таблице 7.2 приведены данные по материалам, которые предлагает одна из новых компаний на рынке аддитивных технологий – компания LPW Technology (Великобритания). Химический состав материалов приведен по фирменной спецификации, российский аналог можно найти в соответствующих марочниках сплавов.

Компания Raymor Industries Inc. (Канада) – одна из немногих компаний использует технологию плазменной атомизации сплавов Ti, Co-Cr, а также Mo и Nb, предлагая при этом порошки очень высокого качества в широком диапазоне фракционного состава. Порошки имеют следующую градацию по фракциям: 0-25, 0-45, 45-106, 45-150, 0-250 мкм.

Из числа относительно крупных европейских производителей металлопорошковых композиций, в частности и для АМ-машин, можно назвать следующие компании:

- TLS Technik GmbH & Co. Spezialpulver KG (Германия): титан и титановые сплавы (включая Titanium Grade 1 ASTM, Titanium Grade 2 ASTM, Titanium Grade 5 ASTM (Ti 6Al 4V), цирконий, алюминий и алюминиевые сплавы, магний, никель и никелевые сплавы, стали, ванадий, редкоземельные металлы, медь, золото и платина.

- Wiretec Handels und Beratungsgesellschaft GmbH (Германия) – производство мелкодисперсных кобальтовых порошков $d_{50}=2-10$ мкм.

Для отечественных потребителей расходные материалы – это серьёзная проблема. В связи с неразвитостью российского рынка металлопорошковые композиции для аддитивных машин, в основном, приходится закупать за рубежом. Оптовая цена порошковых материалов на внешнем рынке примерно такова: чистый титан – €230-400/кг; Ti-6Al-4V – €200-400/кг; сплав Co-Cr – €150/кг; сплавы Al – €70-90/кг; Inconel 625 – €75/кг (на условиях EXW, т. е. без НДС, таможенных, транспортных и других затрат). Российским потребителям они обходятся как минимум вдвое, как правило – втрое дороже. При этом существует минимальный предел заказа – от 10 до 50 кг.

Таблица 7.2. Номенклатура порошков компании LPW Technology для применения в АМ-машинах

Марка	Сплав	Химический состав	Стандарты					
Металлопорошки на основе Ni и Co			UNS	ASTM	ISO	AMS	DIN	Аналог
LPW CoCr-1LC + LPW CoCr-2LC	Co-CrMo	C 0.16 max, Mn 1.0 max, Si 1.0 max, Cr 27.0-30.0, Ni 0.50 max, Mo 5.0-7.0, Fe 0.75 max, S 0.010 max, P 0.020 max, Al 0.10 max, Ti 0.10 max, W 0.20 max, B 0.010 max, Co Bal	31537	F1527, F75	5832-4 5832-12			MP1
LPW 718-2	718	Al 0.30-0.70, B 0.006 max, Ca 0.01 max, C 0.02-0.08, Cr 17.0-21.0, Co 1.0 max, Na+Ta 4.75-5.50, Cu 0.30 max, Fe 15.0-21.0, Mg 0.01 max, Mn 0.35 max, Mo 2.80-3.30, Ni 50.0-55.0, P 0.015 max, Se 0.005 max, Si 0.35 max, Ti 0.75-1.15, S 0.015 max.	7718	B537 B670		5832, 5596	2.4668	IN718
LPW 625-2	625	Mo 8.0-10.0, Co 1.0 max, Nb+Ta 3.15-4.15, Al 0.40 max, Ti 0.40, max C 0.10, max, Fe 3.0-5.0, Si 0.50 max, Mg 0.50 max, P 0.015 max, Mn 0.50 Max Cr 20.0-23.0, S 0.015 max, Cu 0.50 max, Ni Bal.	6625	446 Gr1, 443 Gr1		5599, 5666	2.4856	IN625

Продолжение таблицы 7.2

Металлопорошки на основе Fe								
LPW M300-1	18Ni300	C 0.03 max, Mn 0.15, Si 0.10 max, Ni 17.0-19.0, Mo 4.50-5.20, Co 8.50-10.0, Ti 0.80-1.20, P 0.010 max, S 0.010, Fe Bal.					1.2709	MS1
LPW 174-1	17-4ph	Cr 15.0-17.0, Ni 3.0-5.0, Cu 3.0-5.0 Mn 1.0 max, Si 1.0 max, Mo 1.0 max, Nb+Ta 0.15-0.45, C 0.10 max, Fe Bal.	17400	A708	15156-3	5604 5643	1.4548	GP1
LPW 155-1	15-5ph	Cr 14.0-15.0, Ni 3.5-5.5, Cu 2.5-4.5, Mn 1.0 max, Si 1.0 max, Mo 0.5 max, Nb 0.15-0.45, C 0.07 max, Fe Bal.	S15500	A564 A693		5659, 5862		PH1
LPW 316-1	SS 316L	C 0.03 max, Si 0.75 max, Mn 2.0 max, P 0.025 max, S 0.01 max, Cr 17.5-18.0, Ni 12.5-13, Mo 2.25-2.50, Cu 0.50 max, Fe Bal.	S31673	F138 F745	5832-1		1.4404 1.4401	
Металлопорошки на основе Ti								
LPW Ti6-4 -2	Ti6-4	Al 5.5-6.5, V 3.5-4.5, N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.0125 max, Fe 0.25 max, O 0.20 max, Res Each 0.1, Res Total 0.4, Ti Bal.	R56400	F1472, B348gr 5	5832-3	4954, 4911, 4928	3.7164	Ti64

Продолжение таблицы 7.2

LPW Ti6-4ELI-2	Ti6-4 ELI	Al 5.5-6.5, V 3.5-4.5, N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.0125 max, Fe 0.25 max, O 0.13 max, Res Each 0.1, Res Total 0.4, Ti Bal.	R56401	F136, B348 gr 23	5832-3	4956		
LPW CpTi1-2	CpTi gr 1	N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.015 max, Fe 0.20 max, O 0.18 max, Res Each 0.1, Res Total 0.4, Ti Bal.	R50250	F67, B348gr 1	5832-2			
LPW CpTi2-2	CpTi gr 2	N 0.03 max, C 0.08 max, H2 0.015 max, Fe 0.30 max, O 0.25 max, Res Each 0.1, Res Total 0.4, Ti Bal.	R50400	F67, B348gr 2	5832-2	4921 4902		
Металлопорошки на основе Al								
LPW AlSi10Mg-1	AlSi10 Mg	Si 9.0-11.0, Mg 0.2-0.45, Fe 0.55 max Ni 0.05 max, Cu 0.05 max, Zn 0.10 max, Mn 0.45 max Pb 0.05, Sn 0.05 max, Ti 0.15 max, Al Bal	A13600	A03600			3.2381.01	
LPW AlSi12-1	AlSi12	Si 11.0-13.0 Mg <0.10, Fe 0.55 max, Ni 0.05max, Cu 0.05 max, Zn 0.10 max, Mn 0.45 max, Pb 0.05, Sn 0.05 max, Ti 0.15 max, Al Bal.					3.2581.01	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2010 г. по инициативе компании EWI в США создан консорциум АМС (AM-Consortium), целью которого является повышение глобальной конкурентоспособности американской промышленности. В АМС входят 33 члена из частного сектора, правительства США и научных организаций. Среди них – Boeing, General Electric, General Dynamics, Goodrich, Honeywell, Lockheed Martin, Morris Technologies, Northrop Grumman, Rolls-Royce и Sciaky, правительственные учреждения, связанные с оборонным ведомством, NASA, NAVAIR и NIST [30].

В 2011 г. мировой лидер в области аддитивных технологий – компания 3D Systems открыла свой собственный университет для подготовки специалистов и развития лазерных технологий послойного синтеза.

В 2012 г. Великобритания выделила £7 млн. на гранды для проведения НИОКР в области аддитивных технологий [31]. В августе того же года совершил первый полет беспилотный самолет, построенный в Саутгемптонском университете (Англия) полностью по аддитивным технологиям [32].

В 22-х странах созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс GARPA – Global Alliance of Rapid Prototyping Associations.

В марте 2012 г. Президент США Б. Обама объявил о выделении \$1 млрд. на создание 15 институтов «промышленных инноваций». В рамках этой программы \$45 млн. было выделено на создание National Additive Manufacturing Innovation Institute – NAMII при финансовой поддержке министерств обороны, энергетики и других федеральных ведомств. Американцы уже дали NAMII второе название: «America Makes» (рисунок А1), т. е. «Америка делает», имея в виду, что Америка не просто говорит об аддитивных технологиях, а делает, создает их.

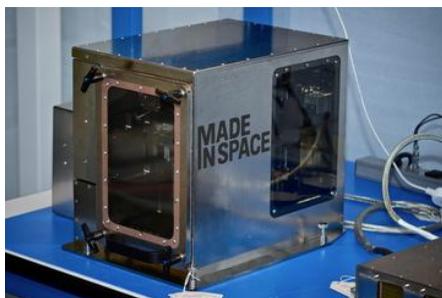
В марте 2013 г. шведская компания Arcam запустила в производство машину нового поколения Arcam Q10 специально предназначенную для изготовления ортопедических имплантов [33].



(Источник: <https://americamakes.us/>)

Рисунок А1. Создание национальных центров аддитивных технологий

В 2010 г. была основана небольшая стартап-компания Made in Space, которая год спустя получила от NASA грант \$824597 на разработку принтера для работы в условиях невесомости. В 2013 г. NASA заключила с фирмой контракт на создание 3D-принтера, а в сентябре 2014 г. первый принтер «Zero-G» («Нулевая гравитация») отправился в космос на МКС, рисунок А2).



(Источник: <http://www.space.com>)

Рисунок А2. Первый принтер на пути к космической станции

В 2013 г. NASA выделила компании SMRC (Systems and Materials Research Corporation) средства в объеме \$125000 на проведение первой фазы исследований по созданию 3D-принтера для приготовления пищи на борту космического корабля.

В августе 2014 г. после 10-ти летнего путешествия аппарат Rosetta Европейского космического агентства (ЕКА) достиг окрестности кометы 67Р-Чурюмова-Герасименко и на подлете к цели сделал её снимки, по которым на 3D-принтере была построена трёхмерная модель кометы (рисунок А3).

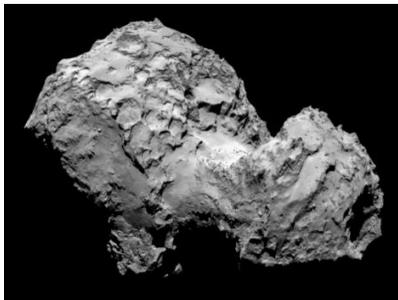


Рисунок А3. Директор ЕКА по науке и роботизированной разведке Альваро Хименес с моделью кометы 67P-Чурюмова-Герасименко [34]

В Китае в 1995 г. Северо-западный политехнический институт (Northwestern Polytechnical University, NPU) начал исследования лазерных технологий послойного синтеза деталей из металлопорошковых композиций, включая титановые сплавы, жаропрочные и нержавеющие стали. Исследования были сфокусированы на изучении микроструктуры и прочностных характеристик синтезируемых деталей. А в 2012 г. в NPU был произведен 5-ти метровый лонжерон для пассажирского самолета Comac C919, рисунок А4 [35].

В 2013 г. китайская компания Nanfang Ventilator Co., Ltd создала гигантский 3D-принтер размерами: длина 28 м, ширина 23 м, высота 9,5 м. Рабочая зона – диаметр 6 м, высота 10 м. Строительные материалы: конструкционные, углеродистые, нержавеющие стали. Принтер будет использоваться в производстве продукции для атомной энергетики, судостроительной и аэрокосмической отраслей.



Рисунок А4. Лонжерон самолета Comac C919[35]

В Китае в 2013 г. Даляньский технологический университет (Dalian University of Technology) совместно с компанией Unit Science and Technology Development Co. Ltd. разработали принтер для синтеза песчаных форм из плакированного песка с рабочей зоной по трём осям 1,8 м, рисунок А5.



Рисунок А5. Песчаная синтез-форма [35]

В Китае 45 университетов и 20 исследовательских организаций работают в области лазерной техники, в частности, и для нужд аддитивных технологий.

Число инсталляций АМ-машин в Южной Африке к 2012 г. составило 450 единиц, причем в 2011 г. за счет государственных субсидий было закуплено оборудования на \$5,5 млн., а общая сумма инвестиций составила \$9,5 млн. [37].

Специализированные журналы: Rapid Prototyping Journal, TCT Magazine, Wohlers Report, RTejournal (Rapid Technology Electronic Journal), International Journal of CAD/CAM.

Высокопрофессиональные интернет-ресурсы и независимые профессиональные объединения, такие как: www.wohlersassociates.com, www.additive3d.com; Additive Manufacturing Users Group (США).

Лавинообразный поток публикаций, патентов. Число выданных патентов США: 2009 г. – 265; 2010 г. – 419; 2011 г. – 474; число заявок на патент США: 2009 г. – 678; 2010 г. – 797; 2011 г. – 827 [37].

Разрабатываются новые материалы, совершенствуются софты, развивается сервисная сеть. Всё это также способствует более глубокому проникновению аддитивных технологий практически во все сферы творческой деятельности человека. В США, Великобритании и других странах Европы значительное количество (несколько тысяч) недорогих принтеров было закуплено школами и колледжами в рамках специальной образовательной программы. Ожидается, что это будет способствовать усилению в среде молодежи интереса к инженерным специальностям.

К сожалению, в России ничего подобного мы не увидим. Безусловно, нужно отметить фундаментальные работы ИПЛИТ (Институт проблем лазерных и информационных технологий, Шатура), ряд научных работ в Самарском филиале физического института им. Лебедева РАН, в Томском политехническом университете, Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики, Московском инженерно-физическом институте, Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН [38]. Однако эти работы не носят системного характера, ограничиваются лабораторными исследованиями и *не имеют конечной целью создание отечественных АМ-машин для нужд российской промышленности*. И надо признать, отечественное научное сообщество, специалисты-технологи не смогли донести до государственной власти важность АМ-технологий, раскрыть степень опасности катастрофического отставания России в этой стратегически важной отрасли. Успехи конкурентов России в космической отрасли, в авиа- и автостроении не в последнюю очередь объясняются глубоким внедрением АМ-технологий во все значимые для этих отраслей технологические цепочки. Проблема разработки специальной государственной Программы не только по исследованию, но и созданию отечественной индустрии производства аддитивных машин, строительных (модельных) материалов, подготовки квалифицированных кадров давно созрела.

Настала также острая необходимость пересмотра Государственных стандартов и отраслевых нормативных документов в части требова-

ний к технической документации, методологии контроля и т. д. Всё чаще в практической деятельности отечественные специалисты, работающие в сфере АФ-технологий, сталкиваются с проблемой «несоответствия» их методов работы формальным требованиям ГОСТов или ОСТов, в которых нет даже упоминания о цифровых методах изготовления, контроля, испытаний и т. д. На стадии НИОКР эта проблема как-то решается. Но вот на стадии подготовки к серийному производству она встает остро: «Не положено, ГОСТом не предусмотрено. Мы не имеем права применять эти методы, они не регламентированы».

Есть и ещё один тревожный аспект. Уже сейчас ряд авторитетных зарубежных организаций с озабоченностью поднимают вопрос о проблеме пиратства и незаконного производства определенных видов продукции, включая оружие, и выступают за немедленное вмешательство государства в правовое обеспечение деятельности на промышленном рынке в новых условиях [39, 40].



Рисунок А6 – Первый в мире пистолет (45ACP), все детали которого, включая нарезной ствол, построены на 3D-принтере по технологии DMLS (компания Solid Concept, [40])

* * *

Экономика приобретает инновационный характер вследствие инновационного развития в первую очередь сферы материального производства, в основе которого лежат **технологии** – «знание и умение» сделать что-либо: микросхему, программный продукт, автомобильную шину, лопатку турбины или медицинский препарат.

Именно технологии в широком смысле – наличие или отсутствие их – определяют положение экономики страны в мире, её стратегические позиции. Наличие технологий дает в руки ученому или конструктору мощные инструменты для реализации новых идей. Технологии позволяют применять новые высокоэффективные материалы, новые методы управления и, таким образом, обуславливают новое функциональное и интеллектуальное содержание продукта. Отсутствие технологий ограничивает творческий потенциал ученых и конструкторов, вынуждает их применять те технические решения, которые есть в их распоряжении, а не те, которые требуются для достижения целей. Поэтому сами технологии являются *главным объектом инновационной деятельности*.

Рассмотренные в данной работе технологии являются не только современными и высокоэффективными, но инновационными по своей сути, поскольку сами позволяют генерировать новые технологии, несут в себе новое качество.

АМ-технологии с полным основанием относят к технологиям XXI в. 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.

И наконец, степень использования АМ-технологий в материальном производстве является верным индикатором реальной индустриальной мощи государства, индикатором его инновационного развития.

Библиографический список

1. *David L. Bourella, Joseph J. Beaman, Jr.a, Ming C. Leub and David W. Rosenc.* A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. RapidTech 2009, www.rapidtech.itu.edu.tr.
2. *Beaman J. J.* Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective. The University of Texas. Austin, Texas.
3. *Greul M.* Metal and ceramic prototypes using the Multiphase Jet Solidification (MJS) process Metallische und keramische Prototypen mit dem Multiphase jet Solidification (MJS) Verfahren. Fraunhofer IFAM // Conference on Rapid Tooling & Manufacturing, 1997.
4. *Techel A. et al.* Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), интернет-издание Laser Institute of America. Доступ свобод.: <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing>
5. *Sabina L. Campanelli et. al.* Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process. Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>
6. *Безобразов Ю.А. и др.* Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM-методами быстрого прототипирования. СПбГПУ.
7. *Шабров Н.Н.* Реальные достижения виртуальной реальности // Rational Enterprise Management. – 2011. – № 2. – С. 46-48.
8. 3-D Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.uasvision.com>.
9. *Khoshnevis B. et al.* Metallic part fabrication using Selective Inhibition Sintering (SIS). Department of Industrial and Systems Engineering University of South California, Los Angeles, CA 90089, USA. [Электронный ресурс], https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:EchCrGNayJEJ:www-bcf.usc.edu/~yongchen/Research/SIS-Metal-RPJ.pdf+SIS+additive+technology&hl=ru&gl=ru&pid=bl&srcid=ADGEESjQ_v59NxxBQh5sQiUz

3QgjtNeeWcqlcu- yuFb03Z5f2q8o892B463G6LPjxC0O6xWaq4NyanW-ZxujRHaoxCGsO0uscREI3KhhXFjVikdhKMPkZESqv6lZqjCIadA1GLoe82W&sig=AHIEtbSa8cUItK_ aiOM_ff_zJqsMSakp6A

10. 5-akselinen pystykarainen työstökeskus MATSUURA MAM72-35V on uudistunut. 18.12.2012. Доступ свобод.:

<http://www.makrum.fi/blog/matsuura-uudistanut-mam72-35v-pystykaraisen-tyostokeskuksen/>

11. *Louvis E. et. al.* Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology. Volume 211, Issue 2, 1 February 2011, Pages 275–284. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom.

12. *Yasa E. et. al.* The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts // Rapid Prototyping Journal. – 2011. – Vol. 17. – Iss: 5. – P. 312-327.

13. *Yasa E., Kruth J.* Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management 6 (2011) 4. P. 259-270, Scientific paper [Электронный ресурс]. URL: <https://lirias.kuleuven.be>.

14. *Beyer E.* New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik. MAY 6, 2011 in LASER CLADDING, LASER MANUFACTURING [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performance-laser-cladding/>

15. *Dutta B. et. al.* Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition ADVANCED MATERIALS & PROCESSES • MAY 2011. P. 33-36

16. *Robbie Adams*, ION FUSION FORMATION, Pat. US 6,680,456 B2, Jan. 20, 2004.

17. *Beyer E.* New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik. MAY 6, 2011 in LASER CLADDING, LASER MANUFACTURING [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performance-laser-cladding/>

18. *Осокин Е. Н.* Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Электрон. дан. (5 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
19. *Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C.* Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products. Produktionsmethoden und Anwendungen für qualitativ hochwertige Metallpulver und spruhkompaktierte Halbzeuge. Stahl und Eisen. – 2005.
20. *Tsantrizos P. G. et. al.* Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization. Pat. US № 5707419, дата выдачи: 13 янв. 1998.
21. Компания Raymor. Интернет-сайт компании Raymor. URL: www.raymor.com.
22. *Boulos M.* Plasma power can make better powders. Metal Powder Report. 2004. – Vol. 59. – Issue 5. – P. 16-21.
23. *Donachie M.J., Donachie S.* Superalloys: A Technical Guide, 2 nd Ed. – ASM International, 2002. – 438 p.
24. *Fngelo H. C., Subramanian R.* Powder Metalurge: Science, technology and application. – New Dehli, 2009.
25. *Ahsan M.N. et. al.* A comparatine study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // Materials Science and Engineering. – 2011. – P. 7648-7657.
26. *Ahsan M.N. et. al.* A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping. – London: Taylor & Francis Group, 2012.
27. Интернет-источник: <http://foundrymag.com/feature/new-tooling-alloys-molds-and-dies-advancing-market>
28. Компания НЕТРАМ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.netramm.com>.
29. *Дорошенко В.А., Чудайкин А.И., Юдин В.А.* Модульные производственно-технологические комплексы для мелко- и среднесерийного многономенклатурного производства / Литейное производство. №2, 2012.
30. Additive Manufacturing Consortium, Интернет-источник: <http://ewi.org/additive-manufacturing-consortium/>

31. UK Government offers investment in AM. TCT additive manufacturing and professional 3D printing. October 22, 2012 [Электронный ресурс] режим доступа: <http://www.tctmagazine.com/articles/uk-government-offers-investment-in-am/>
32. UAV fully fabricated by additive layer manufacturing. 27 August 2012 [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html>
33. Arcam Q10- Changing the scene for implant manufacturing. [Электронный ресурс] режим доступа: <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-q10/>
34. Europe's Rosetta Spacecraft Makes Historic Arrival at Comet. [Электронный ресурс] режим доступа: <http://www.space.com/26740-rosetta-spacecraft-comet-arrival.html>
35. Massive 3D Printer Under Development In China. [Электронный ресурс] режим доступа: <http://3dprinterplans.info/tag/nanfang-ventilator-co/>
36. China developing world's largest 3D printer, prints 6m metal parts in one piece. [Электронный ресурс] режим доступа: <http://www.3ders.org/articles/20140207-china-developing-world-largest-3d-printer--prints-6m-metal-parts-in-one-piece.html>
37. Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, ISBN 0-9754429-8-8, 2012. 286 p.
38. *Kovaleva I.O., Kovalev O.B.* Simulation of the acceleration mechanism by light-propulsion for the powder particles at laser direct material deposition. Khristianovich's Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia/ Optics and Laser Technology, Volume 44, Issue 3. P. 714-725.
39. *Woodcock J.* 3D printing, government and police. TCT Magazin, Volume 20/Ussue 6. Nov.12.2012. 5 p.
40. World's First 3D Printed Metal Gun. [Электронный ресурс] режим доступа: <https://blog.solidconcepts.com/industry-highlights/worlds-first-3d-printed-metal-gun/>

ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКИ

Сайты компаний-производителей аддитивных машин и модельных материалов

Австрия: Lithoz GmbH, www.lithoz.com.

Великобритания: Bits from Bytes, www.bitsfrombytes.com.

Renishaw, www.renishaw.com.

Германия: Concept Laser GmbH, www.concept-laser.de.

Envisiontec GmbH, www.envisiontec.de.

EOS GmbH, www.eos.info.

Fruth Innovative Technologien GmbH, www.pro-fit.de.

ReaLizer GmbH, www.realizer.com.

Sintermask, www.sintermask.com.

SLM Solutions GmbH, www.slm-solutions.com.

Voxeljet, www.voxeljet.com.

Дания: Blueprinter, www.blueprinter.dk.

Ирландия: Mcor Technologies, www.mcor technologies.com.

Италия: CRP Technology, www.crp technology.com.

D-Shape, www.d-shape.com.

DWS, www.dwssystem.com.

Канада: Raymor Industries Inc., www.raymor.com.

Китай: Beijing Tiertime Technology Co. Ltd., www.lyafs.com.cn.

Beijing Yinhua Laser Rapid Prototypes Making and Mould Technology Co. Ltd., www.rpyinhua.com.

Delta Micro Factory Corp., www.pp3dp.com.

Shaanxi Hengtong Intelligent Machine Co., Ltd., www.china-rpm.com.

Shanghai Union Technology Co., Ltd., www.union-tek.com.

Trump Precision Machinery Co., Ltd., www.trumpsystem.com.

Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd., www.binhurp.com.

Корея Южная: Carima, www.carima.co.kr.

InssTek, Inc., www.insstek.com.

США: Advanced Laser Materials, www.alm-llc.com.

Asiga, www.asiga.com.

DSM Somos, www.dsm.com.
Essential Dynamics, www.essentialdynamics.net.
ExOne, www.exone.com.
Fab@Home, www.nextfabstore.com.
Integra, www.integra-support.com.
MakerBot Industries, www.makerbot.com.
Optomec, Inc., www.optomec.com.
POM, www.pomgroup.com.
Sciaky, www.sciaky.com.
Solidscape, Inc., www.solid-scape.com.
Stratasys Inc., www.stratasys.com.
3D Systems, Inc., www.3dsystems.com.
Франция: Arkema, www.arkema.com.
Irepa Laser, www.easyclad.com.
Phenix Systems, www.phenix-systems.com.
Швеция: Arcam, www.arcam.com.
Япония: Agilista, www.agilista.jp.
Aspect Inc., www.aspect-rp.co.jp.
CMET Inc., www.cmet.co.jp.
D-MEC Ltd., www.d-mec.co.jp.
Matsuura, www.matsuura.co.uk/matsuura/lumex-avance-25.
TriAl Corp., www.tri-al.co.jp/index_e.html.

ГЛОССАРИЙ

ABS, АБС-пластик – акрилонитрилбутадиенстирол, химическая формула $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$, ударопрочная техническая термопластическая смола, широко используется в промышленности.

Additive Fabrication (AF) – стандартизированное обобщающее англоязычное название аддитивных технологий; аддитивные технологии.

Additive Manufacturing (AM) – то же, что и Additive Fabrication (AF).

Additive Processes – аддитивный процесс.

Additive Systems – машины и оборудование, обеспечивающие аддитивный процесс изготовления изделия.

AF – Additive Fabrication.

AFK – ARBURG Kunststoff-Freeformen, технология, разработанная компанией ARBURG, согласно которой модель изготавливают из промышленных (гранулированных в исходном состоянии) полимеров.

AM – Additive Manufacturing.

AMF – Additive Manufacturing File, формат компьютерных данных, альтернативный формату Stl., применяемому с 1987 г. в качестве базового для передачи данных компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели. AMF базируется на языке EML (Extensible Markup Language – расширяемый язык разметки) и поддерживает размерность, цвет, текстуру, триангуляцию, сетчатые структуры, которые Stl-формат не поддерживает; более компактный, чем Stl-файл.

ASTM International – American Society for Testing and Materials – организация в США, которая занимается разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг, в частности и в области аддитивных технологий.

Bed Deposition – один из основных видов аддитивных технологий; предполагает предварительное формирование слоя построения в виде равномерно распределенного по всей поверхности рабочей платформы сыпучего или жидкого строительного материала, а затем селективное отверждение фрагментов сформированного слоя в соответствии с теку-

шим сечением CAD-модели, например, методом спекания, сплавления, склеивания или полимеризации частиц модельного материала.

Binder Jetting – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством связующего состава, селективно связывающего частицы сыпучего модельного материала.

Blueprinter – название компании-производителя АМ-машин (Дания); в машинах используется технология спекания порошковый полимер за счет инфракрасного излучения, генерируемого посредством специальных нагревательных приборов, размещенных в подвижной головке.

CAD/CAM/CAE- сочетание, подразумевающее использование всего комплекса цифровых технологий: CAD – проектирование (Computer-Aided Design), CAM – материализация на технологическом оборудовании посредством числового программного управления (Computer-Aided Manufacturing), CAE – расчет и анализ посредством специализированного программного обеспечения (Computer-Aided Engineering).

CIM-технологии – Ceramic Injection Molding, разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение керамического порошка со связующим-пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопласт-автомат), получение таким образом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.

Concept Laser – компания-производитель АМ-машин (Германия).

Direct Deposition – «непосредственное нанесение материала», один из основных видов аддитивных технологий; предполагает подачу строительного материала (в виде прутка, пасты, вдуваемого порошка) непосредственно в то место, где в данный момент времени происходит процесс послойного синтеза.

Direct energy deposition – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал и

энергия для его сплавления подводятся одновременно в зону построения изделия.

DLP – Digital Light Procession, название процесса, применяемого в АМ-машинах компании Envisiontec.

DM – Direct Manufacturing, одно из названий аддитивного процесса, разработанного компанией Sciaky (США).

DMD – Direct Metal Deposition, непосредственное нанесение металла, аббревиатура названия АМ-процесса и технологии.

DMF – Direct Metal Fabrication, общее название АМ-технологий, предполагающих послойный синтез изделий из металла, иногда используется в значении DMD

DMLS – Direct metal laser sintering, непосредственный лазерный синтез из металла (порошкового), наименование АМ-технологии, разработанной компанией EOS (Германия).

DoD – Drop on Demand, технология компании Solidscape.

EBM – Electron Beam Melting, аббревиатура название аддитивного процесса, в котором сплавление модельного материала производят посредством электронного луча (компания Arcam, Sciaky).

EIGA-технология – Electrode induction guide inert gas atomization, разновидность технологии газовой атомизации для получения порошков реактивных и жаропрочных сплавов посредством индукционной плавки и распылением инертным газом.

EOS – Electro Optical Systems GmbH, компания-производитель АМ-машин (Германия).

Euromold – крупнейшая ежегодная выставка аддитивных технологий и оборудования (Франкфурт-Майн, Германия).

Fcubic – название одной из аддитивных технологий и компании, её разработавшей; в настоящее время приобретена компанией **Höganäs AB** (Швеция); особенность технологии в том, что вместо связующего при построении грин-модели впрыскивают специальный состав, ускоряющий поглощение теплового излучения. После построения грин-модель не извлекают из массива материала, а вместе с ним помещают в печь, где про-

исходит спекание обработанной составом модели, тогда как не обработанная часть материала остается неспеченной.

FDM – Fused Deposition Modeling, название AM-технологии компании Stratasys; относится к категории Material extrusion.

FFF – Fused Filament Fabrication, то же, что и FDM

FILT – Fraunhofer Institute for Laser Technology

HIP - Hot Isostatic Pressure, горячее изостатическое прессование; технология, применяемая для пост-обработки синтезированных изделий, в частности из алюминия и титановых сплавов, с целью устранения внутренней микропористости.

Höganäs AB – компания-производитель AM-машин (Швеция); использует технологию fcubic.

Jetting – «струйные технологии», стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал или связующий состав подводятся в зону построения изделия (обычно) посредством многосопловых устройств в виде подвижных в плоскости X-Y рабочих головок.

Ink-Jet – то же, что и Binder Jetting.

Kira – компания-производитель AM-машин (Япония), работающих по технологии Sheet Lamination.

Laser Cusing – фирменное название аддитивного процесса (компания Concept Laser, Германия).

LENS – Laser Engineered Net Shape, фирменное название аддитивного процесса, разработанного компанией Optomec (США).

Lithoz – компания-разработчик AM-технологии LCM – Lithography-based Ceramic Manufacturing (Австрия); технология предполагает фотосинтез грин-модели изделия из жидкого фотополимера с высоким содержанием керамической компоненты с последующим спеканием грин-модели в печи.

Material extrusion – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется по-

средством экструзии пластифицированного тем или иным способом строительного материала.

Matsuura – компания-производитель АМ-машин (Япония), работающих по технологии Multi-functional.

Mcor Technologies – компания-производитель АМ-машин (Ирландия), работающих по технологии Sheet Lamination.

MIM-технология – Metal Injection Molding, разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение металл-порошковой композиции со связующим-пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопласт-автомат), получение таким методом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.

MJS – Multiphase Jet Solidification, название одной из АМ-технологий, в соответствии с которой модельный материал в виде пластифицированного с помощью полимерной пасты металлического порошка подают через экструдер в зону построения.

MLS – Micro Laser Sintering, общее название технологий лазерного синтеза изделий с малыми размерами, обычно менее 5 мм.

MLS – MicroLightSwitch, микро-механические затворы (работающие по принципу «да-нет»), через которые производится выборочное облучение фотоотверждаемой смолы.

MTT-Technologies – компания-производитель АМ-машин (Великобритания), в настоящее время входит в состав компании Renishaw.

Multi-functional – «многофункциональные технологии», стандартизованное название одного из основных видов аддитивных технологий, предполагающих использование в процессе построения не только аддитивных процессов, например, фрезерование.

NIST – National Institute of Standards and Technology, Национальный институт стандартов и технологий, США.

Objet Geometries – компания-производитель АМ-машин (Израиль), работающих по технологии Poly-Jet.

Optomec – компания-производитель АМ-машин (США), работающих по технологии LENS.

PA – polyamide, полиамид (обычно порошковый или гранулированный).

Phenix Systems – компания-производитель АМ-машин (Франция) для синтеза изделий из металлопорошковых и керамических композиций.

PIM-технологии – Powder Injection Molding, общее название порошковых технологий, предполагающих получение изделий из порошковых материалов методами аналогично методам литья пластмасс в термопласт-автоматах. Подразделяются на CIM-технологии (Ceramic Injection Molding) и MIM-технологии (Metal Injection Molding).

Poly-Jet – название АМ-технологии, в соответствии с которой жидкий модельный материал, как правило, фотополимер, подают в зону построения с помощью многоструйной головки.

Powder Bed Fusion – стандартизованное название аддитивной технологии, согласно которой в процессе построения на рабочей платформе предварительно формируют слой строительного материала, и затем часть материала в соответствии с данными текущего сечения САД-модели связывают (сплавляют, склеивают) тем или иным способом.

ProMetal – компания-производитель АМ-машин (Германия), работающих по технологии Ink-Jet, в настоящее время входит в состав компании ExOne (США).

Rapid Prototyping, RP-технологии – устаревшее, но ещё употребляемое название аддитивных технологий.

Realizer – компания-производитель АМ-машин (Германия) для синтеза изделий из металлопорошковых композиций по технологии SLM.

Renishaw – многопрофильная компания, производитель АМ-машин (Великобритания), работающих по технологии SLM.

REP – Rotating Electrode Process.

RP-технологии – то же, что и Rapid Prototyping.

Sciaky – компания-производитель АМ-машин (США), использующая технологию Directed energy deposition (наварка металла посредством EBM).

Sciaky – компания-производитель АМ-машин, работающих по DMD-технологии (США).

SFF – Solid Freeform Fabrication, то же, что и АМ-технологии.

SHS – Selective Heat Sintering, название аддитивной технологии, разработанной компанией Blueprinter (Дания).

Sheet Lamination – название одного из видов АМ-технологий; предполагает построение изделия из листовых модельных материалов.

SIS – Selective Inhibition Sintering, технология в соответствии с которой на неотверждаемую в АМ-процессе часть материала наносят ингибитор – раствор соли металла.

SLA – от Stereolithography Apparatus, общее название технологии и машин, работающих по технологии лазерного послойного отверждения фотополимерных смол.

SLM – Selective Laser Melting (селективное лазерное сплавление), название АМ-процесса;

SLM Solutions – компания-разработчик SLM-технологии и производитель АМ-машин (Германия).

SLS – Selective Laser Sintering, селективное лазерное спекание, обобщенное название одного из видов АМ-технологий.

SMS – Selective Mask Sintering, название АМ-процесса, в котором спекание сыпучего модельного материала производят за счет теплового воздействия специальными нагревательными приборами, формирующими «маску» (образ, контур) сечения строящегося изделия.

Solidica – компания-производитель АМ-машин (США); использует технологию ультразвуковой сварки листовых материалов с последующим фрезерованием каждого слоя.

Solidimension Ltd. – компания-производитель АМ-машин, работающих по технологии Sheet Lamination, в настоящее время вне бизнеса (Израиль).

Solidscape – компания-производитель АМ-машин (США).

SPLS – Solid Phase Laser Sintering, фирменное название аддитивного процесса, разработанного компанией Phenix Systems (Франция);

Spray forming – прогрессивная технология в металлургии, позволяющая получать «выращенные» болванки (заготовки для последующих переделов) методом газовой атомизации расплава и осаждения распыливаемого металла на подложку.

Steriolithography – стереолитография (лазерная), название процесса, в соответствии с которым модельный материал в виде жидкого фотополимера отверждают послойно посредством лазерного луча.

Stl(формат) – сокращение от Steriolithography, формат файлов, применяемый с 1987 г. в качестве базового для передачи данных компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели.

Stratasys – компания-производитель АМ-машин (США), работающих по технологии Material Extrusion.

TPE – Thermoplastic elastomers, термопластичный эластомер, промышленный полимер для литья в термопласт-автоматах.

UAM – Ultrasonic additive manufacturing, название технологии компании Fabrisonic (США), в соответствии с которой тонкие металлические пластины сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием.

Vat Photopolymerization – один из основных АМ-процессов, предполагающий полимеризацию жидкого фотополимера, находящегося в открытой ванне в рабочей камере АМ-машины, посредством светового воздействия, например, лазером.

VIGA – Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization, технологический процесс и установка для получения порошков металлов методом газовой атомизации; компания ALD (Германия).

VIM – Vacuum Induction Melting, вакуумная индукционная плавка, процесс, применяемый для вакуумного литья жаропрочных и реак-

тивных металлов, а также для получения металлопорошковых композиций методом газовой атомизации.

Voxeljet – Voxeljet Technology GmbH, компания-производитель АМ-машин (Германия).

WDM – Wax Deposition Modeling, разновидность технологии DoD.

ZCorp – Z Corporation, компания-производитель АМ-машин (США), в настоящее время приобретена компанией 3D Systems.

М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш
Аддитивные технологии в машиностроении.
Пособие для инженеров.

Подписано в печать Формат

Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. ... Тираж 300.