

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по университетскому политехническому образованию в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки магистров
«Технологические машины и оборудование»*

Издательство политехнического университета
Санкт-Петербург
2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ.....	10
ГЛАВА 2. ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	17
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА РЫНКА АФ-ТЕХНОЛОГИЙ.....	22
ГЛАВА 4. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ.....	38
4.1. Группа Bed Deposition.....	38
4.2. Группа Direct Deposition.....	56
ГЛАВА 5. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ.....	66
ГЛАВА 6. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....	75
ГЛАВА 7. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ.....	115
7.1. Материалы для «металлических» АМ-машин.....	116
7.2. Методы получения металлических порошков.....	120
7.3. Методы получения нанокристаллических материалов..	143
7.4. Производители атомайзеров и поставщики металлопорошковых композиций для использования в АМ-машинах.....	168
ГЛАВА 8. КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ И МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	178
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	182
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	184
ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКИ.....	199
ГЛОССАРИЙ.....	201
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	210

ВВЕДЕНИЕ

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х гг. XX в. Пионером в этой области являлась 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 расчетов (*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.

Цифровые *3D-технологии* открыли уникальные возможности воспроизведения сложнейших пространственных форм, объектов и инженерных конструкций, механизмов. В работе [49, с. 64] было отмечено: «экономическая эффективность *3D-технологии* в ее качественной безальтернативности, безотходности и значительном снижении себестоимости при серийном и массовом производстве. В то же время *3D-технологии* – это тест на интеллектуальный уровень науки, образования, а также профессиональной квалификации трудовых ресурсов и индустриального развития».

Сначала 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 «быст-

рого прототипирования» сейчас изготавливаются вполне коммерческие, товарные «боевые» изделия, которые уже нельзя назвать прототипами – имплантаты и эндопротезы, инструменты и литейные формы, детали самолетов и спутников и многое другое.

Аддитивные технологии (от английского *Additive Fabrication*) – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом послойного добавления (*add*, *англ.* – *добавлять*, отсюда и название) материала.

Получение изделия происходит послойно, шаг за шагом путем формирования (тем или иным способом) слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения CAD-модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим (рис. 1).

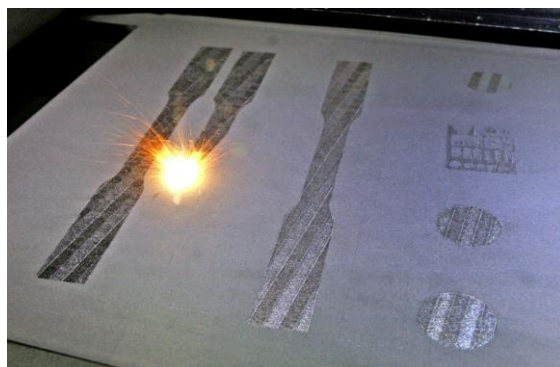


Рис. 1. Процесс послойного лазерного сплавления

Послойный синтез предполагает проведение построения в среде инертного газа с охлаждением определенных зон, с местной усадкой металла, с захватом молекул газа окружающей среды (азота или аргона), с образованием дефектов, вызванных работой лазера, неоднородностью модельного материала и др.

Модельные (строительные) материалы могут быть жидкими (фотополимерные смолы, воски и др.), сыпучими (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов

(полимерные пленки, листы бумаги и др.), а также в виде полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения.

При использовании АF-технологий 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, где 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 чертежной документации в принципе не требуется.

Суть *Additive Fabrication* (AF) может быть проиллюстрирована простым примером: CAD-модель → AF-машина → деталь (рис. 2).

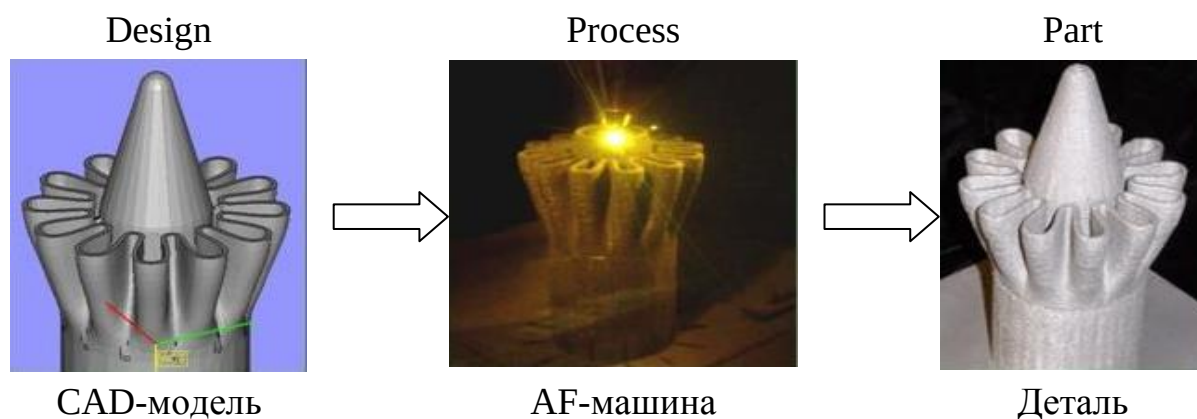


Рис. 2. Процесс Additive Fabrication

Аддитивные технологии охватывают все новые сферы деятельности человека. Дизайнеры, архитекторы, археологи, палеонтологи и представители других профессий используют 3D-принтеры для реализации различных идей и проектов (рис. 3-6). Активно создаются роботизированные комплексы для «печати» быстротвердеющими бетонными смесями.

Все эти работы ведутся при активной поддержке государства и бизнеса из различных источников. Особое внимание уделяется разви-

тию технологий *DMF – Direct Metal Fabrication* – непосредственного выращивания из металла. Эту технологию рассматривают в качестве одной из стратегических технологий для освоения в первую очередь в аэрокосмической и оборонной отраслях.

Все многообразие аддитивных технологий базируется на автоматическом преобразовании электронных CAD-проектов в твердотельные физические формы с помощью специальных цифровых фабрикаторов – *фабберов* (*faber* от англ. слова «*fabrication*»), история появления которых насчитывает несколько столетий. Впервые идея автоматизированного изготовления трехмерного твердого тела была реализована в XVIII в. для копирования медальонов. Автор работ [116-118] считает, что «по прошествии трех-четырех десятков лет человечеству все же удастся воплотить в жизнь немыслимое, реализовав в условиях дома непосредственное производство необходимых предметов по моделям физических объектов, загруженных из глобальной сети» [117, с. 7].



Рис. 3. Музыкальный инструмент из алюмид-наполненного полиамида профессора Diegel (Massey University, Auckland, New Zealand)



Рис. 4. Принтер итальянского инженера Enrico Dini для «печати» фрагментов зданий (технология Inkjet). Строительный материал – песок и неорганическое связующее



Рис. 5. Разработка принтера экструзионного типа для применения в строительстве (Loughborough University, Великобритания)

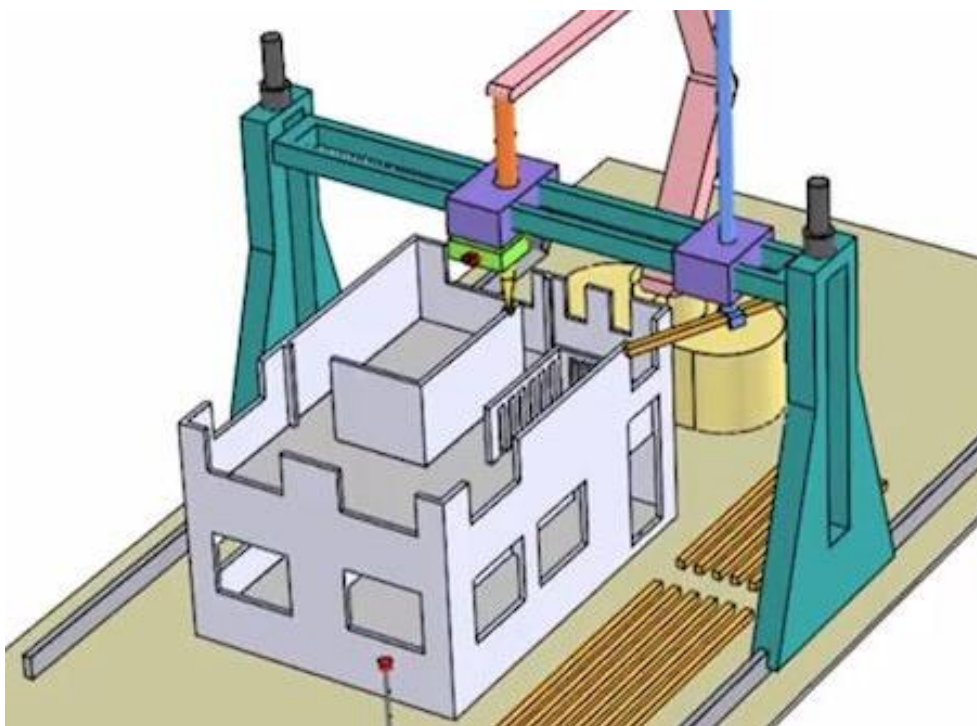


Рис. 6. Проект профессора Behrokh Khoshnevis (Университет Южной Калифорнии). Разработка технологии «печати дома» менее чем за 20 час.

ГЛАВА 1. 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 материалов 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 всякие технологии соединения материала, а только те, которые создают объект по данным 3D-модели или из CAD-данных, т.е. на основе трехмерной компьютерной модели. Это второе ключевое слово – CAD. Третье ключевое слово здесь – «послойно». Можно отметить, что американцы используют в определении «usually» (обычно), по-видимому, допуская, по меньшей мере, теоретическую возможность и непослойного построения.

Рекомендованы два основных термина – *Additive Fabrication* (AF), *Additive Manufacturing* (AM), а также их синонимы - *additive processes*, *additive techniques*, *additive layer manufacturing*, *layer manufacturing* и *freeform fabrication*. Все они могут быть переведены как «ад-

дитивные технологии», их также можно называть *технологиями послойного синтеза*.

В интернет-сообществе, популярной научно-технической литературе и разговорной речи профессионалов встречаются сочетания слов «3D-печать», «3D-принтер» или «3D-принтинг», которые также можно 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, устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным (модельным) материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т.д.);
- по наличию или отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т.д.);
- по методам формирования слоя.

По методам формирования слоя различают два вида аддитивных технологий: *Bed Deposition* и *Direct Deposition*.

При использовании технологии *Bed Deposition* (рис. 7) сначала формируют слой, например, насыпают на рабочую платформу 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.

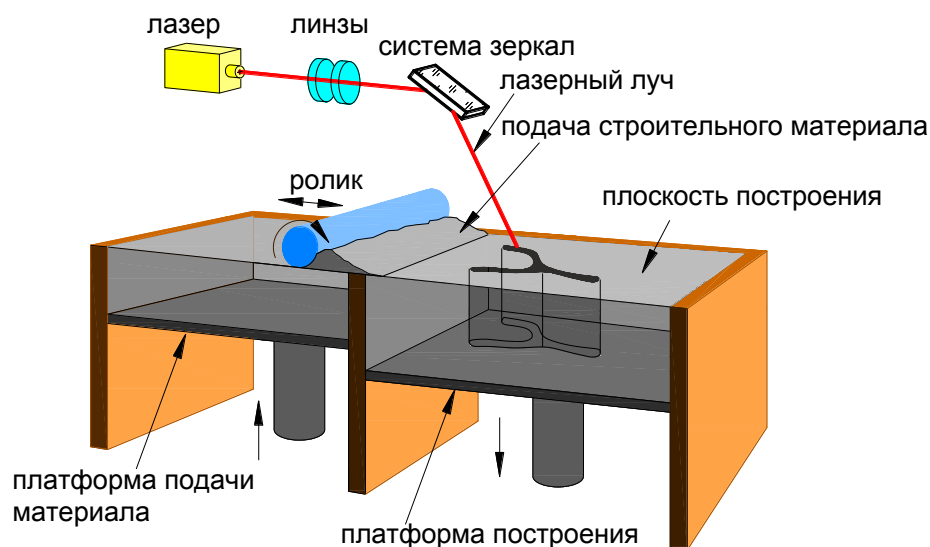


Рис. 7. Bed Deposition

Эта технология, называемая в англоязычной традиции «*Bed Deposition*», предполагает наличие некой платформы, на которой сначала формируют слой, а затем в этом слое выборочно отверждают строительный материал. Положение плоскости построения неизменно. При этом часть строительного материала (в данном случае – порошка) остается в созданном слое нетронутой. Этой 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)*, является источником тепла, а не ультрафиолетового излучения.

В технологии *Direct Deposition* материал подается непосредственно в место подведения энергии и построения в данный момент фрагмента детали. *Direct Deposition* можно перевести как «прямое или непосредственное осаждение» материала, т.е. осаждение в конкретную точку (рис. 8).

Кроме *SLS*- и *SLA*-технологий, к первому виду (*Bed Deposition*) аддитивных технологий 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);
- *LaserCusing* (компания *Concept Laser*, Германия);
- *SPLS - Solid Phase Laser Sintering* (компания *Phenix Systems*, Франция);
- *Ink-Jet* или *Binder jetting* (компании *ExOne*, *3D Systems*, США) и др.

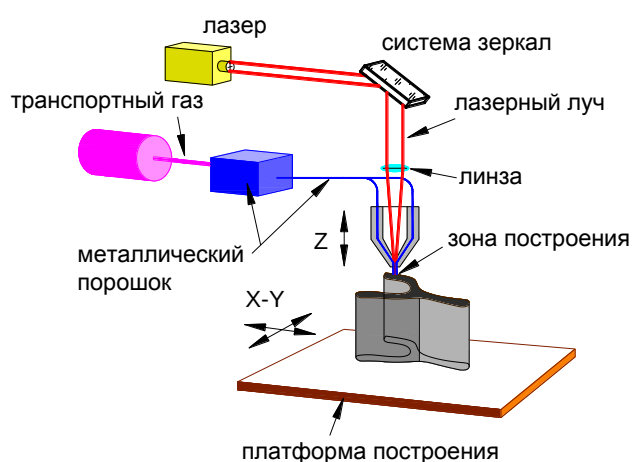


Рис. 8. Direct Deposition (источник www.ipmd.net)

Ко второму виду (*Direct Deposition*) относят 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.

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

1. *Material Extrusion* – «выдавливание материала»;
2. *Material Jetting* – «разбрызгивание материала», «струйные технологии»;

3. *Binder Jetting* – «разбрызгивание связующего»;
4. *Sheet Lamination* – «соединение листовых материалов»;
5. *Vat Photopolymerization* – «фотополимеризация в ванне»;
6. *Powder Bed Fusion* – «расплавление материала в заранее сформированном слое»;
7. *Directed energy deposition* – «прямой подвод энергии непосредственно в место построения».

К первой категории – *Material extrusion* – относится, например, технология *MJS*, 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 «сырая») помещают в печь для удаления связующего и дальнейшего спекания [20], так же как это делается в традиционных *MIM*-технологиях (*Metal Injection Molding*).

Примером технологии *Material Jetting* может быть технология *Polyjet*, 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*.

К категории *Binder Jetting* относятся струйные технологии или *Ink-Jet*-технологии, в которых в отличие от технологии *Material jetting* в зону построения впрыскивается не модельный материал, а связующий реагент (например, технология *ExOne*).

К *Sheet Lamination* категории 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 (рис. 9). Эта технология представляет собой сочетание аддитивной и «вычитающей» технологии.

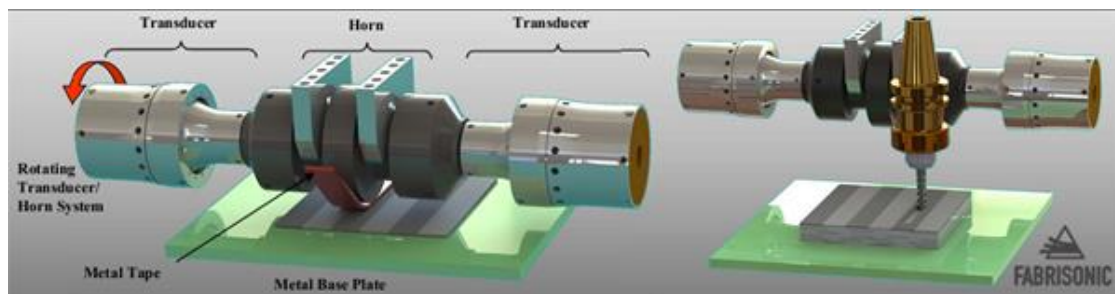


Рис. 9. UAM-технология. Источник www.fabrisonic.com

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

В категорию *Powder Bed Fusion* входит группа *SLS*-технологий, в которых в качестве источника тепла применяется лазер. Это 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. 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 орган – головку устанавливают на роботизированной «руке».

Критерии оценки. Выбор *AF-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 до замены основных узлов;
стоимость модельных материалов;
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.

ГЛАВА 2. ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Предшественниками современных *AF-технологий* считают две оригинальные технологии, появившиеся в XIX в. В 1890 г. *Josef E. Blanthier* предложил способ изготовления топографических макетов – 3-х мерных карт поверхности местности. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались друг на друга в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой (рис. 10).

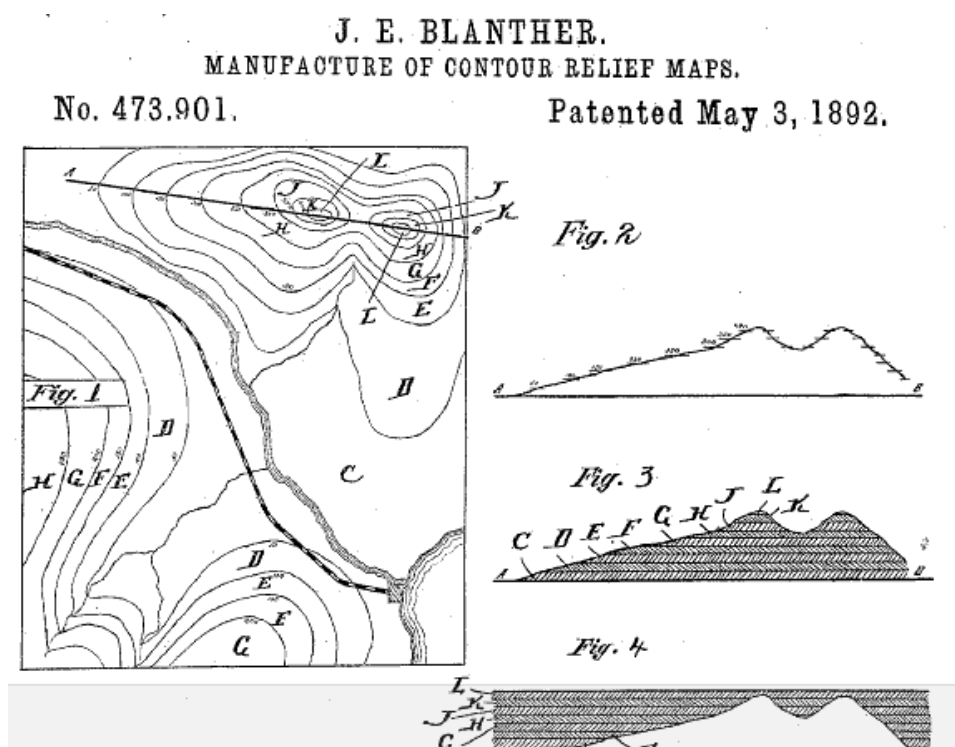


Рис. 10. Blanthier J.E. Патент США 473901, выдан 03.05.1892 г.

Практическое применение эта идея нашла в *ЛОМ-технологии* – *Lamination Object Manufacturing* – послойном ламинировании или склеивании тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051-0,25 мм [98]. 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. (рис. 11). Суть ее 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. Для уменьшения трудоемкости процесса Willème немец Carlo Baese в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – 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 (рис. 12). Этот способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набора контуров.

Контурные затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким образом формировался трехмерный образ объекта. Или же, как и у *François Willème*, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трехмерного образа с помощью режущего инструмента.

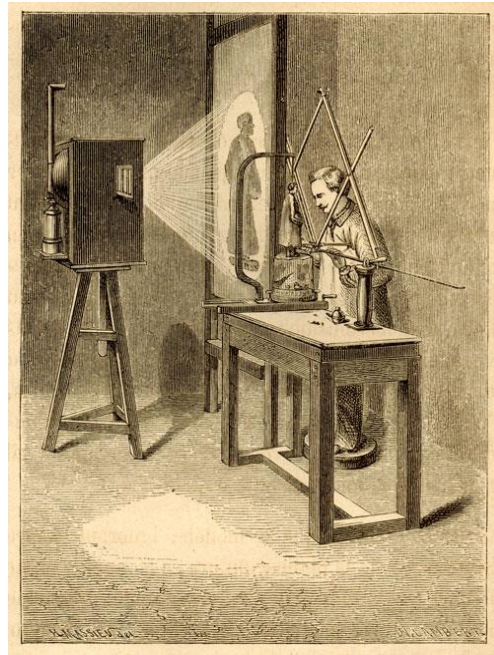


Рис. 11. Фотоскульптура по технологии François Willème

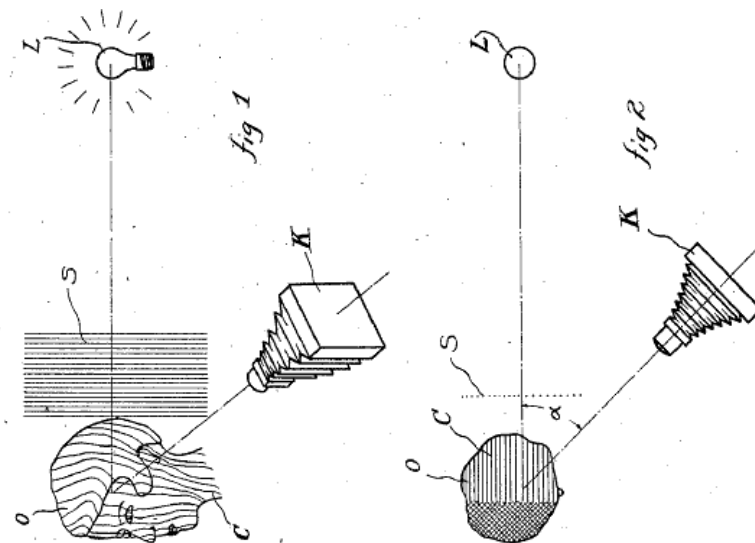


Рис. 12. Process for manufacturing a relief by the aid of photography.
Пат. США 2015457

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея *Otto Munz* (1956 г.), который предложил способ селективной (послойной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве плат-

формы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установленный в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень перемещали на определенную величину (т.е. с определенным шагом) и сверху наносили слой эмульсии, проецируя на него изображение, после чего наносили слой фиксирующего реагента. И так каждый шаг: 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 не засвеченные, в результате внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, оказывался заключенным образ трехмерного объекта (рис. 13). На патент (Пат. США № 2775758) Otto Munz, как на предшественника современной стереолитографии, ссылаются практически все авторы новых изобретений в области аддитивных технологий.

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

В 1981 г. *R.F. Housholder* (Пат. США № 4247508) предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала путем нанесения его на плоскую платформу. Далее производилось разравнивание до определенной величины с последующим спеканием слоя. В том же году *Hideo Kodama* опубликовал результаты работы с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. была опубликована работа *A.J. Herbert* по созданию трехмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал (рис. 14).

Процесс патентования новых технических решений по AF-технологиям приобрел лавинообразный характер. В 1986 г. *Charles W. Hull* предложил способ послойного синтеза посредством ультрафио-

летового 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 AF-технологий.

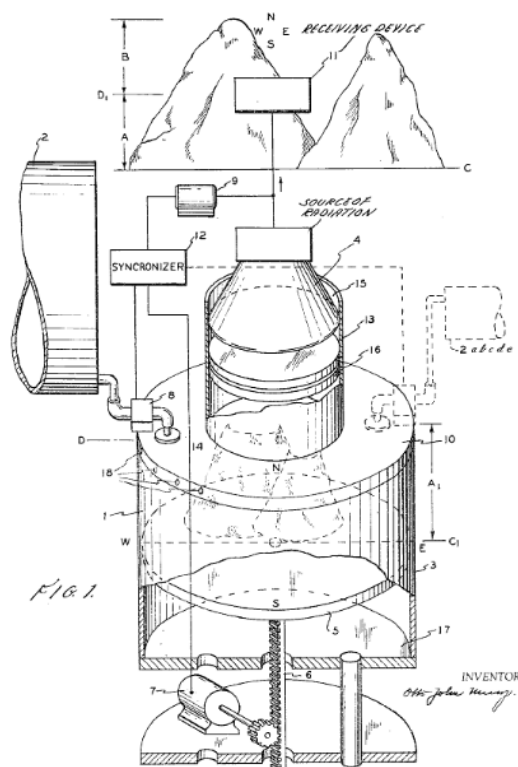


Рис. 13. Otto John Munz, Photo-Glyph recording,
Пат. США № 2775758, выдан 25.12.1956 г.



Рис. 14. Образцы моделей из фотополимеров, полученные Housholder,
Kodama и Herbert

ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА РЫНКА AF-ТЕХНОЛОГИЙ

Аддитивные технологии – наиболее динамично развивающаяся отрасль. По мнению *Troy Jensen*, аналитика инвестиционного банка *Piper Jaffray*, к 2020 г. ожидается увеличение рынка продаж 3D-принтеров и услуг до 5,0 млрд. долларов. В своем ежегодном докладе (*Wohlers Report*) в 2008 г. *Terry Wohlers* – основатель консалтинго-аналитической компании *Wohlers*, отмечал, что рынок продаж 3D-принтеров и услуг в 2015 г. достигнет отметки 3,7 млрд. долларов, а к 2019 г. увеличится до 6,5 млрд. *GIA (Global Industry Analysts, Inc.)* в аналитическом исследовании «3D Printing: A Global Strategic Business Report» прогнозирует около 2,99 млрд. долларов к концу 2018 г.

В 2012 г. *Terry Wohlers* писал: «рынок АМ-индустрии по-прежнему содержит огромный неиспользованный потенциал, особенно в части производства товаров широкого потребления и товаров с быстро меняющимся дизайном. Компании тратят 5-10% на отработку дизайна в прототипах, а остальные 90-95% расходуют на основное производство товара. Именно по этой причине так много компаний хотят захватить этот сегмент рынка. Реальные деньги не в дизайне и не в прототипах, реальные деньги в производстве. И поэтому изготовители АМ-систем и фирмы, оказывающие услуги, все 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» (*Terry Wohlers Report, 2012*).

Западные аналитики рассматривают степень внедрения *AF-технологий* в материальное производство как надежный индикатор реальной индустриальной мощи государства. Соединенные Штаты

Америки были и остаются крупнейшим потребителем *AF*-технологий. Около 40% от общего числа (за 24 года) проданных машин приходится на США. Для сравнения: доля Японии составляет 10,2% (второе место), Германии – 9,3% (третье), Китая – 8,6% (четвертое), Великобритании – 2,6% (седьмое). Россия разделяет с Турцией 13-е место (рис. 15).

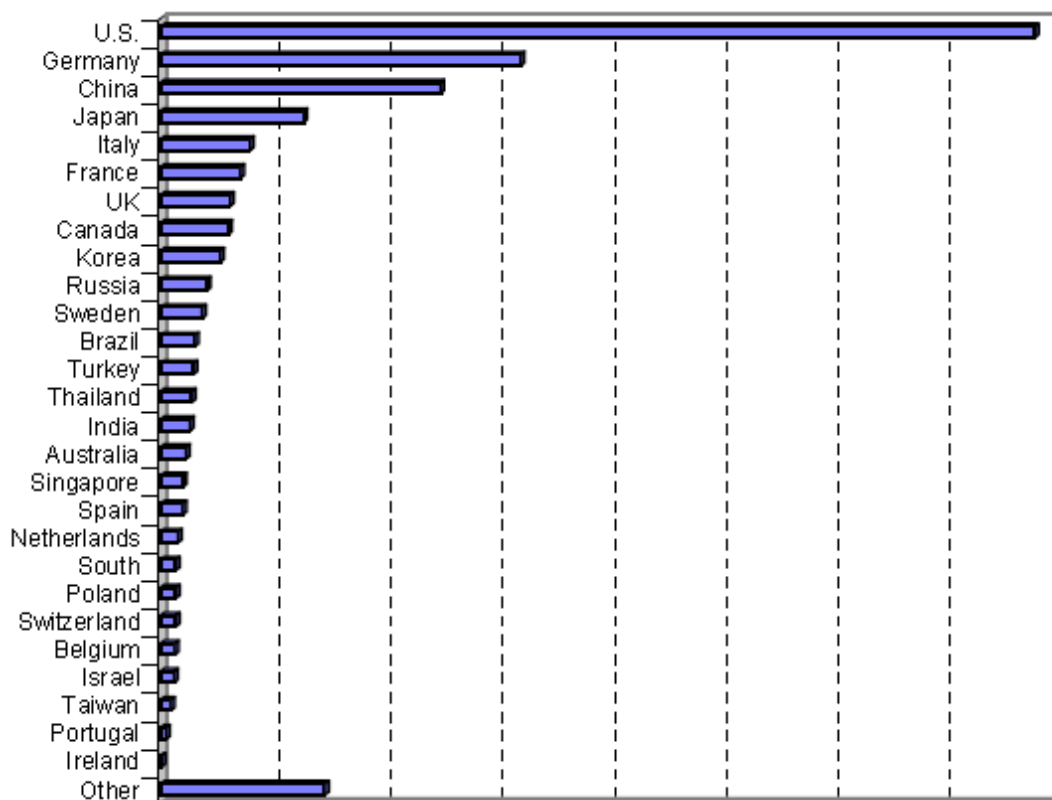


Рис. 15. Относительная доля *AF*-машин, проданных в различных странах в 2011 г. (Terry Wohlers Report, 2012)

В 2010 г. по инициативе компании *EWI* в США создан консорциум *AMC* (*Additive Manufacturing Consortium*), целью которого является повышение глобальной конкурентоспособности американской промышленности. В *AMC* 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*, прави-

тельственные учреждения, связанные с оборонным ведомством, NASA, NAVAIR и NIST.

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 пилотного *Института аддитивных технологий*, работающего при поддержке министерств обороны, энергетики и других федеральных ведомств.

Проникновению аддитивных технологий практически во все сферы творческой деятельности человека способствует разработка новых материалов, усовершенствование софтов и развитие сервисной сети. По состоянию на 2011 г. основными секторами использования AF-технологий на Западном рынке являлись (*Wohlers Report 2012*)

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

Продукты, созданные по AF-технологиям, используются (*Wohlers Report 2012*)

- как конечное изделие – 19,2%;
- в функциональном моделировании – 18,4%;
- в качестве мастер-моделей – 12,2%;
- для контрольныхборок – 12,1%;
- для визуализации – 10,1%;
- как литейные модели для литья металлов по выплавляемым моделям – 8,9%;

- как презентационные модели – 7,8%;
- в обучении и исследованиях – 7%;
- как компоненты инструментальной оснастки – 2,7%;
- другое – 1,6%.

Главной особенностью или основной ценностью аддитивных технологий западные эксперты называют «сокращение время выхода на рынок новой продукции».

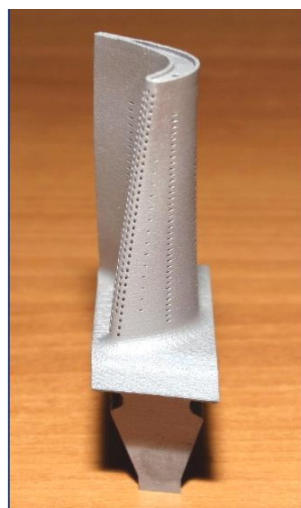
В России ведущие предприятия авиационной, автомобильной промышленности, энергетики, Росатома и др. имеют опыт практического использования *AF*-технологий, однако широкого распространения эти технологии не получили. Тогда как они, по мнению ведущих мировых экспертов, являются стратегически значимыми,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

Интерес к *AM*-технологиям, «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства товарной продукции возник именно в авиации (рис. 16), космической индустрии и энергетическом машиностроении. Причем мотивацией здесь являлась экономическая целесообразность. Аддитивные технологии в ряде случаев (при объективных расчетах реальных затрат) оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные технологии.

Развитию *AM*-технологий в авиационной промышленности, безусловно, способствовало существенное расширение номенклатуры металлопорошковых материалов: 2000 г. – не более 5-6 наименований, 2012 г. – десятки видов разнообразных композиций от обычных конструкционных сталей до жаропрочных сплавов и драгоценных металлов, и этот перечень стремительно растет.

Одним из перспективных направлений применения *AM*-технологий является изготовление технологической оснастки – при-

способлений и инструментов для серийного производства. В частности, изготовление вставок для термопласт-автоматов (ТПА) (рис. 17).



а



б

Рис. 16. Детали авиационных двигателей: *а* – лопатка турбины из никелевого сплава (предоставлено ОАО «НИАТ НТК»); *б* – детали системы топливоподачи, материал Ti64. Предоставлено ОАО «АБ Универсал»

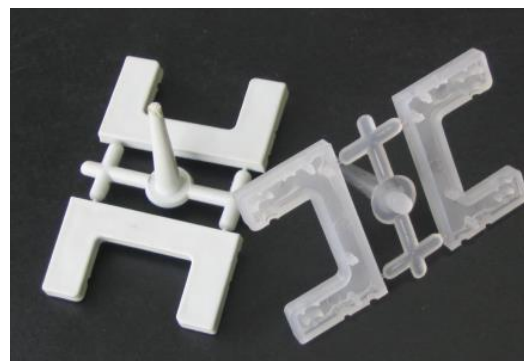
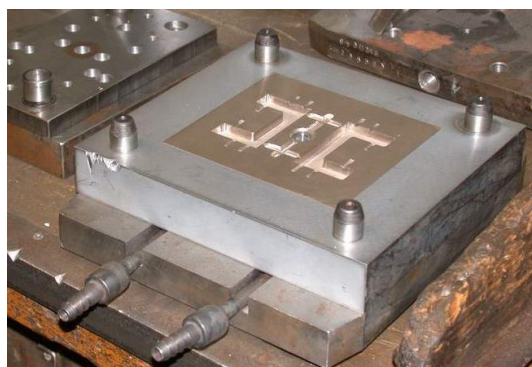


Рис. 17. Вставка для ТПА и отливки из ABS-пластика.
Предоставлено ФГУП «НАМИ»

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. С использованием АМ-технологий можно сделать матрицу или пресс-форму из легкого сплава с меньшим ресурсом.

Для традиционного литейного производства технологий АМ-технологии дают новые возможности. Например, пресс-форма может быть выращена вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки (рис. 18).

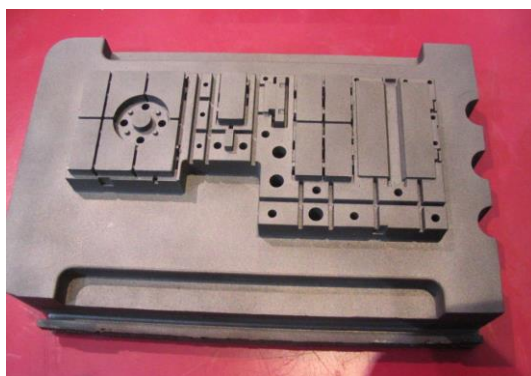


Рис. 18. Выращенная пресс-форма. Предоставлено 3D Systems

Для изготовления пресс-форм с медными охлаждающими сердечниками, а также с так называемой конформной системой охлаждения, конфигурация которой соответствует геометрии формуемой детали, используют АМ-машины *POM*, *Omtomes* и *Fabrisonic*. Применение литейных форм с равномерным или регулируемым охлаждением позволяет сократить время пребывания отливки в форме до 30%. В данном случае АМ-технологии – предложение новых возможностей для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

Внедрение аддитивных технологий наиболее эффективно в таких отраслях промышленности, как авиация, судостроение, энергетическое машиностроение, а также дентальная медицина и восстановительная хирургия. Например, российская компания *ОАО «НИИТ НТК»* провела работы по замене сварных топливных форсунок авиационного двигателя на «выращенные» из никелевого сплава *CL*

100NB (рис. 19). В результате значительно снижен процент брака, масса изделия уменьшена на 17%.



Рис. 19. Сварная и «выращенная» топливная форсунка.
Предоставлено ОАО «НИАТ НТК»

Имеется положительный опыт использования АМ-технологий для ремонта дорогостоящих изделий, например, рабочих органов турбин ГТД, валов (рис. 20) и т.д., а также для нанесения защитных и износостойких покрытий (технологии *DMD*, *LENS*) [36]. В работе [97] приводятся сведения о том, что использование стереолитографии позволило на стадии разработки узлов ГДТ уменьшить стоимость экспериментов, сократить общее время проектирования, повысить точность расчетных исследований и резко понизить общее количество запусков установки.

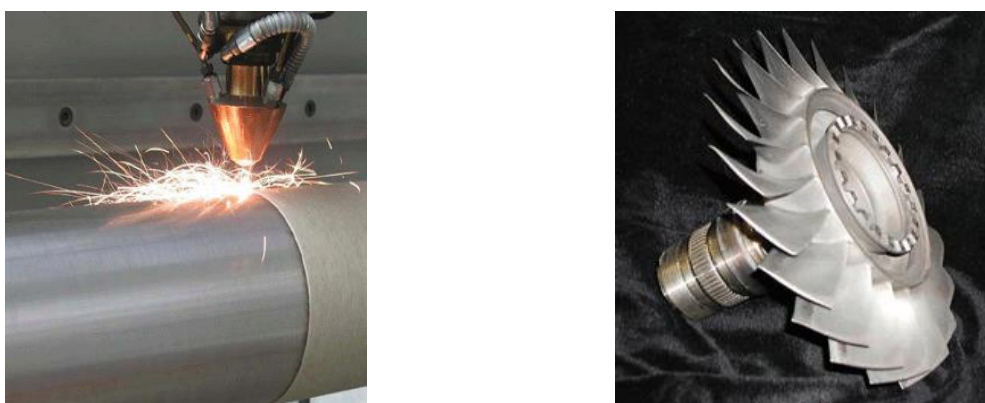


Рис. 20. Восстановление деталей авиационного двигателя.
Источники www.optomec.com, www.ipmd.net

В отраслях машиностроения, особенно в авиастроении, энергомашиностроении, автомобильной промышленности наиболее распространенными *AF-технологиями* являются:

- *SLA, om 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;
- *PolyJet* – нанесение слоя фотополимера через многосопловую головку и его отверждение посредством засветки ультрафиолетовой лампой;
- *FDM - Fused Deposition Modeling* – послойное наложение расплавляемых нитевидных полимеров;
- *InkJet* – отверждение слоя порошкового материала путем нанесения связующего состава через многосопловую головку (по типу струйного 3D-принтера).

Используют и другие технологии, но наиболее популярны технологии *SLA* (рис. 21) и *SLS* (и ее разновидности) как технологии, дающие наилучшую точность и имеющие разнообразные сферы применения.

Новейшие достижения в лазерной технике позволили создать новый класс *AF-машин*, конкурирующих с традиционными технологиями механообработки. Например, новейшая разработка компании *SLM Solution* – машина *SLM 280* с двумя лазерами: первый 400 Вт – для спекания внешней поверхности и тонкостенных элементов дета-

ли, второй 1000 Вт – для спекания основного массива детали (рис. 22). Скорость построения детали возросла до 20 мм/ч по высоте, при этом в результате изменения структуры металла значительно улучшилось и качество поверхности (рис. 23).



Рис. 21. SLA-модель и отливка рабочего колеса турбоагрегата.
Предоставлено ОАО «Тушинский машиностроительный завод»



Рис. 22. Машина *SLM 280* с двумя лазерами (*SLM Solution*)

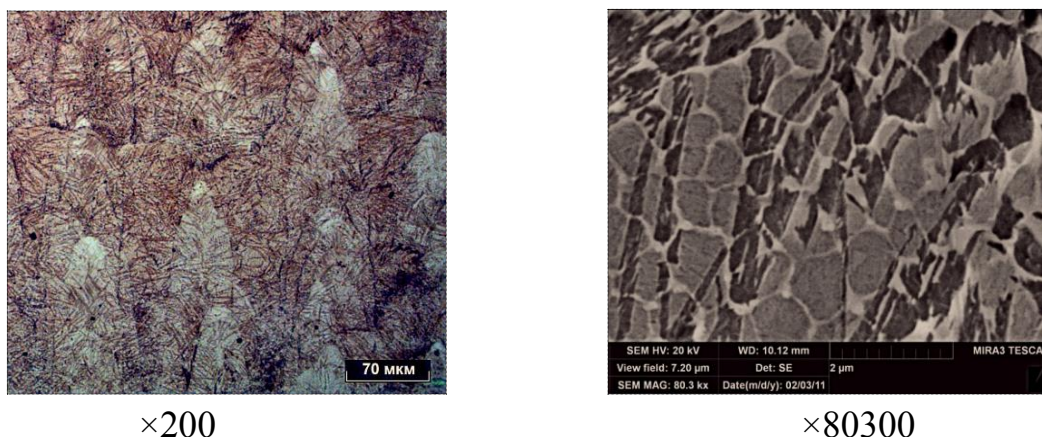


Рис. 23. Структура образца из стали H13, полученного по *SLM-технологии*.
Предоставлено СПбГПУ

В ряде случаев прочность «выращенных» деталей не уступает прочности литых, а после дополнительной термической обработки и *HIP (Hot Isostatic Pressure)* находится на уровне прочности деталей, полученных традиционными методами механообработки.

Машины типа *LENS 850* позволяют строить изделия из композиций, которые раньше невозможно было получить. При использовании *технологии LENS* (рис. 24) порошковый материал двух-трех видов подается непосредственно в зону расплава, формируемую лазером, в результате получают так называемые *градиентные материалы*, или *детали со слоистой структурой* (рис. 25).

Технология LENS «на сегодняшний день является наиболее совершенной (по достижимому уровню прочностных характеристик создаваемых объектов) реализацией метода послойного воспроизведения» [84, с. 6]. Данный метод позволяет применять в качестве модельных материалов практически любые металлы и сплавы, которые могут быть расплавлены лазерным лучом без испарения. Создаваемые детали имеют ультрамелкозернистую структуру и в ряде случаев по своим механическим свойствам значительно превосходят изделия, получаемые из аналогичных сплавов традиционными методами.

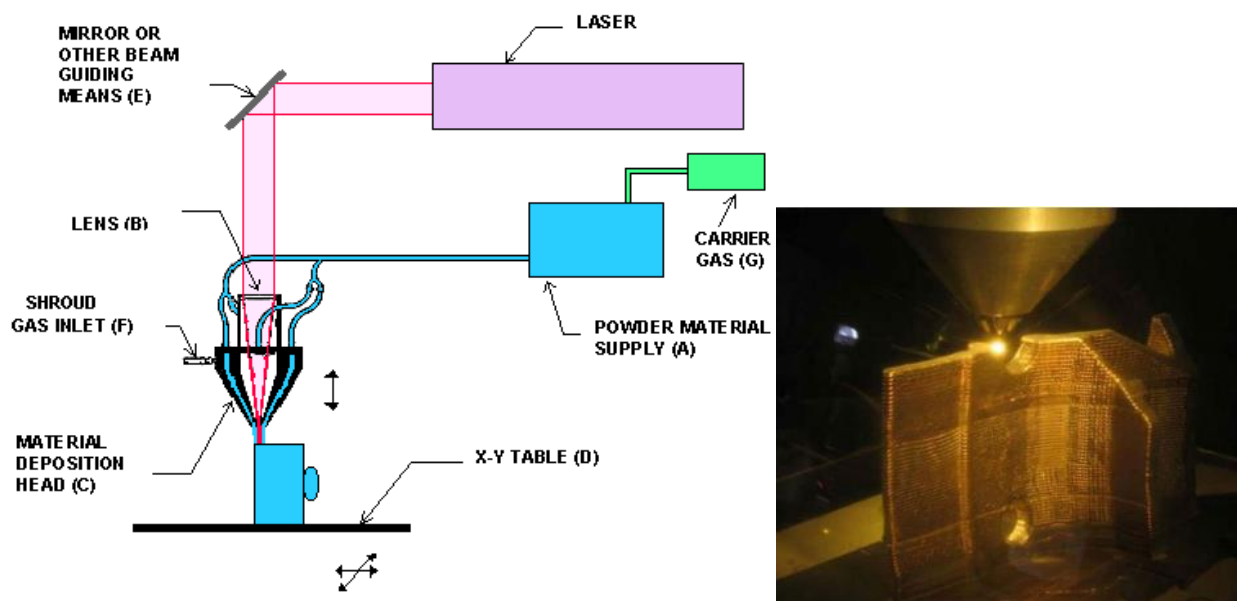


Рис. 24. Технология *LENS*



Рис. 25. Выпускные клапаны из титанового сплава (технология *LENS*)

Преимущества применения аддитивных технологий при производстве систем теплоотвода микроэлектронных устройств, разработке новых изделий вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования, создании гибридных моделей автомобилей и автомобилей нового поколения, выпуске небольших партий пластмассовых деталей сложной геометрии описаны в работах [44, 72, 78, 128-130]. Авторы работ [50, 74] отмечают перспективность применения этих технологий в декоративно-прикладном искусстве и архитектуре, в работах

[65-68] приводятся результаты экспериментов по изготовлению биоактивных и биосовместимых имплантатов.

Не вызывает сомнения тот факт, что с каждым годом *AF-технологии* будут открывать новые возможности по созданию уникальных изделий и новые области применения, об этом говорят и выступления на 6-м Международном инструментальном саммите, посвященном актуальной теме – «Современные технологии и оборудование быстрого прототипирования и производства» [63].

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

Компания *Envisiontec* заключила соглашение с *ZCorporation* о совместном продвижении принтеров *Ultra* на мировых рынках. В апреле 2012 г. было объявлено о слиянии двух крупных компаний – *Stratasys* (США) и *Objet* (Израиль). *Hewlett-Packard* имеет реселлерское соглашение с *Stratasys*. Компания 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 трех 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. долларов.

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. Например, в 2011 г. стартап-компания *Asiga* выпустила на рынок новый принтер *Pico* (рис. 26) с оригинальной системой засветки фотополимера с помощью *DLP (цифрового процессора)* и светодиодов, имеющей ресурс до 50 тыс. часов. Принтер предназначен для изготовления изделий с высокой детализацией (денталь-

ные, ювелирные модели, слуховые аппараты и т.д.). Зона построения – 40x30x75 мм, шаг построения – от 1 до 50 мкм.



Рис. 26. Принтер Pico (Asiga)

Формальное число производителей *AF-машин* изменяется от года к году, но примерно находится на отметке 27-32. Основными производителями профессиональных машин – авторитетными компаниями с длительной историей работы на рынке – являются следующие:

- *3D Systems*, США (SLA, SLS и др. типы машин);
- *EOS*, Германия (SLS и DMF);
- *SLM Solution*, Германия (SLM);
- *Objet Geometries*, Израиль (PoliJet)
- *Envisiontec*, США – Германия (DLP);
- *ExOne*, США (InkJet);
- *Stratasys*, США (FDM);
- *Voxeljet*, Германия (Inkjet).

Характерной чертой современного рынка *AF-технологий* является усиливающийся из года в год акцент на их промышленном применении, *3D-принтеры* все чаще используются в основной технологической цепи производства. В ряде случаев оказывается экономически

более рациональным изготовить партию деталей (от 20 до 2000 шт.) непосредственно на 3D-принтере по сравнению с традиционным изготовлением с использованием дорогостоящей литейной оснастки. 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 AF-технологий.

В последние годы компания *Boeing* значительно увеличила номенклатуру деталей, изготавливаемых по AF-технологиям. Сейчас таким образом изготавливается более 22 тысяч деталей 300 наименований для 10 типов военных и коммерческих самолетов, включая *Dreamliner*. По сообщениям представителей компании, Boeing планирует производить новый беспилотный самолет практически полностью по AF-технологиям (рис. 27).



Рис. 27. Беспилотный летательный аппарат, построенный по AF-технологиям

Компания *Morris Technologies Rapid* и ее дочернее предприятие *Quality Manufacturing* специализируются на выращивании металлических деталей. Потребителями AF-технологий уже сейчас стали тюнинговые автомобильные компании и фирмы, связанные с производством болидов *F1*. Существенный вклад в дело индустриализации AF-

технологии, в частности в развитие литейного производства, вносят машины для послойного выращивания литейных форм из песка (машины типа *S-Print*, *S-Max* (рис. 28), *EOSINT S*).



Рис. 28. Машина *S-Max* для выращивания песчаных форм

Эти машины начинают постепенно внедряться в мелкосерийное производство, характерное, например, для авиастроения и энергетического машиностроения. Несмотря на высокую первоначальную стоимость – 0,8-1,5 млн. евро – внедрение этих машин позволяет не только ускорить процесс производства и улучшить качество продукции, но и оказывается конкурентоспособным с экономической точки зрения по сравнению с традиционными технологиями. Помимо этого эти машины дают возможность

- минимизировать влияние «человеческого фактора»;
- сократить численность персонала, решить проблему нехватки квалифицированного персонала – модельщиков, формовщиков;
- устранить необходимость содержания, хранения и ремонта модельной оснастки, особенно для относительно габаритных изделий;
- улучшить условия труда.

При этом также происходит качественное изменение структуры кадрового состава предприятия – снижается доля рабочих профессий

(в литейном производстве она всегда была традиционно высокой), уменьшается доля физического труда. При этом увеличивается доля интеллектуального инженерного труда, связанного с конструированием и 3D-моделированием литейной оснастки, расчетом и моделированием литейных процессов и т.д., возрастают требования к квалификации технологов.

Упрощенно процесс производства выглядит следующим образом (рис. 29, 30): разработанная конструктором *CAD*-модель поступает к технологу-литейщику; технолог разрабатывает *CAD*-модели элементов песчаной формы (внешние формообразующие, стержни, литники и пр.). Затем эти модели передают оператору АФ-машины, который производит построение фрагментов песчаной формы. Фрагменты собирают, устанавливают в опоку и отправляют на литейный плац, где и производят заливку металла.

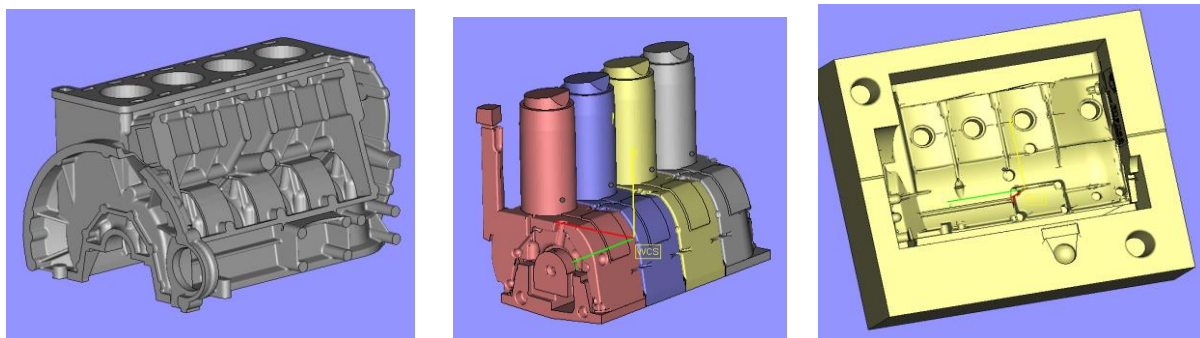


Рис. 29. CAD-модели блока цилиндров и фрагментов песчаной формы

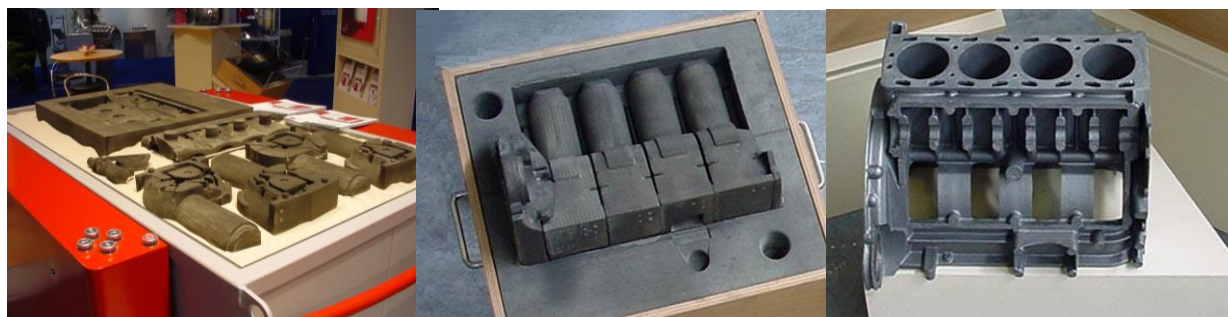


Рис. 30. Фрагменты формы, форма в сборе и отливка блока цилиндров двигателя. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

ГЛАВА 4. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Машины, предназначенные для выращивания изделий из металла, как и технологии, можно разделить на две основные группы – *Bed Deposition* и *Direct Deposition*.

4.1. Группа *Bed Deposition*

Наиболее многочисленной группой по производителям и разнообразной по моделям на рынке представлены *SLS*-машины. Большая часть компаний-производителей в качестве *источника энергии для соединения частиц металлопорошковых композиций* использует в своих машинах *лазер*. Это такие компании, как:

- *Concept Laser* (Германия);
- *EOS* (Германия);
- *Phenix Systems* (Франция);
- *SLM Solutions* (Германия);
- *Realizes* (Германия);
- *Renishaw* (Великобритания);
- *Arcam* (Швеция) (используется *EBM-технология*);
- *3D Systems* (США).

Почти все компании, использующие лазер, по-разному называют свои технологии, однако по технической сути все они являются *технологиями селективного лазерного сплавления* – *SLM-технологиями*, именно это название негласно закреплено за компанией *SLM Solutions*.

При решении вопроса о приобретении *АМ*-машины и рациональном обустройстве места ее установки необходимо помнить, что *АМ*-машины – это целый комплекс, включающий в себя устройства для просеивания и смешения порошков, загрузки, разгрузки и очист-

ки 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 возникновению термических деформаций 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», покоребиться и даже повредить элементы дозирующей системы машины. Программное обеспечение АМ-машины предлагает конфигурацию поддержек, но поскольку часто приходится редактировать предлагаемое машиной решение, то многое зависит от опыта и мастерства оператора. Удаление поддержек – это также достаточно ответственный процесс. Для снятия остаточных напряжений необходимо соответствующее термическое оборудование, для аккуратного отделения построенной детали от платформы и последующего удаления поддерживающих структур нужен подходящий инструмент, также 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 производится в среде защитного газа (N_2 , Ar).

Модельный ряд содержит пять машин. Самая маленькая – *M-lab*, выпущенная в 2011 г., разработана специально для исследовательских целей, медицинского и ювелирного рынков, имеет диаметр пятна лазера 25 мкм, что обеспечивает высокое качество поверхности

(рис. 31). Самая большая – *X line 1000R* с размерами зоны построения 630x400x500 мм разработана совместно с Фраунхоферским институтом лазерных технологий (*FILT*) при участии *Daimler AG* и выходит 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. машина для серийного производства.



Рис. 31. Машина *M-lab* и презентация машины *X line 1000R* на выставке Euromold 2012

Одна из наиболее известных и успешных на рынке АМ-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 АМ-машин от *EOS*.

Свою технологию компания называет *DMLS -Direct Metal Laser Sintering*, однако металлографические исследования, представленные

в работах [31, 52], показали, что в процессе реализации технологии происходит сплавление металла (*melting*), а не спекание (*sintering*) (рис. 32).

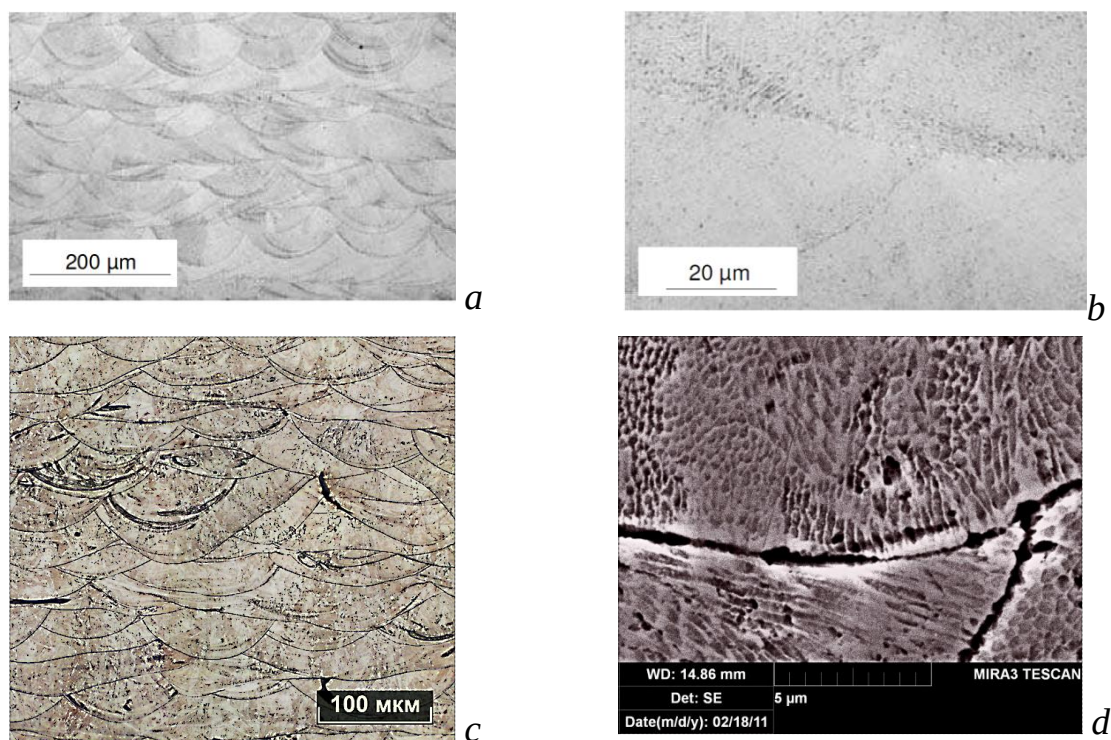


Рис. 32 Структура образца из мартенситно-твердеющей стали 1.2709, полученного по технологии DMLS: *a, b* – по данным S.L. Campanelli [4]; *c, d* – по данным профессора Колбасникова Н.Г. [52].

Предоставлено СПбГПУ

В настоящее время EOS выпускает машину EOSINT 280, улучшенную версию модели EOSINT 270 (рис. 33а). Машина имеет встроенный генератор азота, используемый при построении деталей из металлопорошковых композиций на основе железа, для титановых, никелевых и алюминиевых композиций применяют аргон. Машина выпускается в двух модификациях – с лазером 200 и 400 Вт для работы с увеличенным шагом построения. С 2013 г. планируется выпуск машины PRECIOUS M 080 (рис. 33б), имеющей возможность работы с драгоценными металлами.

EOS интенсивно ведет работы по созданию *MLS*-машин (*Micro Laser Sintering*) с высоким разрешением, в частности, для изготовления медицинских инструментов (для эндоскопических операций), микроэлектроники и др. Опытный образец машины с размерами рабочей зоны Ø50 и высотой 30 мм позволяет строить детали с шагом 1-5 мкм и шероховатостью *Ra* около 2 мкм.



Рис. 33. Машины компании *EOS*: *а* – *EOSINT 280*; *б* – *PRECIOUS M 080*

Компания *Phenix Systems*. Отличительной чертой машин *Phenix Systems* (рис. 34) является оригинальный способ формирования слоя строительного материала, позволяющий обеспечить шаг построения 20 мкм. В качестве модельных материалов используются металлопорошки со средним размером частиц $d_{50} = 6-9$ мкм. На этих машинах 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. Около 50 машин *PXS Dental* установлено в различных лабораториях для изготовления дентальных изделий из сплавов *Co-Cr*. Машины *PXS* также могут быть эффективно использованы для проведения научно-исследовательских работ с целью исследований особенностей рабочих процессов лазерного синтеза и отработки *SLM*-технологий для различных порошковых композиций.

Один из мировых лидеров в области технологий лазерного синтеза – компания **SLM Solution** (Германия). В результате сотрудничества *FILT* появилась наиболее продвинутая на сегодняшний день машина *SLM 280* (рис. 35а). В качестве опции в машину может быть интегрирован второй лазер 1000 Вт. Внешний контур детали и тонкие стенки «прорабатывает» первый лазер 400 Вт, а основное тело детали – второй мощный лазер.



Рис. 34. Машины *Phenix Systems* (Франция): а – PXL; б – PXM; с – PXS



Рис. 35. Машины *SLM Solutions*: а – SLM 280; б – SLM 500

При построении сложных деталей регулирование мощности лазера является необходимым, но весьма сложным в реализации процессом. С одной стороны, чем больше мощность лазера, тем быстрее

происходит расплавление металла и тем быстрее строится деталь, но, с другой стороны, в точку расплава подводится большое количество энергии, наблюдается взрывной характер расплавления частиц металла, металл кипит, происходит его разбрызгивание и часть строительного материала выбрасывается из пятна расплава. Это может привести к повышенной пористости и 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 лазер меньшей мощности, но при этом уменьшается производительность.

Удачным компромиссом является сочетание в машине *SLM 280* двух лазеров разной мощности. На этой машине могут быть построены детали с толщиной отдельных фрагментов до 0,3 мм (рис. 36), что имеет существенные преимущества: значительно (до 5 раз) увеличивается скорость построения детали, улучшается структура материала и чистота внешней поверхности ($Ra - 5-10$).

С 2013 г. планируется выпуск новой машины *SLS 500* с размерами зоны построения – 500x280x335 мм и базовой двухлазерной системой (рис. 35б).



Рис. 36. Деталь электротехнического устройства, построенная на машине *SLM 280*. Толщина рёбер - 0,35 мм. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Компания **Realiser** (Германия) с 2010 г. самостоятельно вышла на рынок, раньше эта компания работала как фирма-партнер с *SLM Solutions*, поэтому унаследовала много общего от машин своего бывшего партнера. Особенностью машин *Realiser* является оригинальная оптическая система, уменьшающая диаметр пятна лазера и позволяющая строить детали с повышенной точностью, но на уменьшенной зоне построения.

Из линейки машин *Realiser* 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 (рис. 37а). В качестве опции в машину может быть интегрирован стереомикроскоп. Машина может быть также использована в качестве агрегата для лазерной сварки.



Рис. 37. Машины Realiser: а – SLM 50, б – SLM 100

Машина *SLM 100* предназначена для изготовления малых серий деталей относительно небольшого размера с высокой точностью (рис. 37б). Размеры зоны построения составляют 125x125x100 мм, оригинальная оптическая система фокусирует пятно лазерного луча

до размера 20 мкм, что позволяет строить фрагменты детали с толщиной стенки до 60 мкм.

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 секунды (рис. 38).

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



Рис. 38. Машина *SLM 250*

В настоящее время компанией *Renishaw* производятся две машины – *AM 125* и *AM 250*, конструкции которых во многом аналогичны машинам *SLM Solutions*. Достоинство этих машин – высокая степень герметизации рабочей камеры, что позволяет производить глу-

боковую 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 (EBM)* описана в работе [130] следующим образом: электроны испускаются нитью накала, разогретой до 2500°C, и далее, проходя через анод, разгоняются до $\frac{1}{2}$ 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 регулируется количеством электронов. Для получения заготовок используются порошки чистые по химическому составу, без добавок и связующих.

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 *EBM*-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. В этих случаях технология *Arcam* имеет преимущество, поскольку наиболее важным является плотность и однородность материала, а не чистота поверхности построенной детали. Ряд независимых авторов отмечает, что при сравнительно низкой чистоте поверхности плотность материала деталей от *Arcam* выше и структура материала лучше, чем при использовании лазерных технологий. Высокая производительность *EBM*-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 ме-

дицинского назначения (титановых протезов, имплантов и др.). Компания *Arcam* продала более 100 систем в десять стран мира (рис. 39).



Рис. 39. Машина *Arcam A1*

Особенностью технологии *Arcam* является то, что поскольку газовая среда создает слишком высокое сопротивление электронному лучу, процесс построения детали происходит в рабочей камере, предварительно откакумированной (до $<1 \times 10^{-4}$ мбар). Это позволяет получать качественные изделия из титана и титановых сплавов, при этом обеспечивается приемлемая точность построения – $\pm 0,2$ мм на длине 100 мм.

Практически все перечисленные машины либо в базовой версии, либо опционально могут работать с наиболее востребованными на индустриальном рынке металлопорошковыми композициями: инструментальные стали (типа *H13*), мартенситностареющие стали (типа *18%NiMaraging 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.).

Компания 3D Systems. Машинами *3D Systems* и *ExOne* [1] представлен еще один вид технологий послойного синтеза, особенностью которого является то, что сначала в АМ-машине выращивают так называемую «грин-модель». Процесс выращивания состоит в послой-

ном 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 (рис. 40).

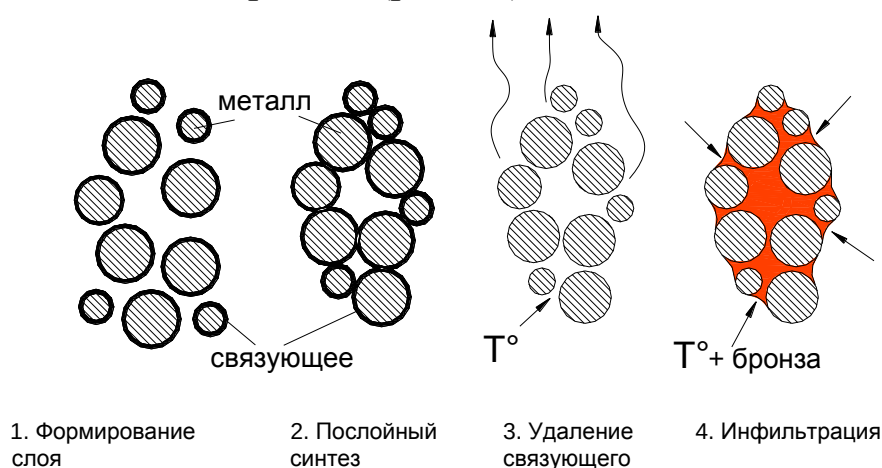


Рис. 40. Схема процесса получения изделий из композиций стали и бронзы

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 (рис. 41), тщательно очищают от свободного порошка и помещают в печь с защитной средой (обычно N_2), где при температуре $1000-1100^{\circ}C$ производят пропитку грин-модели расплавленной бронзой.

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 дета-

лей достаточно хорошая – Ra 5-10, минимальная толщина стенки – около 1 мм. Однако прочностные свойства и твердость невысокие: предел прочности при растяжении – 610 МПа, твердость – $HRC= 10-20$.



Рис. 41. Грин-модель вставки ТПА, технология *3D Systems*.
Предоставлено ФГУП «НАМИ»

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 (рис. 42). Эти машины строят грин-модели со скоростью до 6 мм/ч по высоте, при размерах рабочей зоны 780x400 мм это равнозначно производительности 1780 см³ в час, что на порядок выше, чем при использовании лазерных технологий. В машине *M-Lab* можно также выращивать детали из порошкового силикатного стекла с последующим спеканием.

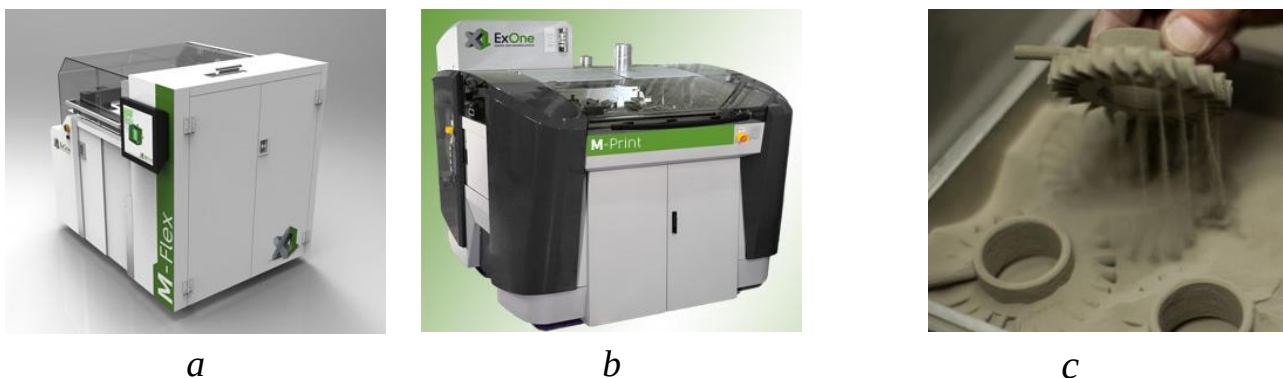


Рис. 42. Машины *ExOne*: *a* – M-Flex; *b* – M-Print; *c* – извлечение грин-модели из машины [5]

К перспективным *Ink-Jet*-технологиям относят технологию *fcubic*, приобретенную компанией *Höganäs AB* (Швеция). Суть ее 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, не обработанная часть материала остается не спеченной. Это принципиальное отличие от технологий *ExOne* и *3D Systems*: грин-модель не инфильтруют бронзой или иным сплавом, а спекают, 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.

Существует и другая технология, родственная *fcubic*, – *SIS*-технология (*Selective Inhibition Sintering* [23]), в соответствии с которой на неотверждаемую часть материала наносят ингибитор – раствор соли металла. После построения (как и в технологии *fcubic*) весь бун-

кер 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 не ясными.

Компания *Matsuura Machinery* предлагает гибридную технологию – сочетание *SLM-технологии* и *механообработки* [2]. В рабочей камере машины *LUMEX Avance-25* (рис. 43) 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) – $250 \times 250 \times 100 \text{ мм}$.



Рис. 43. Машина *LUMEX Avance-25*

Пример изготовления прессформы для литья корпуса фотокамеры представлен на рис. 44. Время послойного синтеза для деталей *A* и *B* составляет, соответственно, 68 час 21 мин и 36 час; 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 других стран Юго-Восточной Азии, ставших мировыми центрами производства пластмассовых из-

делий. Базовая цена машины – около € 800 тыс. Разнообразие моделей машин позволяет сделать оптимальный выбор оборудования под конкретные задачи производства.



Рис. 44. Пресс-форма для литья корпуса цифровой фотокамеры [7]

Общей проблемой *SLM*-технологий является проблема обеспечения надлежащей микроструктуры синтезированного материала, устранения пористости, в той или иной мере характерной для всех видов *АМ*-технологий. В ряде исследований, в частности [27, 31, 52], показано, что пористость зависит как от материала, так и от параметров режима сплавления. Например, для алюминиевых сплавов (рис. 45) 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.



Рис. 45. Микроструктура сплава $AlSi9Mg$ [52]. Предоставлено СПбГПУ

Компании-производители АМ-машин предлагают определенный набор строительных материалов и инструкцию для настройки параметров машины под каждый из материалов. Составлению списка материалов предшествует работа по определению оптимальных режимов построения, определяются оптимальная взаимосвязь таких параметров, как мощность лазера, фракционный и химический состав порошка, шаг «штриховки» лазера (или шаг сканирования) в плоскости X-Y, шаг построения, скорость сканирования лазера (скорость лазерного луча), а также температура плавления материала. Чем выше скорость сканирования, тем выше производительность машины и меньше шероховатость поверхности (рис. 46а) [27], при этом выше вероятность образования пористости (рис. 46б). Наилучшая плотность структуры обеспечивается при скорости сканирования 120-130 мм/с (рис. 47). Большое значение имеет согласование шага сканирования, свойств материала и других параметров с целью минимизации пористости и оксидных включений в структуре строящейся детали.

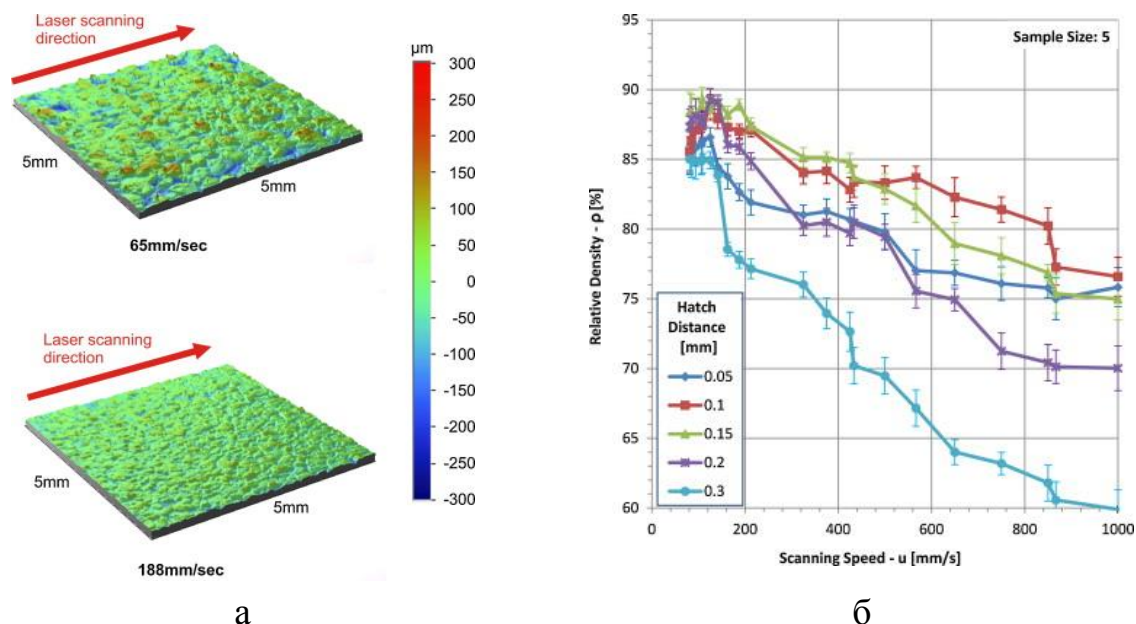


Рис. 46 Влияние скорости сканирования на шероховатость поверхности (а) и относительную плотность (б) образца, SLM-технология [28] Al-сплав 6061, мощность лазера - 50 Вт, шаг сканирования - 0,15 мм

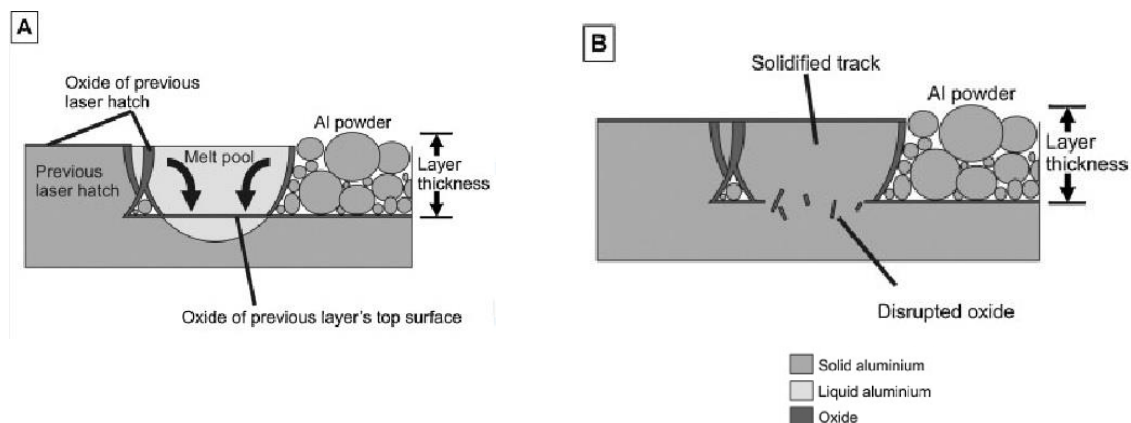


Рис. 47. Механизм образования пористости и оксидных включений [27]

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 (рис. 48), однако при этом почти вдвое увеличивается время построения детали [42, 43].

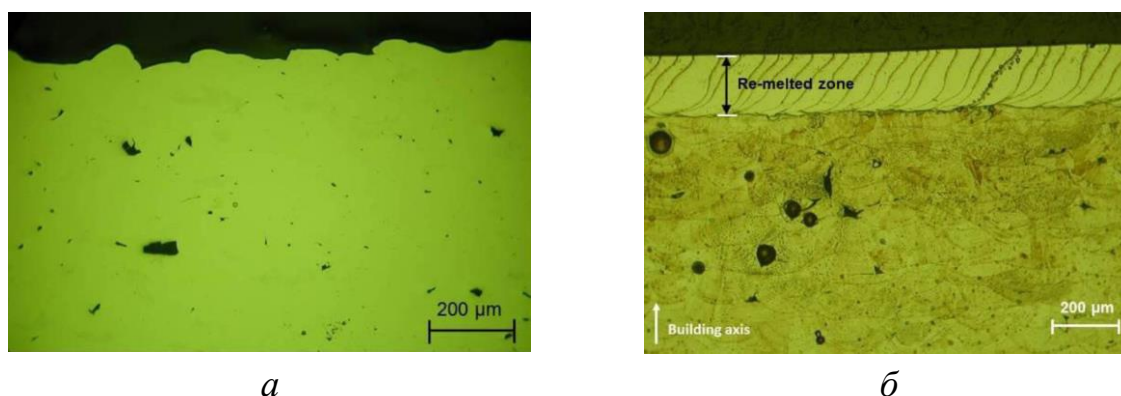


Рис. 48. Микроструктура образца из нержавеющей стали 316L [42]
а) без вторичного сплавления; б) с вторичным сплавлением

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*. Основные параметры машин для послой-

ного синтеза из металлопорошковых композиций представлены в табл. 1 (Приложение).

4.2. Группа *Direct Deposition*

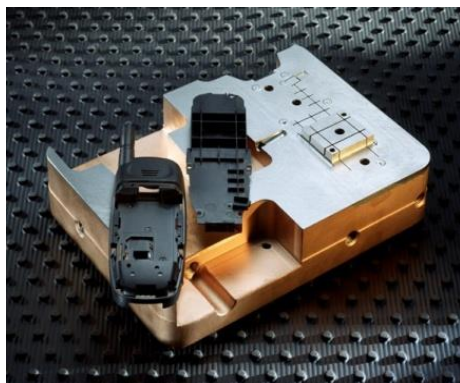
К группе *Direct Deposition* относятся машины компаний *POM Group* (США), *Optomec* (США), *Irepa Laser* (Франция), *InssTek* (Южная Корея), *Sciaky* (США).

Компания *POM* (*Precision Optical Manufacturing*), в декабре 2012 г. приобретенная американской компанией *DM3D*, является разработчиком *DMD*-технологии. Эта компания – держатель 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 (величины подачи материала, скорости перемещения головки и мощности лазера), обеспечивающих стабильность и качество рабочего процесса.

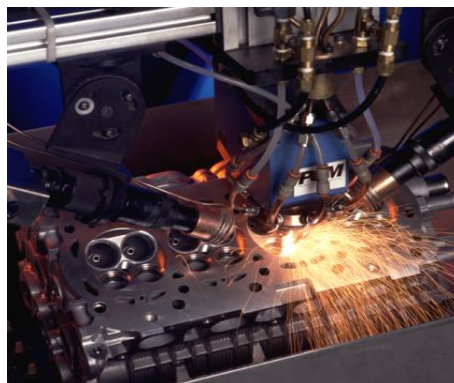
Технология *DMD* позволяет производить параллельную или последовательную подачу двух видов материала с различными физико-химическими свойствами. Таким образом можно создавать биметаллические компоненты (формы для литья пластмасс: тело формы – из меди, рабочая часть – из инструментальной стали, рис. 49а) и наносить специальные покрытия на гильзы цилиндров, поршневые кольца, кулачковые валы, седла клапанов (рис. 49б).

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.



а



б

Рис. 49. Технология *DMD*: *а* – комбинированная вставка ТПА; *б* – нанесение износостойкого покрытия на седла клапанов ДВС.

Источник www.dm3dtech.com

Имеется опыт создания так называемых *градиентных материалов* путем послойного нанесения и сплавления двух или нескольких материалов с различными физико-химическими свойствами. Новые модели *44R*, *66R* и *IC106* (рис. 50) используют шестиосевые роботы. Машины *DMD 105D* и *505D* [8] 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.

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 градиент-

ных структур. В качестве материалов используют инструментальные сплавы, стеллиты, инконели и титановые сплавы. Стоимость машин достаточно высокая – более \$500 тыс., так же как и стоимость работ.



Рис. 50. Машина *DMD IC106*

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 750* и *LENS MR-7*, предназначенные в основном для научно-исследовательских целей, и *LENS 850* – для промышленного использования. Машины могут быть оборудованы двумя или более бункерами для подачи разных материалов в зону расплава. Процесс построения деталей производится в среде аргона. Преимуществом машин *Optomec* является быстрая смена материалов – практически за минуты. Высокая скорость охлаждения, более 1000°C, позволяет регулировать и управлять микроструктурой строящейся детали.

Модели *LENS 750*, *LENS MR-7* (рис. 51а) в базовой версии имеют 3 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 (рис. 51б). В машинах используются порошки с фракционным составом 36-150 мкм.

Коммерческую реализацию технологии *EasyCLAD* (*CLAD – Construction Laser Additive Directe*), разработанной компанией **Irepa Laser** (Франция), осуществляет французская компания **BeAM** (*Be Additive Manufacturing*). **BeAM** предлагает четыре типа машин с возможностью выбора размеров рабочей зоны, мощности лазера и системы подвода порошкового материала в зону расплава – одно- или двух-сопловую. 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.



a



б

Рис. 51. Машины *Optomec*: *a* – *LENS MR-7*; *б* – *LENS 850-R*

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 (рис. 52). Базовая цена машины – около € 750 тыс.



Рис. 52. Машина *MAGIC LF6000*

Компания *InssTek* (Южная Корея) разработала машину *MX-3* (рис. 53), имеющую CO₂-лазер от *Trumpf*, пять осей управления, и оснащенную многоканальной системой подачи материала.



Рис. 53. Машина *MX-3*

Оригинальную аддитивную технологию применяет **компания *Sciaky*** (США), специализирующаяся на разработке технологий и оборудования для сварки. В АМ-машине компании *Sciaky* (рис. 54) построение детали производится методом послойного наваривания

материала в расплаве, сформированном электронным лучом (рис. 55). Данная технология называется *EBDM* – *Electron beam Direct Manufacturing* («прямое производство посредством электронного пучка»).

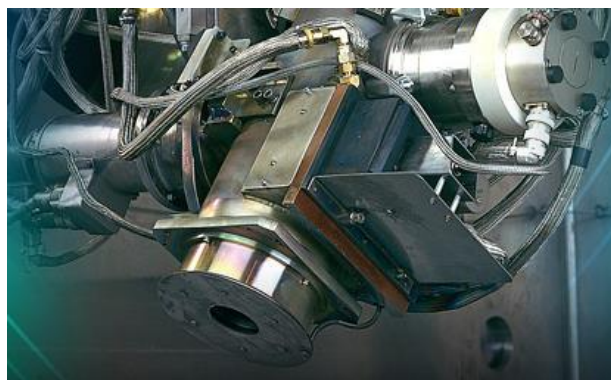
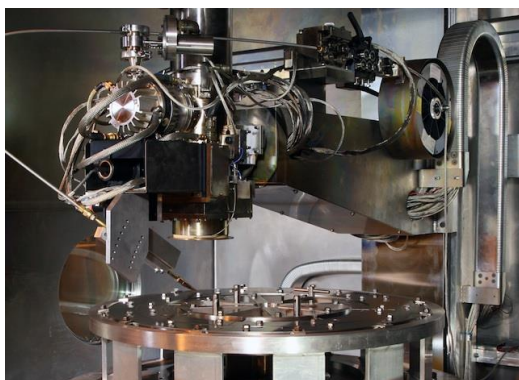


Рис. 54. *EBDM* –машина компании Sciaky. Источник www.sciaky.com

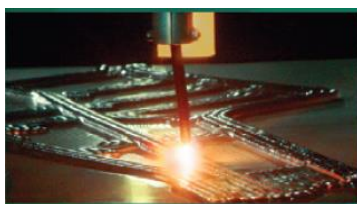
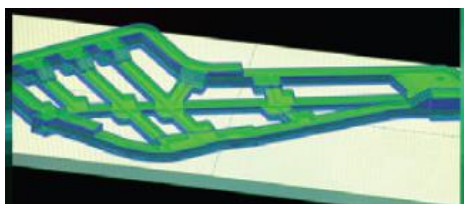


Рис. 55. Изготовление детали по технологии Sciaky

Высокая производительность (7-18 кг/ч) технологии *EBDM* позволяет выращивать детали, размеры которых исчисляются метрами, что невозможно или чрезмерно дорого обеспечить при использовании других *АМ*-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.

Модельным материалом в данной технологии 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** [30]. Технология относится к группе *Direct Deposition* и аналогична технологии *Sciaky*, но в качестве источника энергии для плавления используется плазматрон, ионизирующий инертный газ и генерирующий поток плазмы (рис. 56). Температура плазмы достигает 5000-30000 К. В качестве фидстока используется металлический пруток, материалы – алюминиевые и титановые сплавы, инконели, конструкционные стали и др. Опытная машина имеет размеры зоны построения 1200x1200x1800 мм. К достоинствам этой технологии относят относительно невысокую стоимость по сравнению с лазерными системами.

Основной рабочий орган машин – это лазерная головка, представляющая собой чрезвычайно сложный агрегат с системами фокусировки лазера, охлаждения и подачи материала, а также элементы системы управления (датчика, видеокамеры и т.д.). 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.

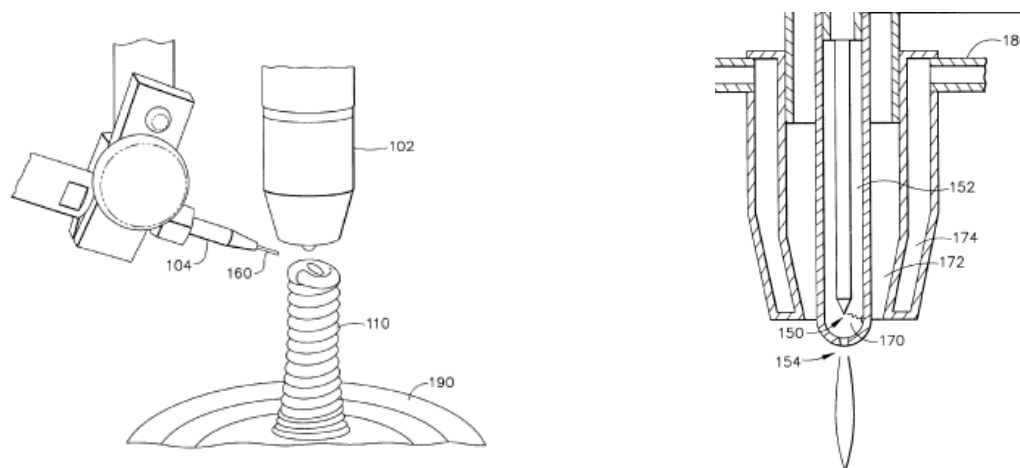
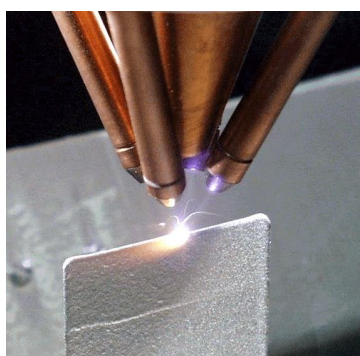


Рис. 56. Фрагмент из описания пат. США 6,680,456 В2 [30]: 102 – плазматрон; 104 – механизм подачи материала; 110 – деталь; 150 – генератор плазмы; 152 – аргон; 154 – сопло; 160 – фидсток в виде прутка; 170 – поток плазмы; 172 – гелий; 174 – водяная рубашка охлаждения

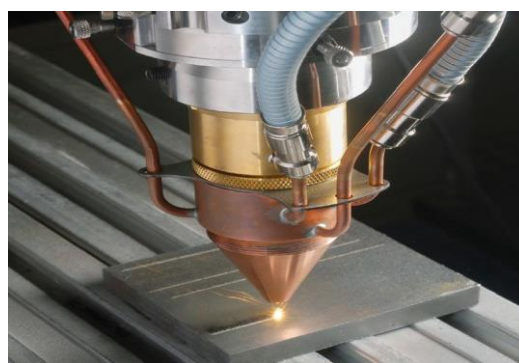
Компании используют различные системы подачи материала: одноканальные, многоканальные (например, *Optomec*), коаксиальные (например, *POM*, *Fraunhofer ILT*) (рис. 57, 58). Совершенствование систем подачи материалов ведется высокими темпами. В опытных образцах с мощными лазерами (4-10 кВт) достигнута производительность (*темп осаждения материала*) – 9-15 кг/ч [8].

АМ-процесс из группы *Sheet lamination* (*соединение листовых материалов*) 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 накатывают роликом, к которому прикладывают нормальную силу. 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 изделия из несвариваемых материалов, например, композицию сталь-титан-медь.



а

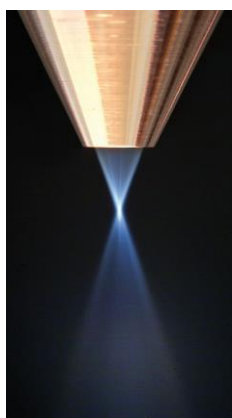
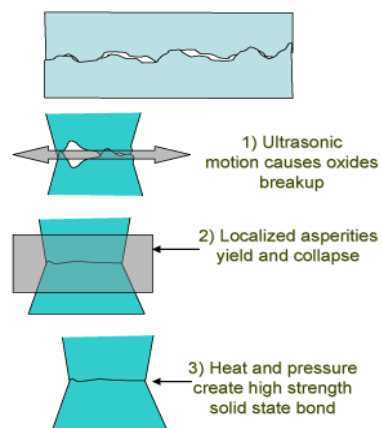
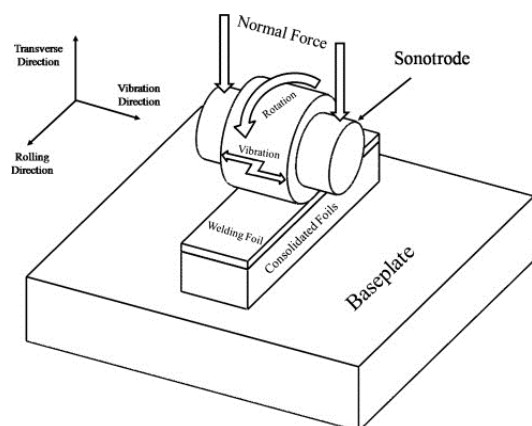


б

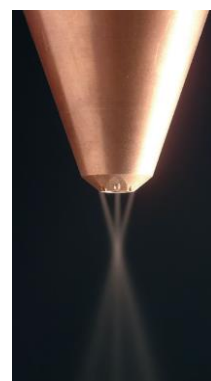
Рис. 57. Системы подачи материала: *а* – Optomec, *б* – Fraunhofer ILT.
Источники – www.optomec.com, www.ilt.fraunhofer.de

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.

Компания выпускает модель *SonicLayer R200* с рабочей зоной 508x305x524 мм, специально разработанную для научных целей и малого бизнеса; а также две промышленные машины *SonicLayer 4000* и *SonicLayer 7200* (рис. 59) с рабочей зоной, соответственно, 1016x1016x610 мм и 1829x1829x914 мм. В промышленные машины интегрирован трехкоординатный обрабатывающий центр. Производительность машины *SonicLayer 7200* – около 60 дюйм³/ч (983 см³/ч).



a



б

Рис. 58. Системы подачи материала: *a* – коаксиальная; *б* –многоканальная.
Источник – www.ilt.fraunhofer.de



Рис. 59. Форма для литья под давлением. Машина *SonicLayer 7200*.
Источник – Wohlers Report 2012

ГЛАВА 5. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ

Задача быстрого прототипирования, т.е. получение прототипа изделия в максимально короткие сроки, остается одной из основных задач практического применения АФ-технологий. В данном случае понятие «*прототип*» довольно широкое. На этапе выполнения научно-исследовательской работы необходимо быстро получить *прообраз изделия*, на этом этапе важна *отработка геометрии детали, оценка эргономических качеств, проверка собираемости и компоновочных решений*. Поэтому «быстрое» изготовление детали по «обходной технологии» позволяет существенно сократить сроки разработки изделия. Под *прототипом* понимают и модель, иногда масштабную, предназначенную для испытаний.

«Прототип изделия можно использовать в качестве концептуальной модели для визуализации и анализа конструкции; прототип позволяет конструкторам выполнить доработку и провести некоторые функциональные тесты; также он может служить мастер-моделью для изготовления инструментальной оснастки. Кроме того, прототип может использоваться в маркетинговых целях или при определении стоимости изготовления» [61, с. 20].

Большое количество прототипов строится как поисковые дизайнерские модели с различными нюансами в конфигурации, цветовой гамме раскраски и т.д. Существует и специализация. Например, компания *LUXeXcel* (Нидерланды) разработала технологию и оборудование для моделирования оптических изделий (линз, призм и т.д.).

К основным технологиям изготовления прототипов относят [98, 134] механическую обработку; фотополимеризацию; стереолитографию; лазерное спекание порошковых материалов; послойное наложение расплавленной полимерной нити; склеивание (ламинирование) слоев; литье в эластичные силиконовые формы; литье под низким

давлением; создание твердотельных объектов с помощью принтеров; изготовление моделей из вспененных пластмасс; литье прототипов в опытных формах. Практически по всем перечисленным технологиям могут быть получены прототип и модель, имеющие качественный внешний вид.

Сущность технологии, называемой *Printoptical*, заключается в следующем (рис. 60): на глянцевую поликарбонатную подложку (1) с помощью струйной головки послойно наносится фотополимер, который отверждается УФ-лампой.

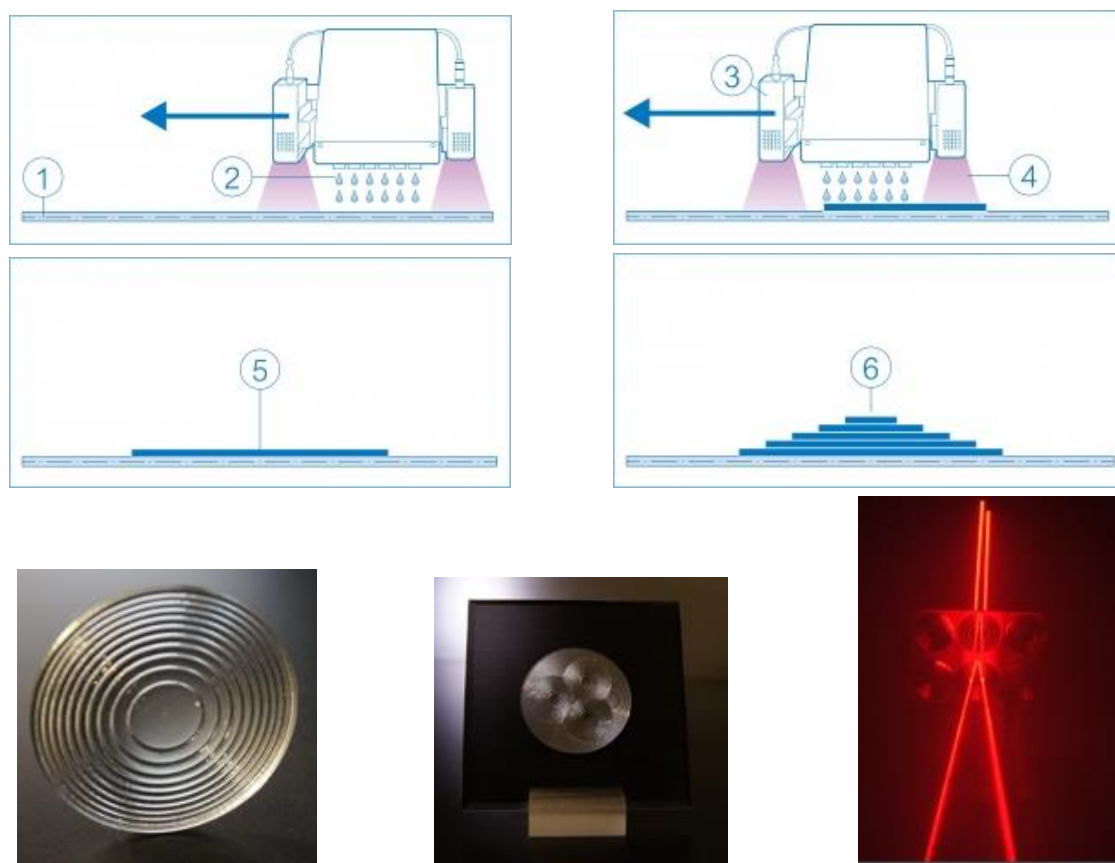


Рис. 60. Технология *Printoptical*

Размер капель фотополимерных «чернил» варьируется в зависимости от дизайна модели. Разрешение печати высокое, практически такое же, как и в обычных 2D-струйных принтерах. Ключевым эле-

ментом 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 чего поверхность модели получается гладкой и не требует пост-обработки.

Для целей собственно прототипирования чаще 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 такие фирмы, как

- *Objet Geometries*, принтеры серий *Desktop Objet24*, *Objet30*, *Eden*;
- *Stratasys*, принтеры серий *Mojo 3D*, *Print SE*, *Dimension*;
- *Envisiontec*, принтеры серии *Ultra* и др.;
- *ZCorporation*, монохромные принтеры *ZPrinter 150*, *ZPrinter 250* и цветные – *ZPrinter 350*, *ZPrinter 450*, *ZPrinter 650*.

Это принтеры среднего уровня (стоимостью до 20-100 тыс. евро), которые находят применение в архитектурных бюро и модельных мастерских, дентальной медицине, при выполнении научных задач и в опытном производстве. Совмещение технологии быстрого прототипирования *FDM* с 3D-сканирующим модулем и фрезерной обрабатывающей головкой позволяет оперативно вносить изменения в макет при изменении трехмерной компьютерной модели и наоборот. Данная модификация позволяет не только ускорить процесс проектирования деталей, но и способна улучшить их эстетические и эргономические показатели [88].

Как и любая *AF*-технология, предполагающая послойный принцип построения детали, технологии *Objet*, *Stratasys*, *ZCorporation*, *SLA* и *SLS* 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 (рис. 61).



Рис. 61. Послойный принцип построения модели

Например, при построении модели шара на полюсе он будет иметь плоскую площадку, шероховатость на участке, близком к полюсу, будет максимальной, однако чем ближе к экватору, тем лучше будет качество поверхности.

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

Важным параметром, определяющим качество поверхности, является качество исходной трехмерной *CAD*-модели. Виртуальная мо-

дель представляет собой 3D-поверхность в виде замкнутой сетки из треугольников, шероховатость поверхности напрямую зависит от качества создания этой сетки. Так, при использовании трехмерной модели низкого качества макрошероховатость, заложенная в файле, может дать ложное представление о качестве построения прототипа (рис. 62).

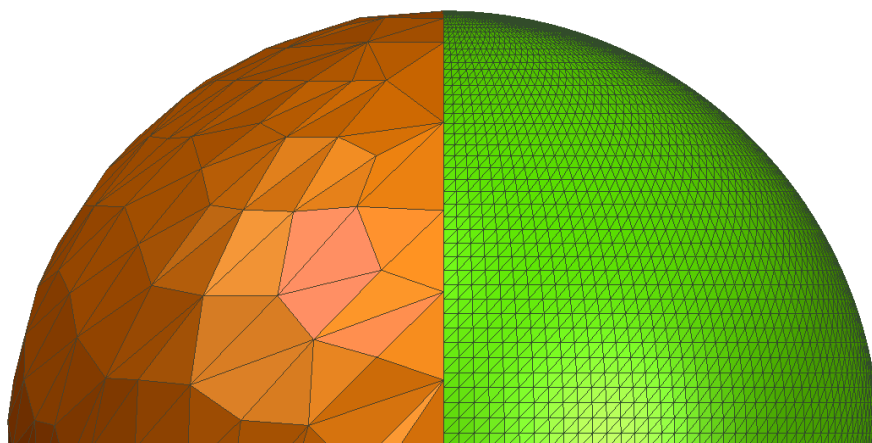


Рис. 62. Модель шара низкого качества слева, высокого качества – справа

На сайтах компаний-производителей AF-машин представлены разнообразные примеры выполнения конкретных проектов. При рассмотрении этих иллюстраций на поверхности модели обнаруживается своеобразная текстура, по которой можно составить представление об ожидаемой чистоте поверхности модели (рис. 63, 64). Во многих случаях большая или меньшая шероховатость не имеет принципиального значения для потребителя.



Рис. 63. Прототип пульта (*Objet*)

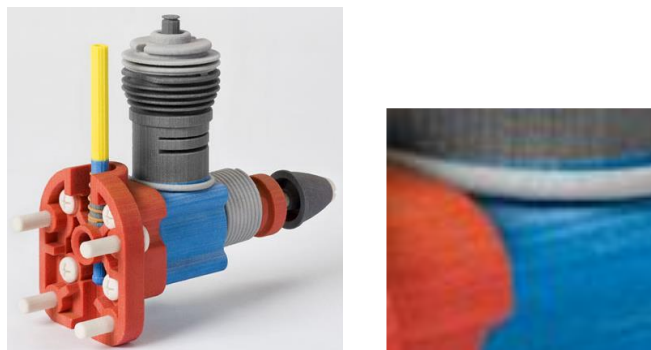


Рис. 64. Модель сборочного узла (ZCorporation)

При необходимости поверхность модели можно улучшить ручной обработкой (шлифованием, полированием, окраской или лакировкой). В ряде случаев это вызывает технические трудности и может привести к потере точности (геометрии) модели. Как правило, чем меньше шероховатость поверхности модели, тем выше цена AF-машины.

Технологии *SLS*, *DLP*, *PolyJet* и другие, использующие жидкий фотополимер в качестве модельного материала, предполагают наличие так называемых *поддерживающих структур* – *поддержек*, на которых закрепляется тело модели при построении (рис. 65). Эти поддержки строятся автоматически по специальной программе и представляют собой тонкие столбики. В зависимости от технологии они строятся из специального легкорастворимого в воде материала (технологии *PolyJet* от *Objet*) или из основного модельного материала (классическая лазерная стереолитография – *SLA*). После построения поддержки удаляются механически или смываются водой (*Objet*), поэтому одна из поверхностей модели более шероховатая, чем остальные. Качество построенной модели зависит также от квалификации персонала: правильности ориентации модели на рабочей платформе перед построением, верности выбранного режима генерации поддерживающих структур, качества исходного 3D-файла.

В качестве примера в табл. 2 (Приложение) приведены результаты сравнительных измерений поверхностей одной и той же детали,

построенной на разных машинах. Для большей достоверности измерения проводились на горизонтальных (*Tip A*) и вертикальных (*Tip B*) поверхностях. В приведенных значениях из-за эластичности материала допустимы погрешности в пределах 10%. Также необходимо учитывать то, что измерения только одного вида поверхности могут привести к неверному представлению о возможностях машины. Машина, работающая с жидким фотополимером, может построить очень гладкую, почти зеркальную горизонтальную плоскость, а на вертикальной стенке может наблюдаться заметная шероховатость.

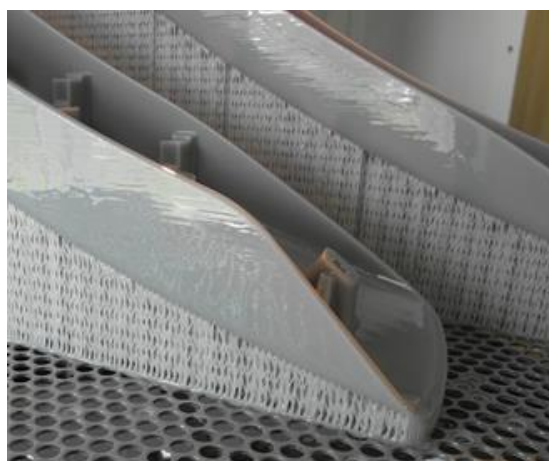


Рис. 65. SLA-модель с поддерживающими структурами.

Предоставлено СПбГПУ

Из приведенных в табл. 3 (Приложение) данных видно, что в каждой отдельной технологии могут быть существенные нюансы в оценке шероховатости, связанные с типом модельного материала и его качеством. По точности построения AF-машины имеют значительные отличия. На технические характеристики принтеров влияют такие параметры, как *толщина слоя построения*, *тип материала*, *конфигурация модели* и др.

На точность построения AF-машин наряду с другими параметрами влияет *толщина слоя построения* (*layers thickness*) или *шаг построения*. Заявляемый шаг построения, например, 0,08 мм для SLS-

машины *3D Systems*, означает, что модель размерами 250x250x250 мм будет построена с отклонениями по осям измерений в пределах $\pm 0,3-0,8$ мм. На конечный результат в значительной степени влияет *тип материала* (полиамид, полистирол) и в еще большей степени – *конфигурация модели*, а также *квалификация персонала*: правильный выбор режимов спекания, ориентация моделей в объеме построения, расположение моделей относительно друг друга и т.д.

Для повышения качества поверхности формируемого изделия и снижения длительности процессов прототипирования и производства разрабатывают алгоритмы разбиения компьютерных моделей изделий сложной формы при их послойном синтезе. Это позволяет оценить эффективность процесса, выбираемого для послойного синтеза изделия заданной формы [129].

Технология *SLS* – это тепловой процесс, в ходе которого в рабочую камеру подводится значительное количества тепла, температура массива в камере достигает 150°C . Строящаяся модель подвергается существенным тепловым нагрузкам и может деформироваться. Этот эффект может быть усилен или ослаблен 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 необходимо строить тестовые модели на разных *AF*-машинах, проводить измерения и оценивать соответствие результатов ожидания и требований к модели для конкретных задач.

Считается, что наилучшая точность построения достигается в *SLA*-машинах, т.к. процесс построения происходит при комнатной

температуре в отсутствие термических нагрузок. Большое значение имеет также качество модельных материалов. Современные *SLA*-материалы малоусадочные и с определенной вязкостью, позволяющей получать в процессе построения тонкие слои до 0,05 мм. Реальная точность построения *SLA*-машин – 0,025-0,05 мм на дюйм линейного размера. Это значит, что модель с характерным размером 250 мм будет иметь отклонения в пределах $\pm 0,25$ -0,5 мм. 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, в этом случае – первая модель будет играть роль *тестовой*.

RP-технологии нашли широкое применение в тех отраслях промышленности, где необходимо изготавливать множество экспериментальных моделей и макетов деталей, требующих длительного времени для конструирования и изготовления (табл. 1). Например, разработка новых методик использования непосредственно *RP-технологии* позволила сократить затраты на проектирование изделий приборостроения, изготовление оснастки и малых партий оптических деталей [54].

Таблица 1

Затраты времени (дни) [79]

Технология	Медицина	Электроника	Автомобилестроение	Авиационная промышленность
Общепринятая технология	13	30	60	120
Технология быстрого моделирования	3	3	5	7

Комплексное использование методов быстрого прототипирования в сочетании с лазерно-интерференционными методами анализа напряженно-деформированного состояния деталей-прототипов обеспечило возможность существенного сокращения временных и финансовых затрат при разработке сложных деталей ДВС [90].

ГЛАВА 6. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Анализ современных технологий литейного производства и факторов, воздействующих на них, показал, что для содействия инновационному развитию литейного производства необходимо применение компьютерных, нанотехнологий и технологий прототипирования [96]. Использование аддитивных технологий в литейном производстве позволяет «выращивать» литейные модели и формы, которые невозможно 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.

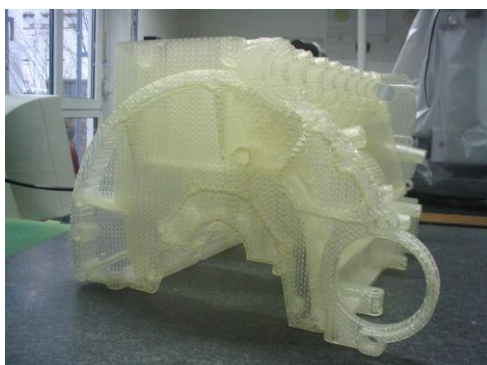
Переход на цифровое описание изделий – *CAD* и появившиеся вслед за *CAD* аддитивные технологии произвели кардинальные изменения в литейном производстве, что особенно проявилось в высокотехнологичных отраслях – авиационной и аэрокосмической области, атомной индустрии, медицине и приборостроении, в отраслях,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

Авторы работы [53] отмечают: «в рыночных условиях успех при запуске в производство нового изделия существенно зависит не только от правильного выбора материалов для изготовления, но и от длительности цикла его подготовки: чем короче цикл подготовки, тем гарантированней успех». Основное преимущество применения аддитивных технологий перед другими – «короткий срок изготовления отливок с момента получения чертежа литой детали. Отливку простой формы можно изготовить в течение суток». Эти технологии находят «все более широкое применение в таких отраслях промышленности,

как авиация и машиностроение при изготовлении отливок из Al- и Mg-сплавов» [53].

Применение методов получения литейных синтез-форм и синтез-моделей за счет *технологий послойного синтеза* позволили радикально сократить время создания новой продукции. Например, для изготовления первого опытного образца детали, характерной для автомобильного двигателестроения – блока цилиндров, – традиционными методами требуется не менее 6 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*) сократило срок получения первой отливки до 2 недель. Эта же деталь может быть получена менее точной, но вполне пригодной для данных целей технологией – *литьем в выращенные песчаные формы на машинах типа S-Max*.

Значительная часть отливок, не имеющих специальных требований по точности литья или структуре, может быть получена в виде готовой продукции в течение 3-4 дней с учетом подготовительно-заключительного времени: прямое выращивание восковой модели или Quick-cast-модели (1 день); формовка+сушка формы (1 день); прокалка формы и собственно литье (1 день) (рис. 66).



а



б

Рис. 66. Блок цилиндров: *а* – Quick-cast модель; *б* – чугунная отливка.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»

В работе [120] описан опыт использования технологии *Quick-Cast* для получения металлической оснастки и мелких партий отливок, характеризующихся размерной точностью и шероховатостью поверхности такой же, как по выплавляемым и газифицированным моделям.

Развитие трехмерных *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 создания 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.

На сегодняшний день «тенденции развития современного литейного производства таковы, что речь идет уже не только о создании точных копий (моделей) деталей машин, которые также важны и используются в технологиях» литья по выплавляемым моделям, «но и о создании готовых функциональных (градиентных) изделий» [133, с. 29].

Положительный опыт использования аддитивных технологий для изготовления деталей авиационных агрегатов имеется в ОАО «ОКБ Сухого» [77], на этом предприятии был установлен комплект оборудования технологической линии стереолитографии, который эффективно использовался для получения уникальных по сложности точных литых деталей авиационных агрегатов из алюминиевых сплавов, литых штампов, эластичных силиконовых форм и различной оснастки.

Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм

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

Литейные модели могут быть получены (выращены) из

- 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.

Синтез-модели из порошковых полимеров. В качестве модельного материала для традиционного литья по выжигаемым моделям широко используется *полистирол*. В связи с развитием технологий послойного синтеза полистирол приобрел особую популярность в области прототипирования, а также для промышленного изготовления штучной и малосерийной продукции. Полистирольные модели изготавливаются на *AF*-машинах, работающих по ***SLS-технологии*** (рис. 67, 68). Эту технологию часто применяют для изготовления отливок сложной формы относительно больших размеров с умеренными требованиями по точности.



Рис. 67. Полистирольная модель и отливка головки цилиндра ДВС.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»

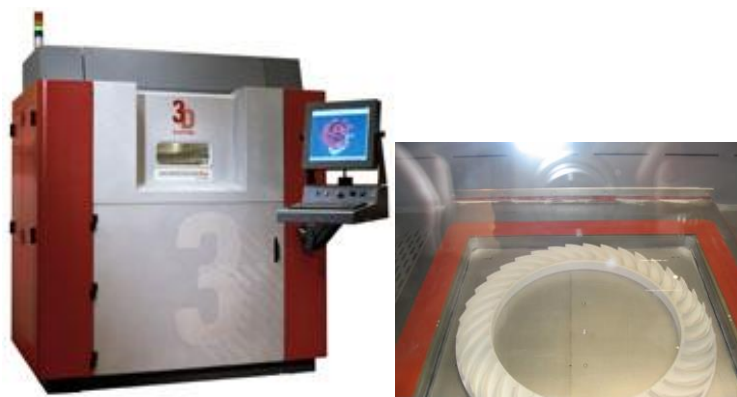


Рис. 68. SLS-машина sPro 60 и модель колеса турбины

Суть *SLS*-технологии 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 инертного газа – азота. Лазерный луч «пробегают» там, где компьютер «видит» в данном сечении *CAD*-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 извлекается из машины и очищается от порошка. Преимуществом данной технологии является отсутствие поддержек, во время построения модель и все ее строящиеся слои удерживаются массивом порошка.

Имеющиеся на рынке машины фирм *3D Systems* и *EOS* позволяют строить достаточно крупные модели (размерами до 550x550x750 мм) без необходимости склейки отдельных фрагментов, что повышает точность отливки и надежность, особенно вакуумного

литься. При этом возможна высокая детализация построения моделей: могут быть построены поверхностные элементы (номера деталей, условные 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 предусматривать возможность стекания материала из застойных зон. Безусловным требованием является использование прокалочных печей с программаторами, программа выжигания полистирола существенно отличается от программы вытапливания воска. При определенном навыке и опыте литье по выжигаемым полистирольным моделям дает хороший результат (рис. 69).

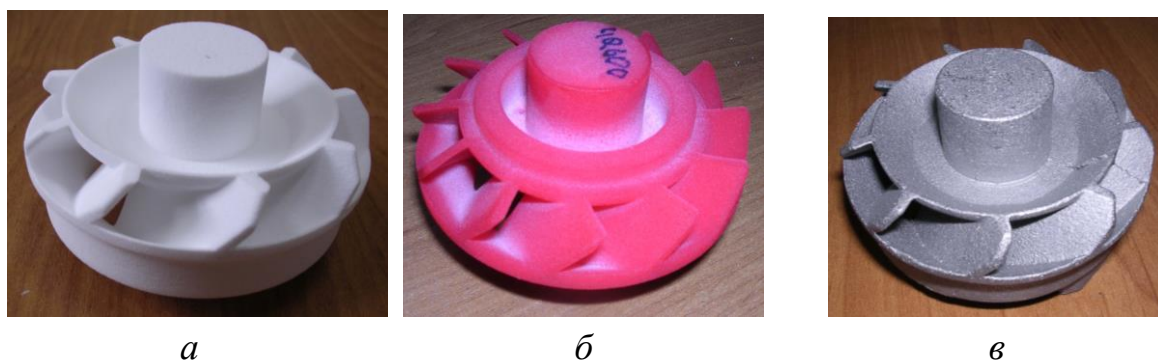


Рис. 69. Полистирольная модель: *а* – после выращивания; *б* – после инфильтрации; *в* – чугунная отливка. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

К недостаткам технологии относят следующее: процесс спекания порошка – это тепловой процесс, характеризующийся неравно-

мерностью распределения тепла по рабочей камере и массиву материала, короблением вследствие температурных деформаций. В результате того что порошок полистирола не сплавляется, как, например, порошки полиамида или металла, а именно спекается – структура модели пористая, похожа 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.

Для придания прочности и хорошего соединения с литниковой системой и формовки модель пропитывают специальным составом на восковой основе, этот процесс называется *инфильтрацией*. При этом модель помещают в специальную печь и при температуре около 80°C пропитывают специальным составом (рис. 70). Инфильтрированные модели имеют красный цвет, из машины извлекаются полистирольные модели снежно-белого цвета.



а



б

Рис. 70. Полистирольные инфильтрированные модели (*а*) и алюминиевые отливки (*б*). Предоставлено ФГУП «НАМИ».

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 последнее время появились полистирольные модельные порошки, не требующие инфильтрации.

При применении технологии получения *выжигаемых синтез-моделей* – **InkJet** от компании *Voxeljet Technology GmbH* (Германия) в качестве модельного материала используется *порошковый акриловый полимер (полиметилметакрилат – оргстекло, modified acrylic glass)* (рис. 71). Применяемые при этом машины VX500, VX800 и VX1000 имеют размеры рабочей зоны 500x400x300, 850x450x500 и 1060x600x500 мм соответственно.

В процессе работы жидкий связующий состав впрыскивается через многосопловую головку и связывает (склеивает) основной модельный материал. Один слой формируется примерно за 30 с, таким образом, при шаге построения 0,2 мм машина может строить модели со скоростью от 12 до 48 мм в час по высоте.

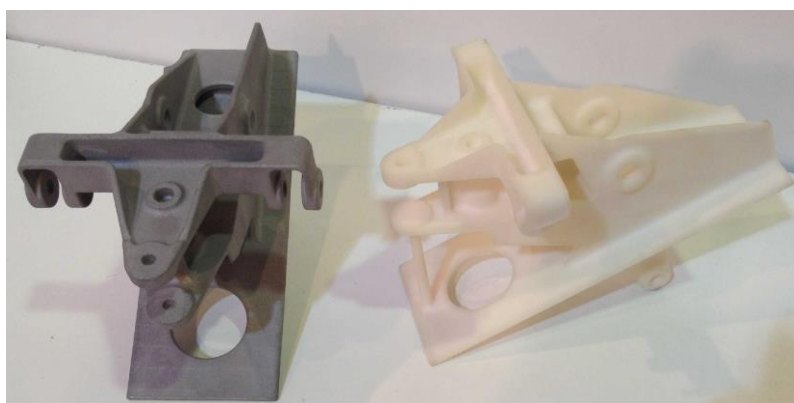


Рис. 71. Отливка Voxeljet. Предоставлено ОАО «НИАТ»

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 кон-

тейнера, на установку которого требуется около 30 с. Машины позиционируются как более производительные и дешевые альтернативы машинам *3D Systems* и *EOS*. Габариты *VX500* – 1790x1852x1660 мм, вес – 1200 кг; *VX800* – 2600x2350x2300 мм, вес – 2500 кг.

Модель *VX1000* (рис. 72) 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. Этот высокопроизводительный станок отличает не только быстрота и точность, но и экологичность. Он может работать с неорганическими формовочными материалами, в противоположность органическим связующим веществам, неорганические связки не сгорают в процессе литья. При этом полностью исключаются выбросы, вредные для здоровья и окружающей среды, которые возникают при использовании органических веществ. *VX1000*, спроектированный как высокопроизводительный станок, отличается в своем классе компактными размерами при общем весе около 4 т.



Рис. 72. Модель Voxeljet. Информация с сайта <http://gerprom.com>

В ОАО «НИАТ», ФГУП «НАМИ» (Россия) имеется опыт работ с моделями от *Voxeljet* для литья по выжигаемым моделям (рис. 73, 74). К достоинствам технологии относится то, что процесс построения

производится 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.



Рис. 73. Модели Voxeljet. Предоставлено ФГУП «НАМИ»



Рис. 74. Алюминиевые отливки. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

В процессе изготовления отливок иногда используют выращивание *литейной формовочной оснастки* из *порошкового полиамида*, широко используемого для функционального прототипирования. *Модели из полиамида* достаточно прочные и во многих случаях позволяют воспроизвести прототип максимально близко к изделию. В ряде случаев оказывается экономически более целесообразным применение по-

лиамидных моделей в качестве альтернативы деревянным моделям. Модель выращивают так же, как и полистирольную. При этом по возможности делают ее полой с минимально возможной толщиной стенок с целью минимизации температурных деформаций. Затем модель для придания прочности и жесткости заполняют изнутри эпоксидной смолой. После этого закрепляют в формовочном ящике, красят и далее – по традиционной технологии формования. Пример такой «быстрой» технологической оснастки для формовки распределительного вала ДВС показан на рис. 75, 76. Представленная на рис. 75 модель выращена из двух частей, в процессе изготовления части были склеены, заполнены эпоксидной смолой и закреплены в формовочном ящике. Продолжительность операций составила 2 дня.

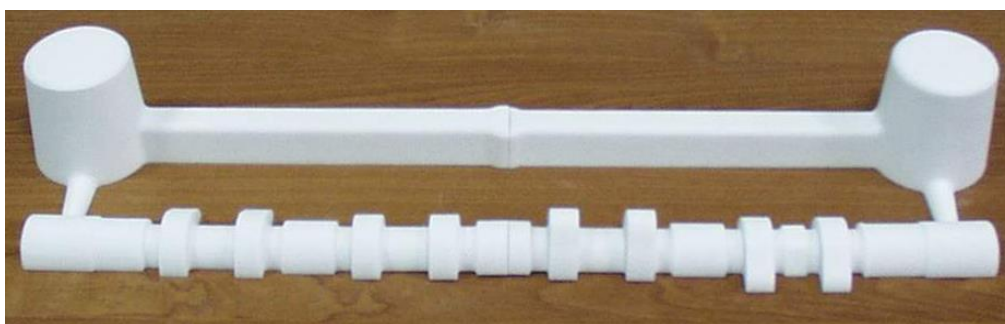


Рис. 75. SLS-модель распределительного вала.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»



Рис. 76. Формовочный ящик для получения песчаной формы.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Синтез-модели из светотверждаемых 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**, **Polyjet** и **DLP-технологии**. Первый способ предполагает последовательное «пробегание» лазерного луча по всей поверхности формируемого слоя там, где в сечении «тело» модели. Второй способ отверждения 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 **Polyjet**-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. По мнению авторов работы [56], «малые удельные затраты энергии на отверждение, безотходность и экологическая чистота делают эту технологию наиболее привлекательной с точки зрения создания на ее основе установок для оперативного макетирования».

Технологии нелазерной «засветки» с заданной экспозицией, используемые, например, фирмами *Objet Geometry* 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 **AF**-машин разного уровня.

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

Лазерная стереолитография. Фирма *3D Systems* – пионер в области практического освоения технологий быстрого прототипирования – в 1987 г. представила для коммерческого освоения стереолитографическую машину *SLA-250* с размерами зоны построения 250х250х250 мм.

Основой в *SLA*-процессе является ультрафиолетовый лазер (твердотельный или CO_2). Лазерный луч в данном случае является не источником тепла, как в *SLS*-технологии, а источником света. Луч «штрихует» текущее сечение *CAD*-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 извлекается, остатки смолы смываются ацетоном или спиртом, поддержки удаляются. Для повышения прочности модели помещаются 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, «зафикси-

рованный» 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, это позволяет получать модели, которые невозможно изготовить традиционными методами (рис. 77).

Высокая точность объектов, получаемых при использовании стереолитографии, а также их дороговизна ориентируют ее преимущественно на использование в медицине (создание уникальных ортопедических протезов), автомобильной и авиационной промышленности. Высокая стоимость оборудования и материалов препятствует широкомасштабному внедрению и использованию на отечественных машиностроительных заводах [89].



а



б

Рис. 77. Ювелирное изделие: *а* –SLA-модель; *б* – серебряная отливка.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Стереолитография широко применяется для выращивания литейных моделей; изготовления мастер-моделей (для последующего получения силиконовых форм, восковых моделей и отливок из полиуретановых смол); создания дизайн-моделей, макетов и функциональных прототипов; изготовления полноразмерных и масштабных моделей для

гидродинамических, аэродинамических, прочностных и других видов исследований.

Для изготовления литейных деталей применяют так называемые *Quick-Cast*-модели (рис. 78), т.е. модели для «быстрого литья», по которым, по аналогии с восковыми моделями, могут быть быстро получены металлические отливки (рис. 79, 80). *Quick-Cast*-модели используют в технологических процессах, аналогичных процессам, в которых применяют восковые и полистирольные модели.

Модели *Quick-Cast* имеют *сотовую структуру массива стенок*: внешние и внутренние поверхности стенок выполняют сплошными, а само тело стенки формируют в виде набора сот. Это, во-первых, на 70% снижает общую массу модели, а следовательно, меньше 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.

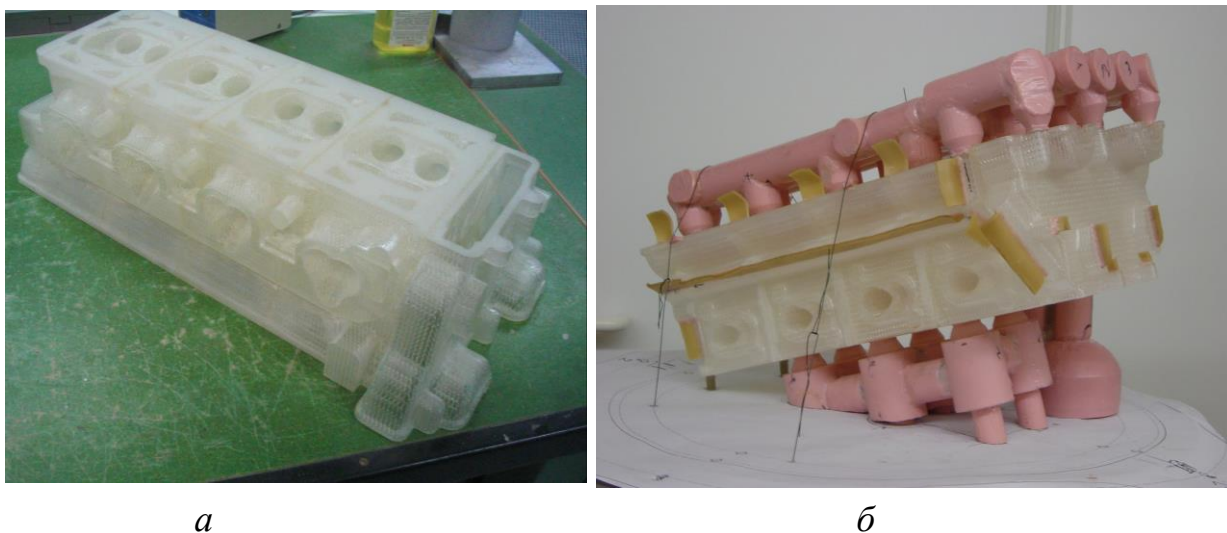


Рис. 78. Модели для быстрого литья: *а* – Quick-cast модель, *б* – Quick-cast модель с литниковой системой.

Предоставлено 3D Systems и Schueltheis GmbH



Рис. 79. Алюминиевая отливка головки цилиндров.
Предоставлено ФГУП «НАМИ»



Рис. 80. Quick-cast модель с литниковой системой и алюминиевая отливка цилиндра. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Сотовая же структура позволяет модели при расширении «скадываться» внутрь, не напрягая и не деформируя стенки формы. Это важнейшее преимущество *Quick-Cast*-технологии.

Поскольку *Quick-Cast*-модели – разовые литейные модели, способ применяют при необходимости изготовления 1-2 отливок. В тех

случаях, когда необходимо получить партию из 5-25 отливок, применяют более экономичный способ. Выраченную на *SLA*-машине модель используют в качестве **мастер-модели**, по которой делают так называемую эластичную форму (чаще всего из силикона). С помощью этой формы, обычно путем заливки в вакуумной камере, получают требуемое количество восковых моделей – *восковок*, которые затем используют в качестве литейных моделей, применяя известные способы литья по выплавляемым моделям (рис. 81, 82). Формовку восковок производят как в монолитные, например, гипсо-керамические, так и в оболочковые формы. 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.



Рис. 81. Мастер-модель и силиконовая форма.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»

В отдельных случаях *SLA*- и *SLS*-модели могут быть использованы в качестве оснастки – формовочной модели для литья «в землю». В этом случае в конструкции модели предусматривают литейные уклоны и радиусы для извлечения модели без повреждения формы (рис. 83).

Однако этот способ формовки используется редко из-за недостаточной прочности *SLA*-модели.

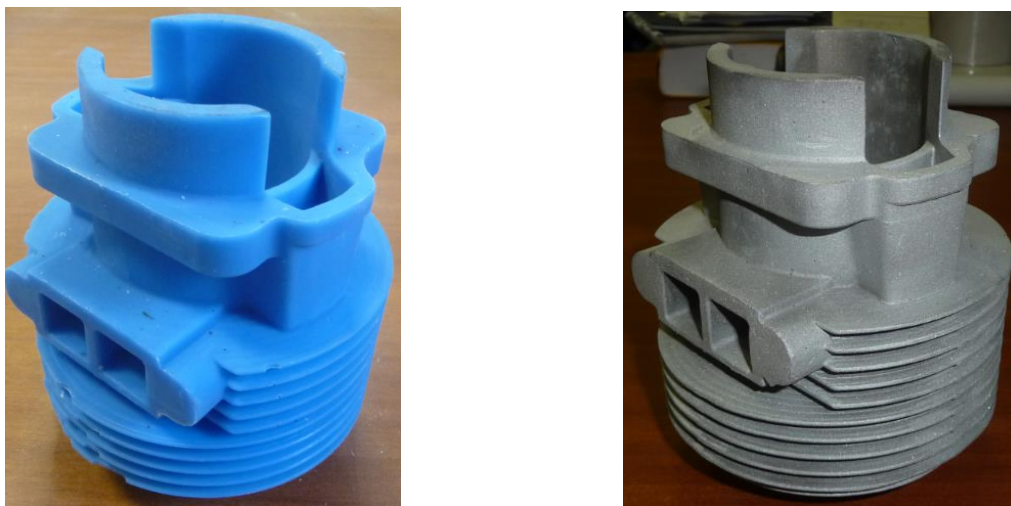


Рис. 82. Восковка и алюминиевая отливка цилиндра.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»

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



Рис. 83. Передняя крышка ДВС: *а* – CAD-модель, *б* – SLA-модель, *в* – отливка «в землю». Предоставлено ФГУП «НАМИ»

В России имеется опыт применения технологии *Quick-Cast* в авиационной промышленности («Салют», «Сухой», УМПО, «Рыбинские моторы»), в энергетическом машиностроении (ОАО «ТМЗ» – Тушинский машиностроительный завод) (рис. 84), 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 других отечественных отраслей эта технология остается практически неосвоенной.



Рис. 84. Рабочее колесо турбины: *а* – оболочковая форма, *б* – отливка.
Предоставлено ОАО «ТМЗ»

SLA-машины применяют для получения сложных отливок в авиационной, военной и космической отраслях, а также в автостроении и энергетическом машиностроении. Основным производителем *SLA*-машин является американская компания *3D Systems*, выпускающая машины с разными размерами зоны построения (от 250x250x250 мм до

1500x750x500 мм). Для литейного производства в мировой промышленности достаточно активно используются машины серии *iPro* (рис. 85). Единственный недостаток этой технологии – первоначальная и эксплуатационная стоимость. Наличие лазера делает эти установки относительно дорогими и требует регулярного технического обслуживания.

Машина может 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.

Стоимость расходных материалов находится в пределах 250-300 евро/кг, что сопоставимо со стоимостью модельных материалов других фирм. Стоимость *SLA*-моделей на аутсорсинге в Европе и России примерно одинакова, зависит от региона и находится в пределах 1,0-2,0 евро /см³. При этом стоимость собственно расходного материала – фотополимера (с учетом некоторых потерь на поддерживающие структуры) составляет 0,4-0,5 евро/см³.

Стереолитография – «конек» фирмы *3D Systems*, и фактически в этой области она является монополистом в Европе и США.



Рис. 85. Машина *iPro 8000* и *SLA*-модели

С 2009 г. выпускается новая модель iPro™ 9000 в пяти модификациях по размерам зоны построения и объему ванны. В моделях серии iPro 8000/9000 установлен новый твердотельный лазер номинальной мощностью 1000 мВт с гарантийным сроком службы 10000 час. (табл. 2).

Таблица 2

Параметры моделей

Модели	Размер рабочей зоны, мм	Шаг построения, мм	Максимальный вес модели, кг	Габаритные размеры, мм	Вес, кг
Viper si 2	250x250x250	0,02-0,10	15	1340x860x1780	463
iPro 9000	650x350x300 650x750x50 650x750x275 650x750x550 1500x750x550	0,05-0,15	75 150	2120x1580x2210	2404
iPro 8000	650x350x300 650x750x50 650x750x275 650x750x550	0,05-0,15	75	1260x2220x2280	1590

В 2012 г. на рынок были выпущены новые стереолитографические машины с улучшенными характеристиками и расширенным диапазоном применяемых модельных материалов (табл. 3).

По выбору заказчика машины оснащают ваннами различного размера, при этом используют следующие материалы:

- *VisiJet Flex* – полипропилен-подобный, эластичный, белый, матовый, оптимальный для прототипирования защелок и прочих 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 3

Характеристики стереолитографических машин

Характеристики	ProJet SD 6000	ProJet HD 6000	ProJet MP 6000	ProJet SD 7000	ProJet HD 7000	ProJet MP 7000
Размеры зоны построения, мм	250x250x250 250x250x125 250x250x50			380x380x250 - 380x380x50		
Толщина слоя построения, мм, в режиме:						
HD – High Definition	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
UHD – Ultra HD	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
XHD – Extra HD	-	0,05	0,05	-	0,05	0,05
Точность построения	0,025-0,05 мм на 25 мм линейного размера модели					
Модельные материалы:	Сменные картриджи по 2 кг					
VisiJet Flex	*	*	*	*	*	*
VisiJet Tough	*	*	*	*	*	*
VisiJet Bkack	*	*	*	*	*	*
VisiJet Clear	*	*	*	*	*	*
VisiJet HiTemp	*	*	*	*	*	*
VisiJet e-Stone			*			*
Энергопотребление	220 В, 50 Гц, однофазный, 750 Вт					
Габаритные размеры, мм	787x737x1829			984x854x1829		
Масса, кг	181			272		

Разработчиком технологии *DLP* является международная компания *Envisiontec*, которая свои первые машины выпустила в 2003 г. В

машинах *Envisiontec* семейства *Perfactory* применяется оригинальная технология *DLP* – *Digital Light Proccession*, 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 (рис. 86).

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.

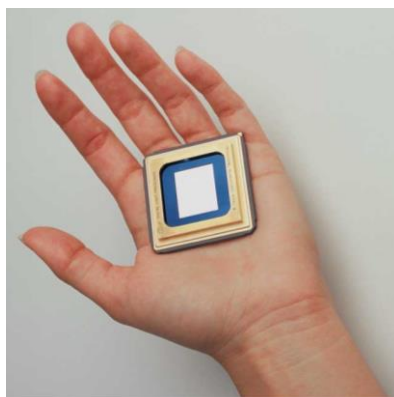


Рис. 86. *DMD* – Digital Micromirror Device

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.

При построении модели формируется так называемая «маска» каждого текущего сечения модели, которая проецируется на рабочую платформу через систему *DMD*-элементов (зеркал) с помощью проектора с высокой яркостью света. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя происходит в течение 3-5 с. Таким образом, 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, 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* (рис. 87) 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 *RP*-машины, хорошая выжигаемость моделей и малая зольность. Технология *DLP* является весьма перспективной и эффективной 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* на построение таких моделей необходимо не менее 5,5 и 16 часов соответственно.



Рис. 87. Модели Envisiontec. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Машины серий *Xtrime* (зона построения 320x240x430 мм) и *XEDE* (457x431x508 мм) позиционируются как AF-машины для промышленного серийного производства **мастер-моделей** и **моделей для литья металла по выжигаемым моделям**, а также как высокопроизводительные машины для сервис-бюро, специализирующихся на оказании услуг в области аддитивных технологий. Машина *Xtrime* имеет один цифровой прожектор с разрешением 1400x1050 пикселей, *XEDE* – два прожектора (рис. 88).

Эффективная рабочая зона построения и толщина слоя построения регулируются сменой линз оптической системы. Особенностью машин серий *Xtrime* и *XEDE* является то, что, в отличие от других технологий, здесь используется не дискретное, пошаговое, а непрерывное движение платформы вниз с малой скоростью. Поэтому на моделях нет ярко выраженных ступенек, характерных для других способов построения. Модели требуют пост-обработки – удаления поддержек и в ряде случаев, как и стереолитография, – дополимеризации.

В 2010 г. на рынке появилась машина *ULTRA*, в которой технологии *DLP* получили дальнейшее развитие. Размеры зоны построения – 254x190x203 мм, скорость построения – 12,7 мм/час (рис. 89). В ней предлагается более широкий выбор материалов: ABS- и пропилен-подобные смолы, а также специальный материал – аналог литейного воска для выращивания литейных моделей. Для поддержек используется основной модельный материал.

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, для серийного производства слуховых аппаратов и приспособлений коррекции зубов.



Рис. 88. Машина серии *Perfactory XEDE*

Восковые синтез-модели получают с использованием технологии **MJM – Multi Jet Modeling**. Модели строятся 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 рабочую платформу, отверждение каждого слоя производится за счет облучения ультрафиолетовой лампой.



Рис. 89. Машина *Ultra*, *Envisiontec*

Принтеры *ProJet CP 3000* и *ProJet CPX 3000* (рис. 90) специально разработаны для выращивания восковых моделей для точного литья металлов в гипсо-керамические и оболочковые формы (рис. 91, 92). Принтеры имеют два режима построения модели – «стандартный» с разрешением (xyz) 328x328x700 точек на дюйм и размерами зоны построения 298x185x203 мм и «высокоточный» (*XHD – Xtreme High Definition*) с разрешением 656x656x1600 точек на дюйм на уменьшенной до 127x178x152 мм зоне построения.

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 полимер с низкой температурой плавления, который после построения модели удаляется струей горячей воды. Модельный материал *VisiJet® CPX200* и материал поддержек *VisiJet® S200* содержится в виде баллонов-картриджей по 0,38 и 0,4 кг соответственно. В принтер может быть установлено до 10 картриджей обоих видов.



Рис. 90. *ProJet CPX 3000*. Предоставлено 3D Systems

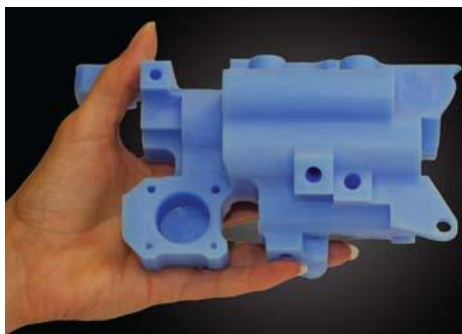


Рис. 91. Литейные модели. Предоставлено 3D Systems



Рис. 92. Оболочковая форма и чугунная отливка корпуса турбины, полученные по восковой синтез-модели. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

В «стандартном» режиме толщина слоя построения составляет 36 мкм, в «высокоточном» режиме – 16 мкм. Точность построения (в зависимости от конфигурации, ориентации и размеров модели) – 0,025-0,05 мм на длине в один дюйм. Принтер позволяет строить модели с толщиной стенок до 1 мм, в отдельных случаях до 0,8 мм. Крупные модели могут быть построены частями и затем склеены.

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

Технологии синтеза песчаных литейных форм

В последние годы динамично развивается направление *непосредственного выращивания песчаных форм* для литья металлов, а также выращивание *металлических форм*, в частности, пресс-форм для литья пластмасс.

Для производства песчаных литейных форм используются AF-технологии *послойного спекания плакированного песка лазерным лучом* (фирма EOS) и *послойного нанесения связующего состава*, или *Inkjet-технология* (ExOne).

Технология *послойного спекания плакированного песка лазерным лучом* (фирма EOS) представляет собой разновидность SLS-технологии, различие состоит в том, что в качестве модельного материала используется литейный (силикатный или циркониевый), предварительно плакированный полимером песок. После спекания получается «грин-модель», требующая аккуратного обращения при очистке. Для закрепления очищенных мест их сразу обрабатывают пламенем газовой горелки. После очистки фрагменты формы помещают в прокалочную печь и окончательно (при температуре 300-350°C) отверждают массив формы.

Технология *послойного нанесения связующего состава*, или *Inkjet-технология (ExOne)*, отличается от *MJM-технологии* тем, что на рабочую платформу впрыскивается не строительный материал, а связующий состав. Строительный материал (литейный песок) подается и разравнивается на рабочей платформе послойно с шагом 0,2-0,4 мм аналогично *SLS-системам*. В этом случае дополнительной термообработки формы не требуется.

Независимо от метода построения собственно формы алгоритм действий конструктора-технолога практически одинаков. При изготовлении отливки головки цилиндров с использованием *SLS-технологии* последовательность операций выглядит следующим образом:

создается CAD-модель изделия (рис. 93);

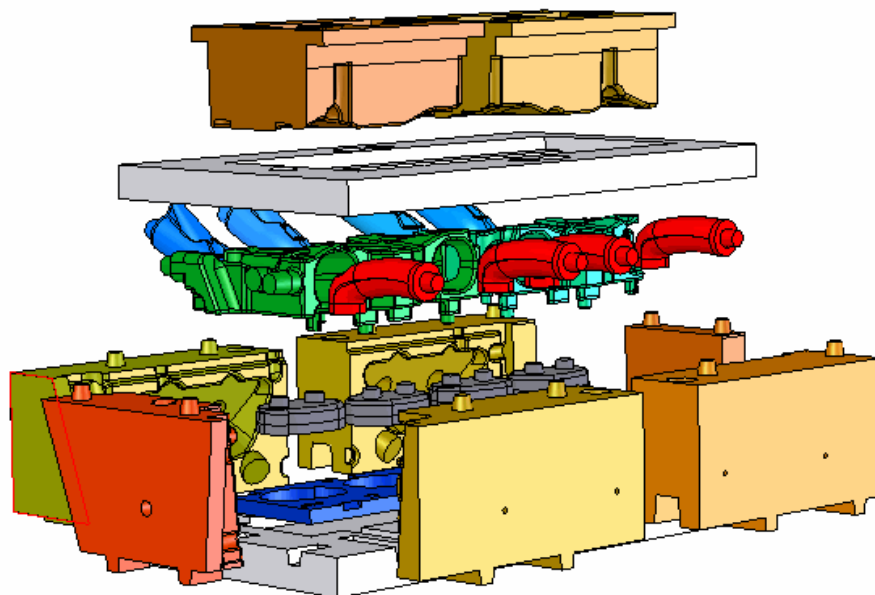


Рис. 93. CAD-модели

назначаются припуски на обрабатываемые поверхности;
согласно рекомендациям технолога проектируется литниковая система, которая сочленяется с основной CAD-моделью, получают технологическую CAD-модель;

модель масштабируют в соответствии с коэффициентом усадки литейного материала;

создается модель будущего песчаного блока – обычно в виде параллелепипеда, куда заключена технологическая CAD-модель;

блок разрезается на несколько частей в зависимости от размеров рабочей камеры *AF-машины*;

создаются негативы – «отпечатки» технологической модели в песчаном блоке или его фрагментах;

методом вычитания создаются модели стержней;

в завершение процесса проектирования создаются *stl-файлы* формы (аббревиатура *STL* расшифровывается как *STereoLithography*, т.е. объемная литография. Формат *STL* и его спецификации были созданы компанией *Albert Consultion group*, которая занималась разработкой первого алгоритма послойной обработки по заказу компании *3D Systems* [5, 6]).

Далее *AF-машина* строит фрагменты формы (рис. 94а).



а



б

Рис. 94. Технология построения песчаной формы: а – выращивание формы; б – сборка формы. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

После завершения построения фрагменты песчаной формы собирают: стыкуют, герметизируют швы, устанавливают холодильники и т.д. (рис. 94б).

Затем следуют процесс заливки металла и извлечения отливки (рис. 95).



Рис. 95. Алюминиевая отливка головки цилиндров, изготовленная по *SLS-технологии*. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Машины для синтеза песчаных форм. Машины *ExOne* отличаются высокой производительностью и предназначены для производства штучной и серийной продукции (рис. 96).

Самая большая из коммерческих машин *S-MAX* имеет рабочую зону построения 1500x750x700 мм, бункер емкостью 800 л, шаг построения – 0,2-0,4 мм, скорость построения моделей – 12-28 мм/ч по высоте, на формирование слоя необходимо около 40 секунд (табл. 4). Выработка всего объема при непрерывной работе машины требует два дня. Машина чувствительна к качеству песка – размер частиц не должен превышать 140 мкм.



Рис. 96. Машина *S-Print*, *ExOne*

Таблица 4

Параметры машин *ExOne*

Машины <i>ExOne</i>	<i>S-print</i>	<i>S-Max</i>
Размеры зоны построения, мм	750x380x400	1800x1000x700
Толщина слоя построения, мм	0,2-0,4	0,28-0,5
Скорость построения, мм/ч	12-28	12-25
Производительность, см ³ /ч	7500	59400-108000
Габаритные размеры, мм	2820x2440x2160	7000x3586x2860
Вес, кг (основной модуль)	2500	6500

Основным преимуществом машины является возможность построения относительно крупногабаритных форм и стержней (рис. 97). Производительность машины является существенным преимуществом в условиях промышленного производства. Базовая стоимость машины составляет 1,4 млн. евро.

В машине *EOS S750* (рис. 98) 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). Габаритные размеры – 1420x1400x2150 мм.

Для увеличения скорости работы в машине используется система с двумя лазерами.



Рис. 97. Очистка и извлечение песчаных форм из бункера.
Предоставлено ОАО «НИАТ»



Рис. 98. Машина EOS S750

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. На ней изготавливают формы и стержни, недоступные по сложности другим технологиям. Эти машины применяются там, где существуют повышенные требования к точности литья и чистоте поверхности отливок (рис. 99).

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



Рис. 99. Модели и отливки, изготовленные с помощью *EOS S750*

Литье полиуретановых смол в силиконовые формы. Наиболее динамично развивающееся направление использования фотополимеров в литейном деле – это изготовление высокоточных мастер-моделей, как для последующего получения через силиконовые формы восковых моделей, так и для литья полиуретанов (рис. 100). Исполь-

зование силиконовых форм оказывается чрезвычайно эффективным при штучном и малосерийном производстве восковок. При этом достигается высокое качество восковок.

Компании, оказывающие услуги в области прототипирования, имеют оборудование для получения мастер-моделей и литья полиуретановых смол в эластичные формы. Мастер-модели обычно выращивают на *SLA*- или *DPL*-установках, обеспечивающих наилучшую чистоту поверхности и высокую точность построения модели. Достаточно высокое качество для использования как мастер-модели имеют также модели, полученные на 3D-принтерах типа *ProJet* и *Objet*.

Мастер-модели используют для получения так называемых «быстрых форм», в частности, силиконовых форм, в которые затем производится литье полиуретановых смол или воска для последующего литья металлов (рис. 101).

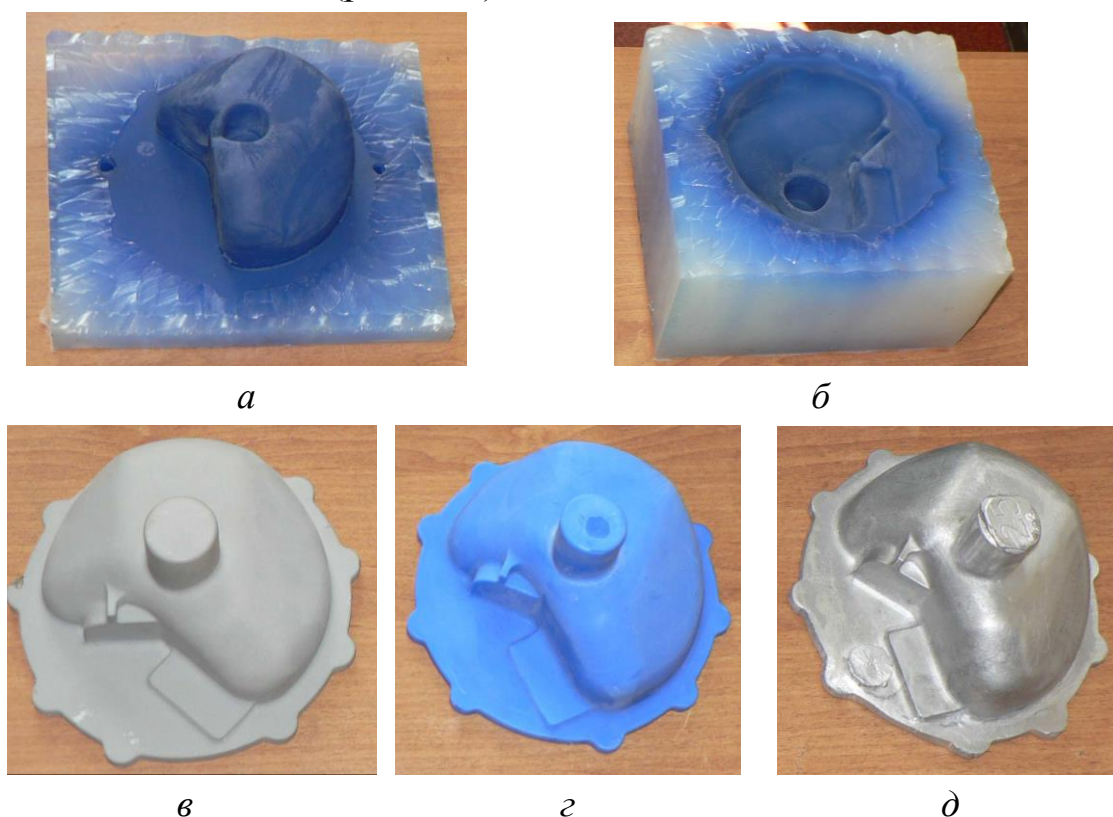


Рис. 100. Литье в силиконовые формы: *а, б* – силиконовая форма; *в* – мастер-модель; *г* – восковая модель; *д* – металлическая отливка.

Предоставлено ФГУП «НАМИ»



Рис. 101. Отливки из полиуретана, полученные литьем в силиконовые формы. Предоставлено *SLM Solutios*

Технологии литья в эластичные формы получили широкое распространение в мировой практике. В качестве материала форм используют различные *силиконы* (смесь двух исходно жидких компонентов *A* и *B*, которые при смешении в определенной пропорции полимеризуются и образуют однородную относительно твердую массу) как материал, обладающий малым коэффициентом усадки и относительно высокой прочностью и стойкостью. Эластичные формы получают путем заливки мастер-моделей силиконом в вакууме. Мастер-модель располагают обычно в деревянной опоке, опоку помещают в вакуумную литейную машину, где предварительно в специальной емкости производят смешение компонентов *A* и *B*, 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 термошкафа. Один термошкаф предназначен для хранения расходных материалов при температуре около 35°C. Второй термошкаф, в котором поддерживается температура около 70°C, используется для предварительной термоподготовки силиконовой фор-

мы непосредственно перед заливкой. Размер второго термошкафа должен соответствовать размерам вакуумной камеры машины.

После заливки полиуретановой смолы форма возвращается в печь, где происходит полимеризация смолы в оптимальных условиях. Используя специальные технологические приемы, форму разрезают на две или несколько частей, в зависимости от конфигурации модели, затем модель извлекают из формы (рис. 102).

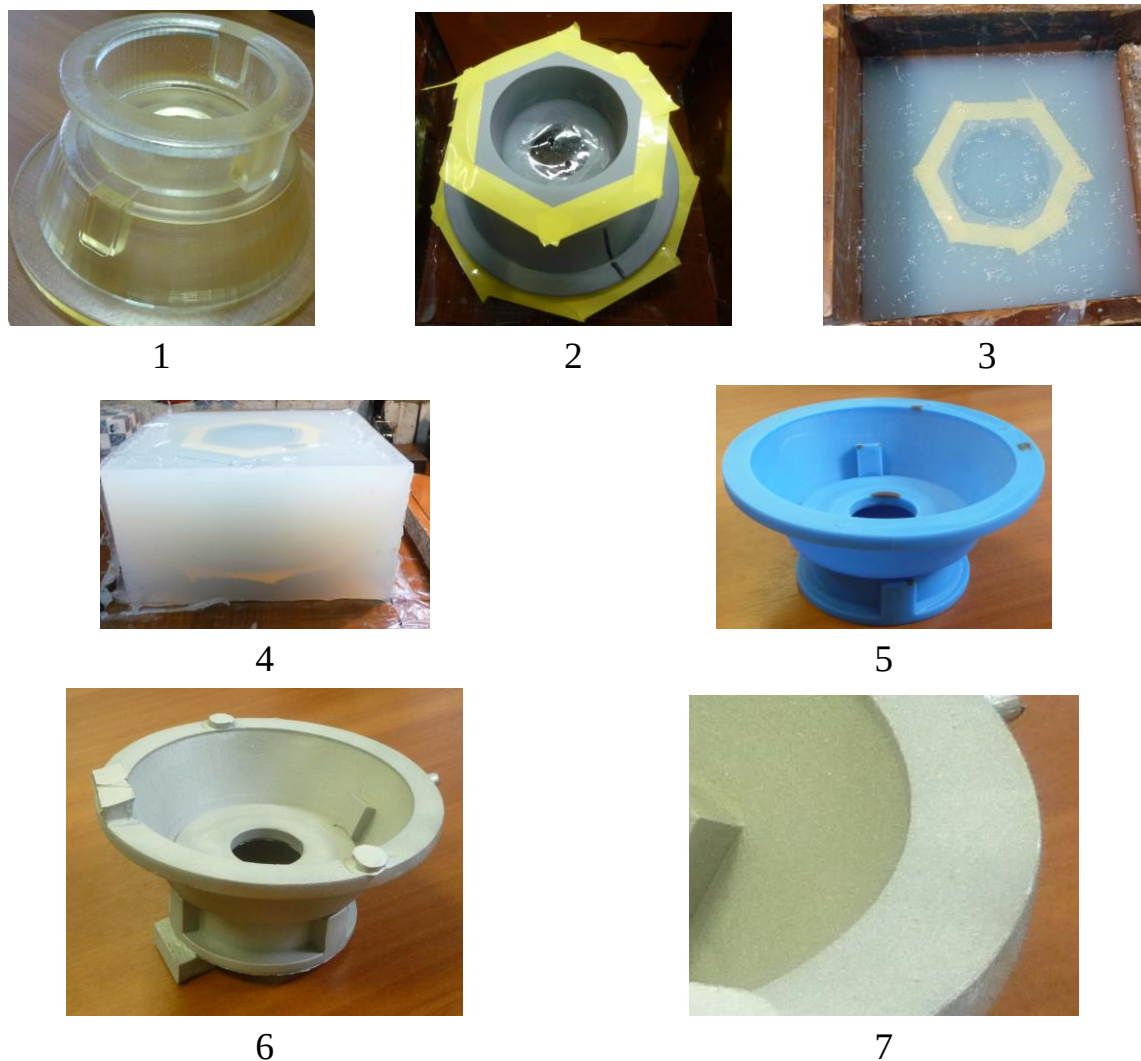


Рис. 102. Технологический процесс литья: 1 – стереолитографическая мастер-модель; 2 – мастер-модель окрашена и подготовлена к заливке силиконом; 3 – заливка силиконом; 4 – силиконовая форма; 5 – восковка, полученная заливкой воска в силиконовую форму; 6 – алюминиевая отливка; 7 –фрагмент отливки. Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Обычно стойкость формы – до 40-50 циклов, что достаточно для изготовления отливок опытной серии деталей. Эти технологии весьма эффективны для производства опытно-промышленных партий и малосерийной продукции авиационной, медицинской и приборостроительной отраслей. Широкий спектр силиконов и полиуретановых смол позволяет изготавливать отливки с ударо- и термостойкими свойствами, различной жесткости в разнообразной цветовой гамме.

Современные предприятия, изготавливающие металлические отливки по выплавляемым моделям для целей опытного и малосерийного производства, обычно имеют в составе технологического оборудования *AF-машину* для выращивания мастер-моделей и машину для вакуумного литья в силиконовые формы (рис. 103).



Рис. 103. Литейные машины *SLM Solutions*

AF-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 непосред-

ственного литья металлов (кокили, формообразующие литейной оснастки) (рис. 104, 105).



Рис. 104. Синтезированные металлические вставки для литья деталей из пластмассы. Предоставлено *3D Systems*



Рис. 105. Образцы выращенных металлических изделий.
Предоставлено *EOS*

Успешный опыт использования аддитивных технологий в литейном производстве описан в работах Дорошенко В.А. (ОАО «НИАТ») [64], Поклада В.А. с соавторами (ФГУП «ММП «Салют») [101], Белова В.Д. с соавторами [53] (НИТУ «МИСиС»), Колгытина А.В. с соавторами [80] (НИТУ «МИСиС»), Бобцовой С.В. [54], Турищева В. (CSoft, Воронеж) [122] и др.

ГЛАВА 7. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

В 90-х гг. XX в. «в Европе и США были изобретены технологии послойного лазерного сплавления порошков, открывшие новые горизонты в порошковой металлургии» [125, с. 53]. Технологию послойного лазерного спекания называют «технологией 5-го промышленного уровня» [125, с. 54]. Среди основных преимуществ данной технологии выделяют то, что «послойное сплавление позволяет в автоматизированном режиме фактически строить трехмерные изделия по компьютерной модели; сокращается время и затраты на получение изделия, т.к. исключаются промежуточные стадии изготовления оснастки и пресс-форм; отсутствуют дефекты литья, и снижается трудоемкость финишной механической обработки» [125].

В настоящее время технология *Direct Metal Fabrication – DMF* является динамичным направлением аддитивных технологий. В развитых индустриальных странах ведутся исследовательские работы по изучению технологических процессов послойного синтеза металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композиций. Основные направления этих исследований:

- прочность и пластичность синтезированных деталей;
- минимизация пористости;
- создание пористых материалов;
- методы пост-обработки (HIP, термообработка);
- оптимизация химсостава и поиск новых композиций;
- методы получения градиентных материалов (с использованием двух и более видов порошковых металлов);
- создание новых высокопроизводительных лазерных систем для спекания и сплавления металлопорошковых композиций.

Для широкого промышленного применения аддитивных технологий в современном машиностроении существуют определенные

ограничения, связанные как с отсутствием должной востребованности в отечественном производстве, так и с применением различных материалов, обладающих необходимыми физико-механическими свойствами.

7.1. Материалы для «металлических» АМ-машин

Порошки – сыпучие материалы с характерным размером частиц до 1,0 мм – условно 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* – $d = 250-1000$ мкм [100].

В настоящее время не существует общих требований к металл-порошковым композициям, применяемым в АМ-технологиях. Разные компании-производители АМ-машин рекомендуют работу с определенным перечнем материалов, обычно поставляемых компанией-производителем.

В разных машинах используются порошки различного фракционного состава. Одним из параметров, характеризующих порошок, является *средний диаметр частиц* – d_{50} . Например, $d_{50} = 40$ мкм означает, что 50% частиц порошка имеют размер частиц меньше или равный 40 мкм. Так, например, в машинах *Phenix Systems* используется порошок с $d_{50}=10$ мкм; для машин *Conzept Laser* дисперсность порошка лежит в пределах 25-52 мкм при $d_{50}=26,9$ мкм; для *Arcam* размер частиц составляет 45-100 мкм, для машин *SLM Solutions* – $d_{50}=10-30$ и т.д.

Существенным недостатком в производстве порошков является то, что *отсутствуют стандарты на материалы для АМ-технологий, и методы оценки свойств материалов*, полученных традиционными технологиями, *не могут быть применены к аддитивным технологиям*

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

За рубежом вопросы стандартизации по материалам для аддитивных технологий находятся в компетенции таких организаций, как *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 стандарт *ASTM F2924* на материал *Ti-6Al-4V* для применения в технологиях *Powder Bed Fusion*.

В процессе лазерного синтеза, например, по технологии *SLM*, 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 «отработавшего» порошка со свежим порошком. Поскольку пропорции смешения устанавливает каждая компания, то идентичность образцов, построенных на одной машине и из одного и того же порошка, не гарантирована.

Общим требованием к порошкам для *АМ*-машин является *сферическая форма частиц*. Сферическая форма обеспечивает более компактную укладку частиц в определенный объем, а также «текучесть» порошковой композиции с минимальным сопротивлением в системах подачи материала.

Машины, работающие с пиротформными материалами, такими как алюминий и титан, должны быть оснащены противопожарной системой и системой предупреждения о возгорании. При работе с мелкодисперсными порошками (особенно при $d_{50} < 10$) необходимо соблюдать правила техники безопасности. Это связано с тем, что чем меньше величина d_{50} , тем меньше может быть задан шаг построения,

более рельефно могут быть проработаны мелкие элементы детали и более гладкую поверхность можно получить у построенной детали. В процессе построения в зону пятна лазера 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 повышенной шероховатости детали и микропористости.

Для предотвращения попадания вылетающих из зоны расплава частиц на сплавленные участки поверхности строящегося слоя, внутри рабочей камеры создают направленный «ветер», сдувающий вылетевшие частицы в сторону. Это также может привести к слишком интенсивному выносу строительного материала из зоны построения. В силу этого при работе с мелкодисперсными порошками с $d_{50} < 10$ применяют маломощные лазеры, следовательно, малопроизводительные. Такие порошки (с соответствующими настройками машины) применяют в основном для изготовления микродеталей, которые иным способом изготовить невозможно. В связи с повышенной склонностью мелкодисперсных порошков к комкованию требуются особые условия хранения материалов и эксплуатации АМ-машин.

Проблема получения порошковых материалов актуальна не только для развития АМ-технологий, но и для целей классической порошковой металлургии. Металлопорошковые композиции находят применение в таких высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетика, военная и космическая техника, судостроение, приборостроение (табл. 5). В последние годы отмечается значительный интерес к объемным наноматериалам, это обусловлено тем, что их конструкционные и функциональные свойства значительно отличаются от свойств крупнозернистых аналогов, в связи с чем нанопо-

рошковые материалы могут быть эффективно использованы для целей аддитивных технологий.

Таблица 5

Области применения порошковых материалов

Компоненты порошка	Применение
Al-Ni-Co, Fe-Nd-B	Производство магнитов, магниты
Алюминиевая бронза	Судовые винты
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, 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
Ag-Cu (72/28)	Паты для пайки
Нержавеющая сталь 304/316	МIM-технология
Сталь Т42	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 – порошка – 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, получаемых механическими методами путем 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 [100]. *Распыление (атомизацию)* широко применяют 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:

- газовая атомизация;
- вакуумная атомизация;
- центробежная атомизация.

Газовая атомизация. Согласно этой 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 (рис. 106). Для получения мелких порошков ($d = 10-40$ мкм), наиболее часто применяемых в аддитивных технологиях, используют так называемые *VIM-атомайзеры* (*Vacuum Induction Melting*), в которых плавильную камеру для минимизации контакта расплава с кислородом и азотом вакуумируют.

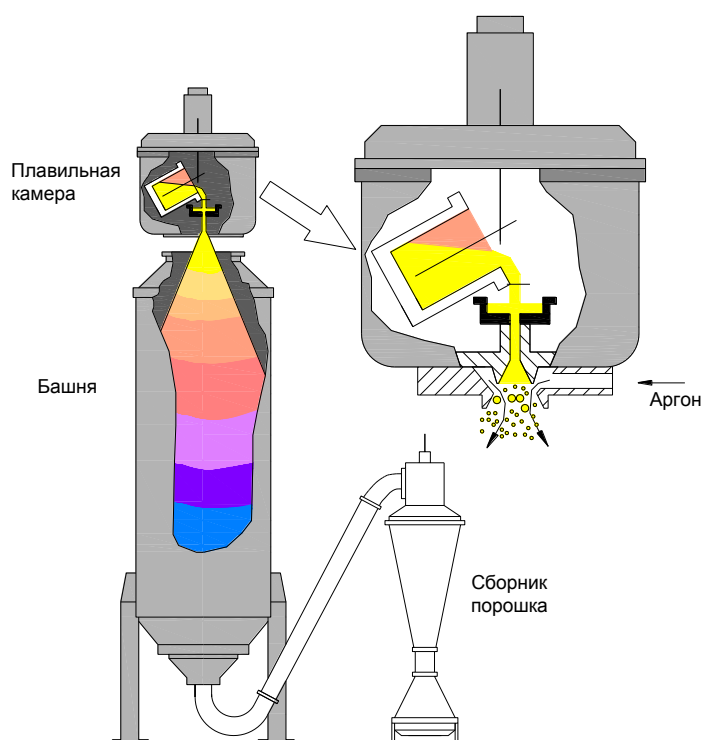


Рис. 106. Схема атомайзера VIGA

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 путем индукционного нагрева». 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°С. 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 распыливающего 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. Этот 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.

Узел атомизации – там, где происходит собственно процесс распыливания металла, – это весьма сложное устройство, которое по конструктивным и технологическим соображениям не может быть выполнено 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 составит около 4,5 мин. Фракционный состав порошка может быть расширен путем увеличения расхода металла через сливной канал (рис. 107).

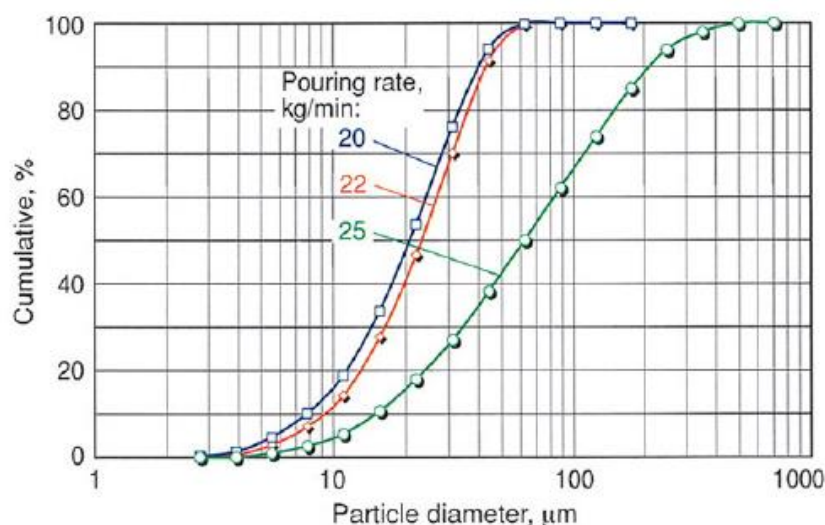


Рис. 107. Фракционный состав порошка в зависимости от расхода металла через сливной канал (20, 22 и 25 кг/мин) [21]

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.) для плазменного напыления 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.

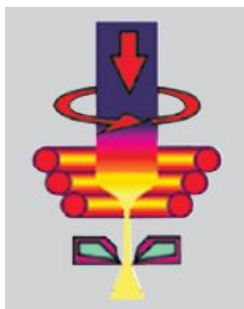
Технология EIGA (Electrode induction guide inert gas atomization – индукционная плавка электрода с распылением газом) является одним из видов газовой атомизации. Данная технология разработана для получения порошков реактивных металлов – *Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo* и т.д., поскольку плавка этих металлов 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 изложницу, т.е. он может быть использован в качестве плавильной установки.

Согласно *технологии EIGA* (рис. 108), предварительно выплавленные в форме электродов прутки (*feed stock* – сырье, исходный материал) подвергаются индукционной плавке.



a



б



в

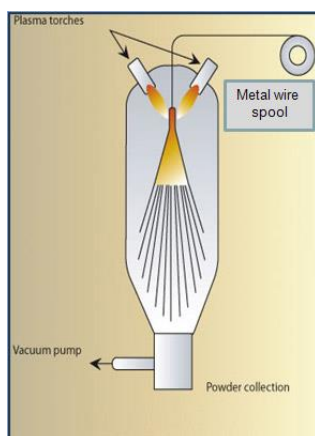
Рис. 108. Технология *EIGA*: *a* – исходный материал (*feed stock*) для получения порошка; *б* – схема процесса; *в* – процесс *EIGA*.

Предоставлено *ALD*

Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в кольцевой индуктор (рис. 109б). Капли металла попадают в систему форсунок и распыляются инертным газом. 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.

Разновидностью газовой атомизации является 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 [38]. Например, атомайзер компании *Raymor* (Канада) содержит три плазматрона – генератора потока ионизированного газа, сфокусированных в точку подвода металла в виде прутка (рис. 109) [81]. Недостаток технологии – необходимость наличия специального производства *фидстока* – прутка диаметром 1-5 мм.



а



б

Рис. 109. Технология *Plasma Atomization*: *а* – схема процесса плазменной атомизации; *б* – атомайзер *Raymor* [18]

Вакуумная атомизация. Процесс вакуумной атомизации в зарубежной литературе часто называют *soluble gas atomization* [14, 17], т.е. атомизация за счет растворенного в расплаве газа. Суть его состоит в следующем: атомайзер (рис. 110) 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.

Технологии **центробежной атомизации** весьма разнообразны [14, 17]. 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 (рис. 111). Глав-

ным достоинством технологии является полное исключение контакта расплава с тиглем и разливочными устройствами, как в технологии *VIM* или при центробежном распылении на вращающемся диске.

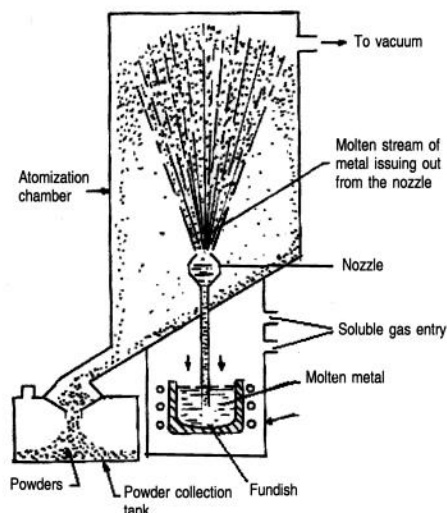


Рис. 110. Схема процесса *soluble gas atomization* [14]

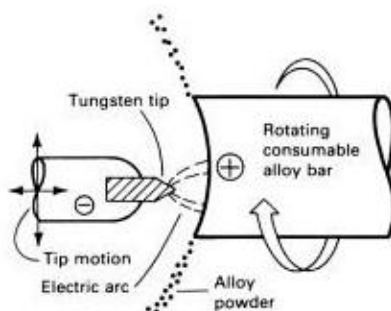


Рис. 111. Схема процесса *REP* [14]

Вариантом этой технологии является процесс *PREP* – *Plasma Rotating Electrode Process* [14, 17], в соответствии с которым плавление металлического прутка производят высокоскоростным потоком ионизированного инертного газа. Технологии *REP* и *PREP* применяют для получения особо чистых мелкодисперсных порошков сферической формы. Сравнение структуры порошков *Ti-6Al-4V* (рис. 112), полученных методами атомизации инертным газом и центробежной плазменной атомизацией (*PREP*) [3, 4], показало, что частицы порош-

ка, полученного методом *PREP*, отличаются правильной сферической формой и отсутствием «сателлитов» – пылевидных частиц, налипающих на более крупные в результате соударения в процессе газовой атомизации.

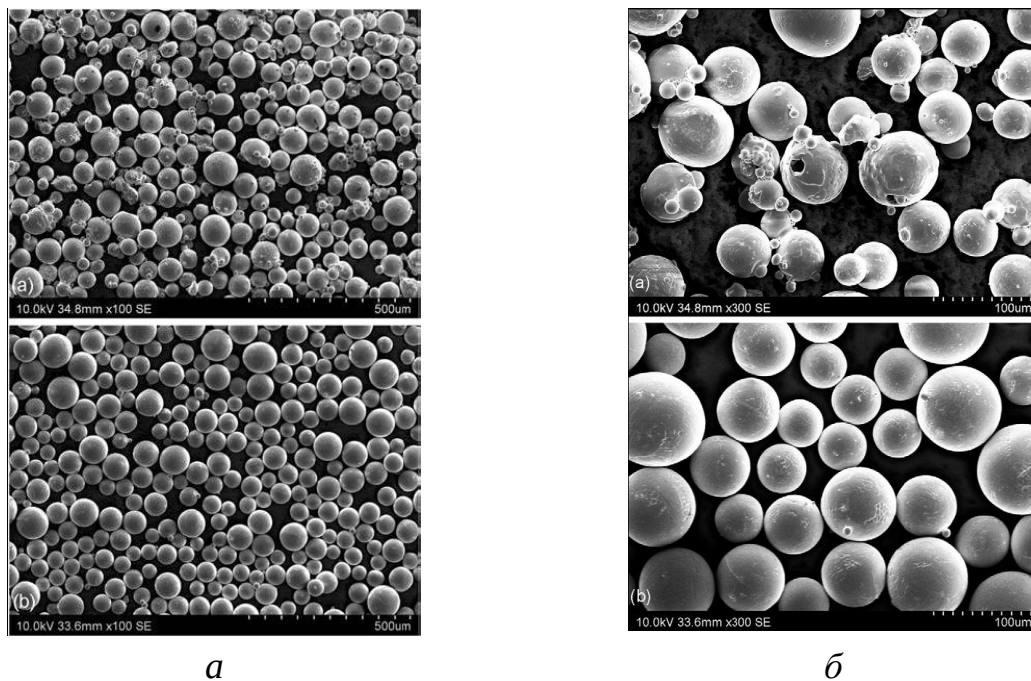


Рис. 112. Морфология порошков *Ti-6Al-4V*, полученных методами:

а – атомизации инертным газом,
б – центробежной плазменной атомизации (*PREP*) [3, 4]

Определенный интерес представляет разновидность газовой атомизации с использованием *энергии плазмы*. Эта технология предназначена для изменения морфологии порошков, полученных не методами диспергирования расплава, либо «исправления» геометрии некондиционных порошков. Суть процесса (рис. 113 [9]) состоит в том, что исходный «*неправильный*» порошок дообрабатывают в струе плазмы, в результате чего частицы порошка приобретают правильную сферическую форму (рис. 114).

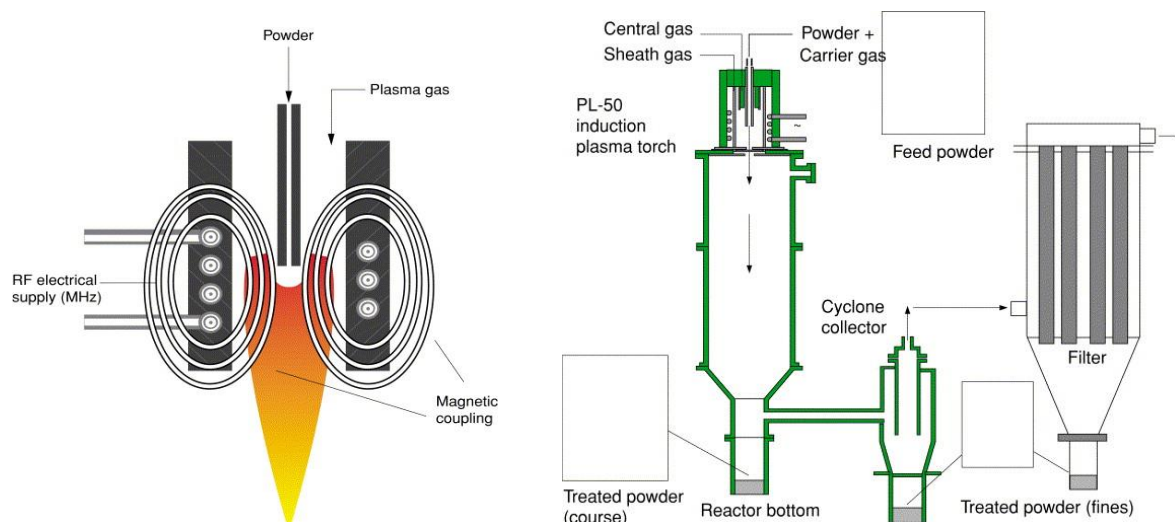


Рис. 113. Схема процесса плазменной обработки порошка.
Стрелки *Powder* и *Plasma gas* – направление подачи исходного порошка и газа, ионизируемого в плазматроне [9]

Технология *Spray forming*

Существует ряд новых технологий, находящихся на стыке разных традиционных технологий. Это, в частности, так называемая технология *Spray forming*, объединяющая в себя процессы литья (плавка металла) и распыления металла (порошковая металлургия). В конечном итоге получается заготовка, полученная послойным синтезом, что и «роднит» технологию *spray forming* с *AF*-технологиями.

Технология *Spray forming* 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 используемых для производства суперпроводников (*CuSn*), высокопрочных

инструментов (CuMnNi, CuAlFe) для нефтедобывающей и горнорудной промышленности.

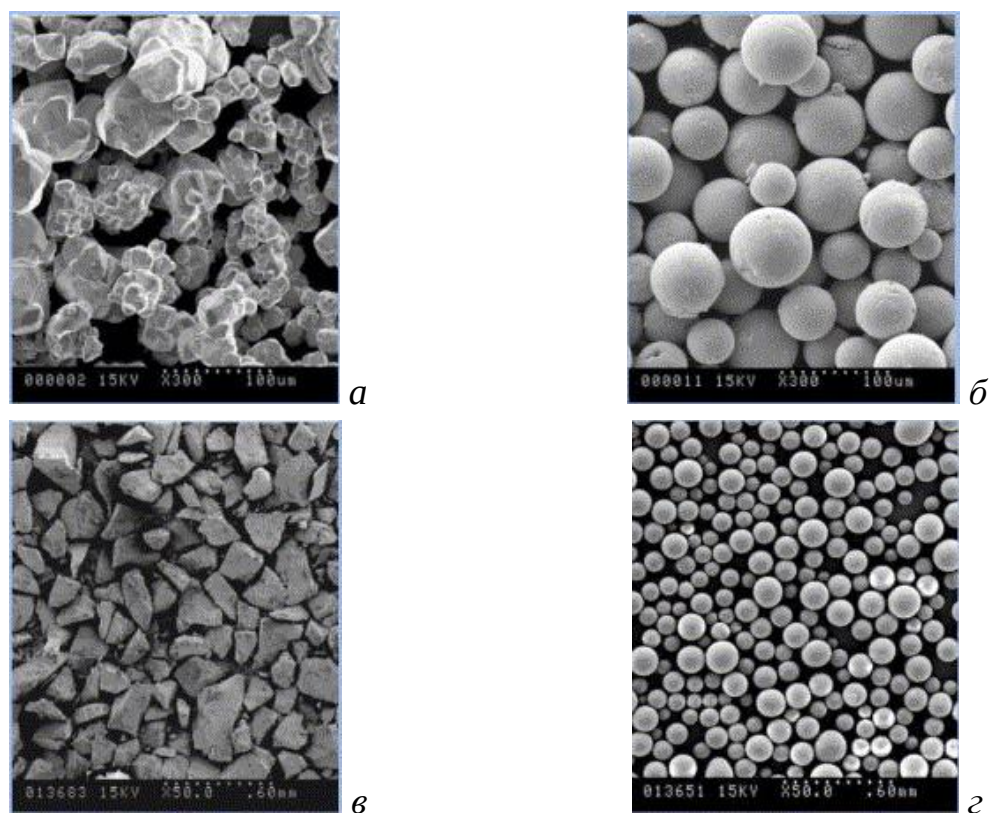


Рис. 114. Сравнение морфологии исходного порошка и порошка, прошедшего плазменную обработку [9]: *а* – вольфрам до обработки; *б* – вольфрам после обработки $d_{50} = 50$ мкм; *в* – SiO₂ до обработки; *г* – SiO₂ после обработки

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 расплавляется в плазменной камере, затем специальным соплом распыляется потоком инертного газа, частички металла размером 10-100 мкм осаждаются на подложку, формируя массив болванки (рис. 115).

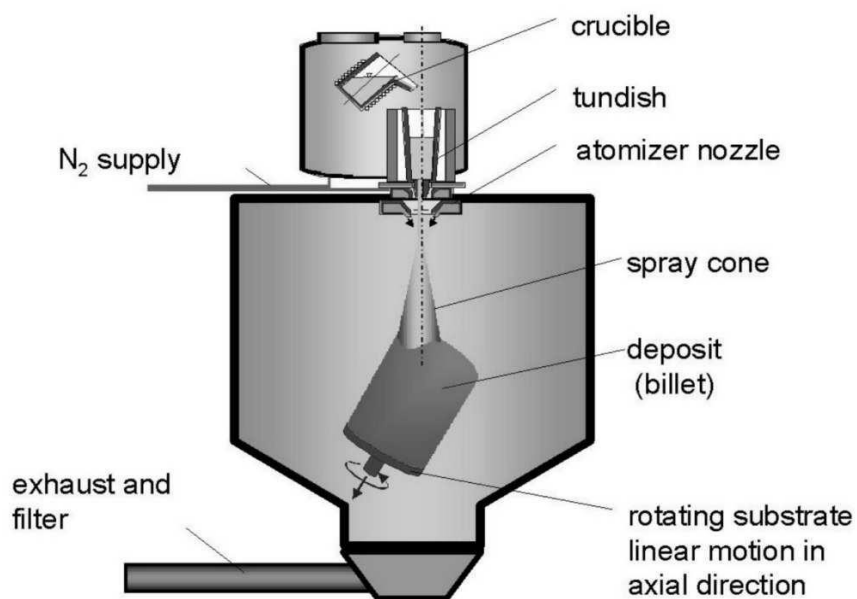
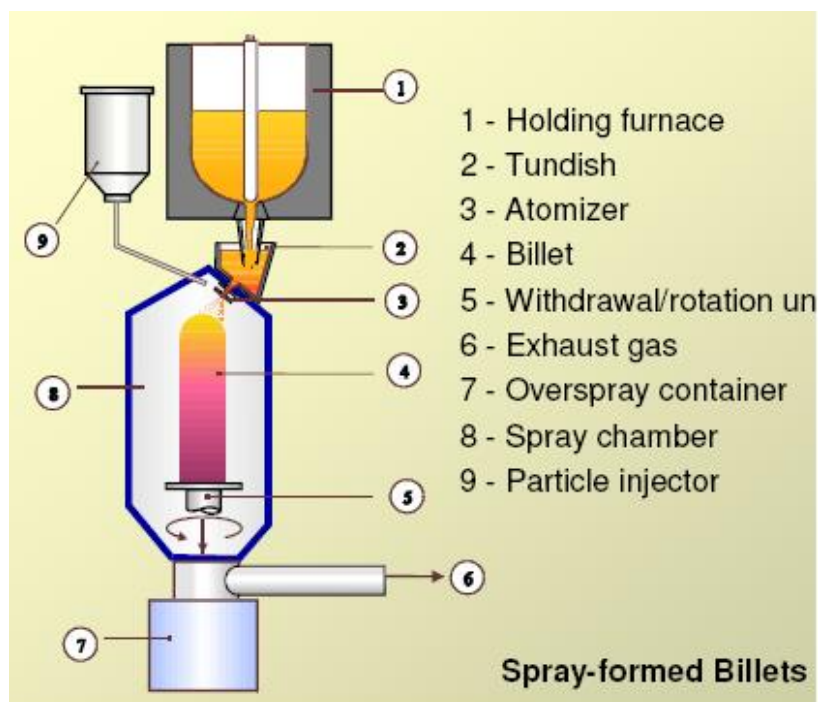


Рис. 115. Схема технологии *Spray forming*: 1 – тигель, 2 – сливное устройство; 3 – подвод газа, 4 – выращиваемая болванка, 5 – вращающаяся подложка; 6 – отвод газа; 7 – бункер для порошка; 9 – (опция) бункер для подшихтовки дополнительного материала

В отличие от литой заготовки, полученной заливкой металла в изложницу, заготовка, изготовленная методом *spray forming*, имеет

высокую однородность микро- и макроструктуры материала (рис. 116).

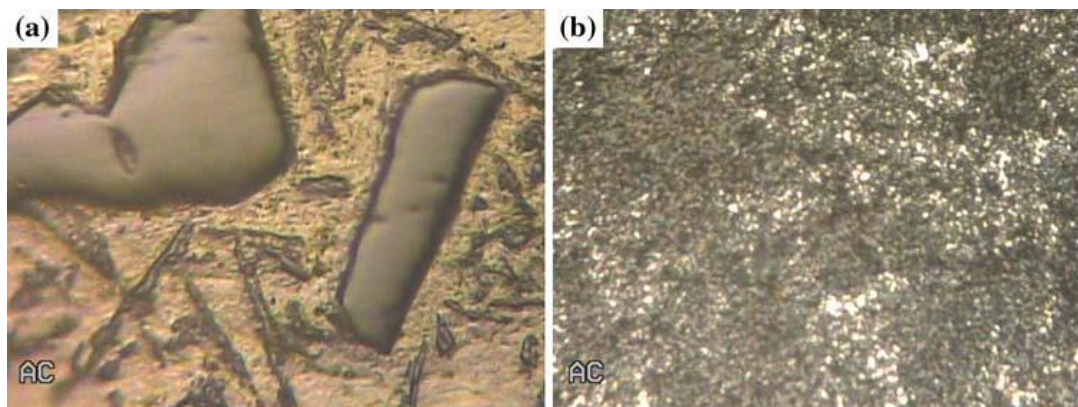


Рис. 116. Микроструктура сплава Al-15% Si: а – отливка, б – spray forming (x400)

Равномерность распределения ингредиентов по массиву заготовки и равномерность микроструктуры (рис. 117) являются главными преимуществами данной 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.

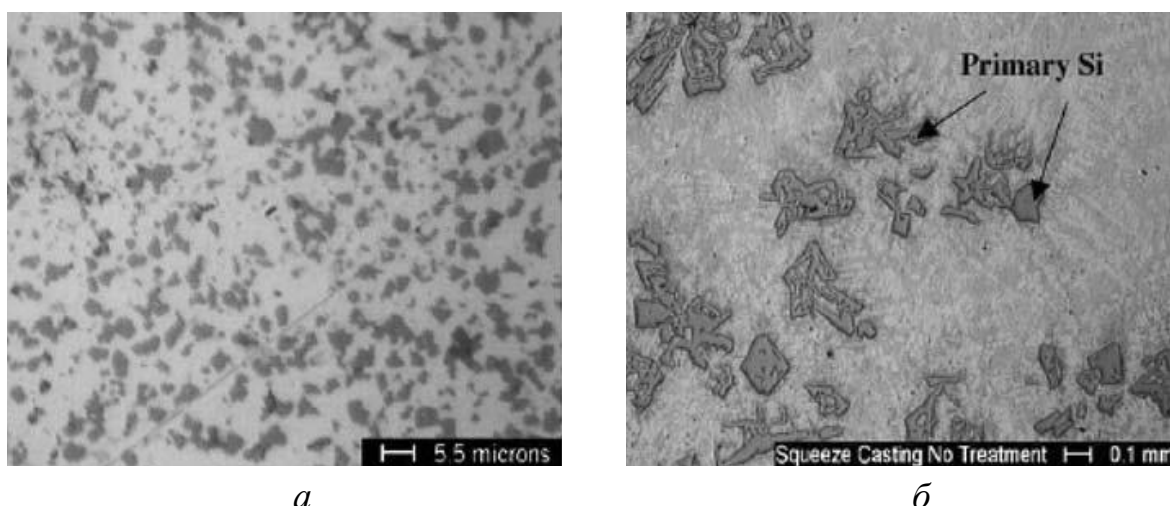


Рис. 117. Распределение Si в образце сплава Al-25% Si-0,89% Cu-1% Ni-0,84% Mg: а – spray forming; б – отливка + ковка

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 друг с другом при кристаллизации. Пористость металла устраняют горячим изостатическим прессованием (HIP) (рис. 118, 119) и последующей обработкой давлением – прокаткой или ковкой.

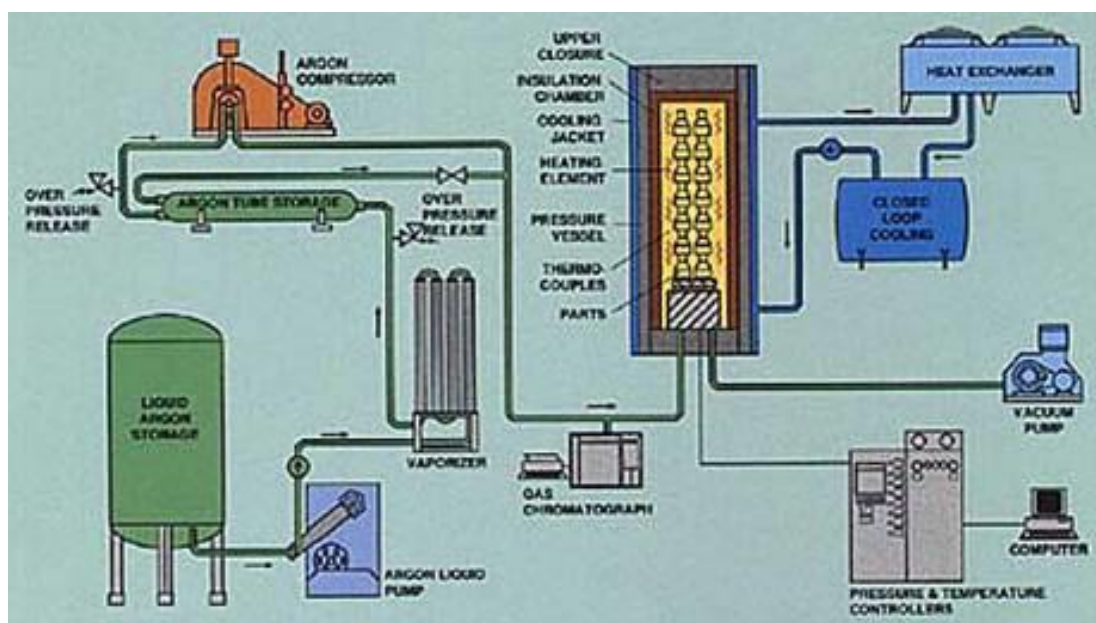


Рис. 118. Схема процесса горячего изостатического прессования

Платформа с подложкой, на которой «выращивается» заготовка, может совершать возвратно-поступательное движение – тогда получается заготовка в виде ленты (рис. 120а), или вращательное движение относительно оси потока распыляемого металла – для получения цилиндрической заготовки в виде болванки (рис. 120б, 121). Вращательное движение относительно оси, перпендикулярной оси потока, позволяет получать заготовки типа «кольцо» или «труба» (рис. 126в).



Рис. 119. Установка горячего изостатического прессования



Рис. 120. Получение заготовок разных типов (технология *spray forming*)

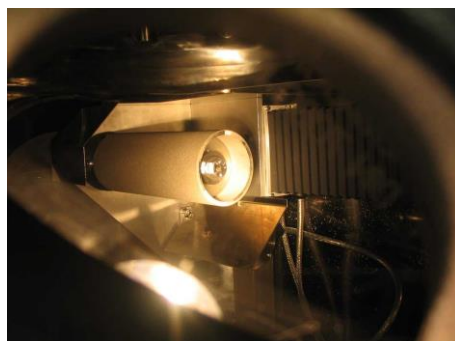
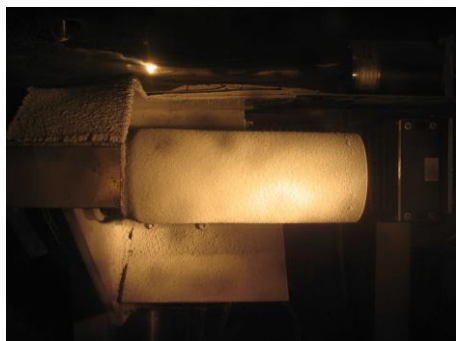


Рис. 121. Цилиндрическая заготовка, полученная методом *Spray forming*

Технология *spray forming* открывает широкие возможности для создания так называемых *градиентных материалов* (с *переменными по сечению физико-химическими свойствами*), которые могут быть получены путем послойного нанесения различных материалов через два (или более) распылительных сопла. В связи с развитием и повышением технического уровня прототипирующих машин может представлять интерес практическое применение технологии *Spray forming* для получения изделий путем напыления металла на керамическую модель (*реплику*). Суть технологии в следующем (рис. 122): по CAD-модели на прототипирующей машине, например *SLA*-установке, выращивается *стереолитографическая мастер-модель*, по которой изготавливается *силиконовая* или *RIM-форма*.

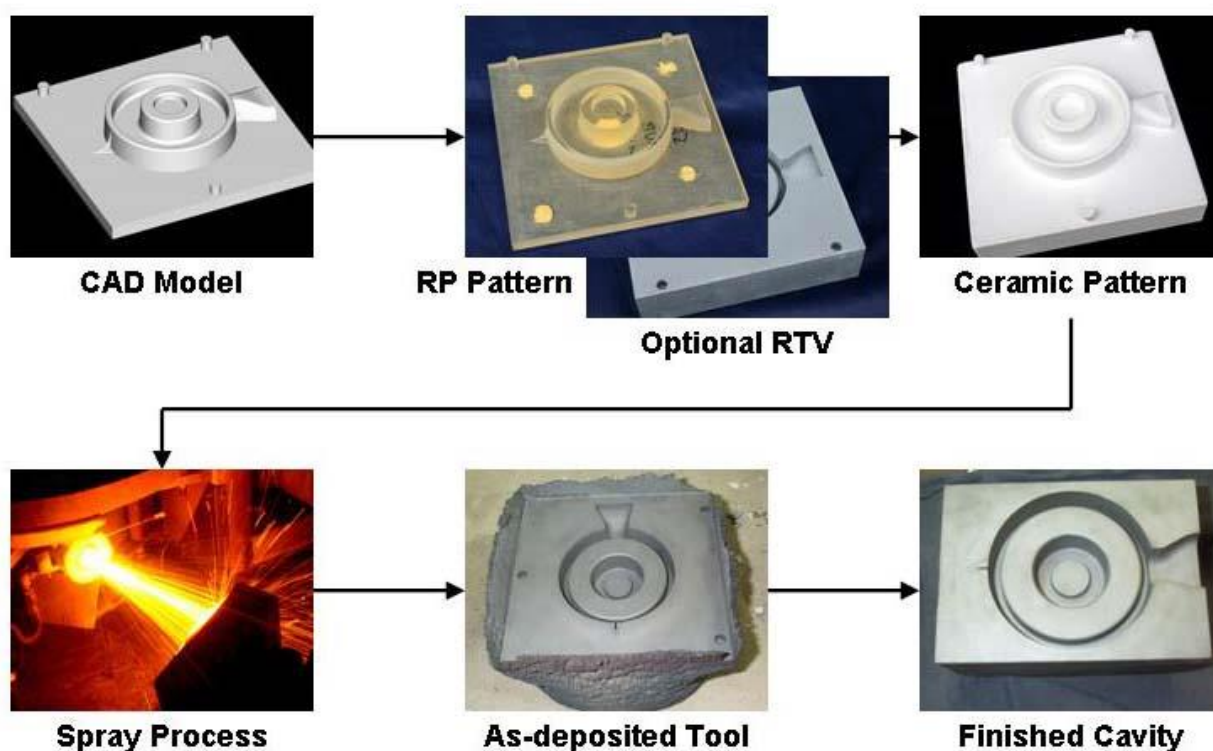


Рис. 122. Процесс получения изделий напылением металла на керамическую модель

В форму заливают жидкую керамику и получают керамическую модель-реплику. Керамическую модель устанавливают в *Spray form-*

ing-машину и послойно напыляют на нее расплавленный металл. Таким образом, получают «слепок» с керамической реплики. После механической обработки (удаления облоя и обработки в размер по посадочным поверхностям) получают конечное изделие. Эта технология представляет наибольший интерес для получения пресс-форм и технологической оснастки.

Компания *RSP Tooling* (*RSP – Rapid Solidification Process, США*) стала разработчиком нового способа изготовления инструментальной оснастки с использованием технологии *Spray forming*. Сочетание плавильной машины и атомайзера (устройства для распыливания) представляет собой машина *RSP* (рис. 123).



Рис. 123. *RSP-машина* компании *RSP Tooling*

Металл (это могут быть и различные сплавы) плавится в тигле в инертной атмосфере и под давлением направляется к распылительному соплу, где посредством струи азота происходит мелкодисперсное дробление жидкого металла и быстрое отверждение частиц (рис. 124). 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 «слепок». 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 «слепок», и производятся стандартные технологические операции – механо- и термообработка.

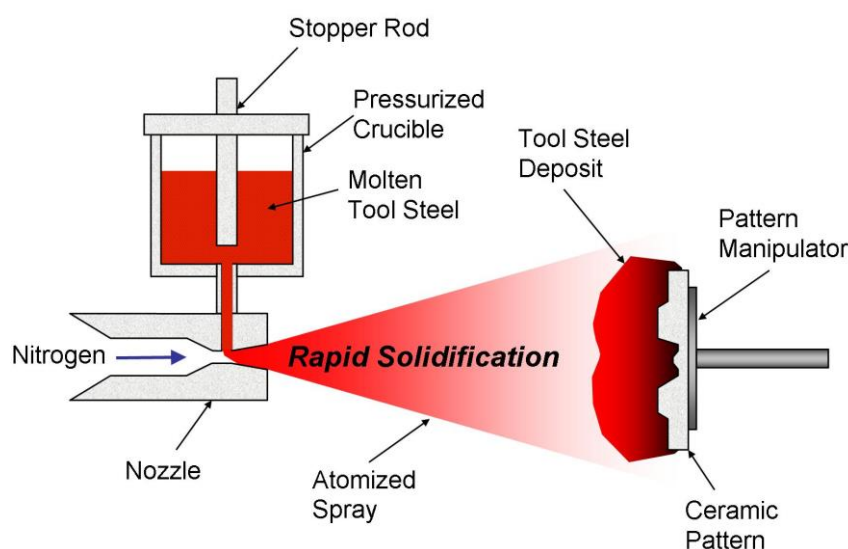


Рис. 124. Схема работы *RSP-машины*

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

Одним из преимуществ данной технологии является 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 (рис. 125). Данная технология пока не находит коммерческого применения, но представляет несомненный интерес.

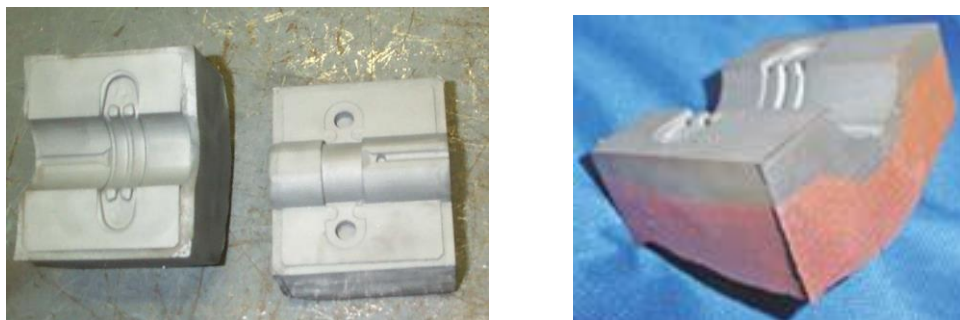


Рис. 125. Биметаллические композиции

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 кованый алюминий.

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 г/см³ и с удельной жесткостью на 30% выше, чем у обычных алюминиевых сплавов. Были также получены сплавы *Al-Cu-Mg-X* с улучшенными по сравнению с литейными сплавами прочностными свойствами и характеристиками износа при повышенных температурах.

Достоинством данной технологии является возможность создания новых материалов с уникальными свойствами, а также разнообразных покрытий. Получены композиционные материалы (*ММС, met-*
138

al 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, использующихся в телекоммуникационных системах, аэрокосмической и оборонной промышленности. Примеры деталей авиадвигателя, полученные с использованием технологии «*Spray forming*», показаны на рис. 126.



Рис. 126. Детали авиадвигателя, полученные по технологии «*Spray forming*»

Европейскими лидерами в освоении технологий «*spray forming*» являются компания *Sandvik Osprey* (Великобритания), которая также занимает передовые позиции по выпуску порошковых металлов и оборудования для их производства (рис. 127), и немецкая фирма *ALD*, специализирующаяся на выпуске литейного оборудования, вакуум-

ных печей и технологического оборудования для термообработки и порошковой металлургии.



Рис. 127. 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 использованию 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 Insti-*
140

tute (Кумаи), 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 (рис. 128) 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 температурах). «Наноструктурность» материала получают за счет деформации сдвигом.

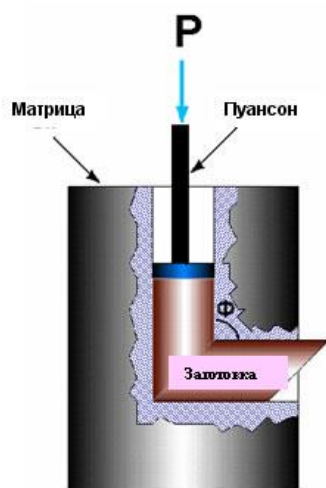


Рис. 128. Схема процесса РКУП

Наноструктурные материалы, вследствие очень малого размера зерен, содержат в структуре большое количество границ зерен, ко-

торые играют определяющую роль 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. Этот метод позволяет создавать уникальные сплавы с равномерным включением в объемную структуру наночастиц различных материалов – металлов, включая редкоземельные, оксидов и пр.

В последние годы все большее внимание уделяется исследованию порошковых наноматериалов, имеющих уникальные физикомеханические свойства, значительно отличающиеся от свойств обычных крупнозернистых материалов.

Улучшение качественных показателей деталей, получаемых методами порошковой металлургии, литья, обработки давлением и других, может быть достигнуто введением в исходные материалы наноразмерных добавок. В работе [83] приводятся сведения о том, что «наноструктуризация поверхностей деталей подшипников повышает их долговечность в 2-3 раза (с 150-200 до 500-600 млн циклов), долговечность инструмента возрастает в 5-6 раз», применение «объемных наноматериалов на металлической основе делает возможным инновационное перевооружение промышленности», ресурс изделий различ-

ного назначения, изготовленных» по нанотехнологии, «может увеличиться от 200 до 500%».

Именно поэтому порошковые наноструктурированные материалы представляются наиболее перспективными для целей аддитивных технологий.

7.3. Методы получения нанокристаллических материалов

Перспективность применения наноматериалов определяется не только их свойствами, но и эффективностью и экономичностью их получения.

Для получения наноматериалов конструкционного назначения используют методы, которые условно разделяют на четыре группы (табл. 6):

- порошковая металлургия (компактирование нанопорошков);
- кристаллизация из аморфного состояния;
- интенсивная пластическая деформация;
- различные методы нанесения наноструктурных покрытий.

Размер зерен, морфология и текстура меняются в зависимости от технологических параметров процесса получения наноматериалов (рис. 129). С уменьшением размера зерен объемная доля границ раздела (границ зерен и тройных стыков) значительно возрастает, объемная доля тройных стыков заметно увеличивается при размерах зерен менее 10 нм. Особенности структуры нанокристаллических материалов (размер зерен, доля границ раздела, пористость и др.), определяемые методами получения, оказывают существенное влияние на их свойства. С уменьшением размера зерна *повышается прочность при сохранении пластичности*, проявляется *эффект низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности*.

Таблица 6

**Методы получения нанокристаллических материалов
конструкционного назначения**

Метод	Способы	Получаемые материалы
Компактирование нанопорошков	Прессование и спекание. Спекание под давлением.	Металлические материалы, керамика, керметы, композиты, полимеры
Кристаллизация аморфных сплавов	Кристаллизация аморфных сплавов. Консолидация аморфных порошков с последующей кристаллизацией.	Аморфизирующиеся металлические материалы
Интенсивная пластическая деформация	Равноканальное угловое прессование. Деформация кручением при высоких давлениях. Всесторонняя ковка.	Металлические материалы
Методы нанесения наноструктурных покрытий	Электролитическое осаждение, химическое и физическое осаждение из газовой фазы и др.	Металлические материалы, керамика, композиты

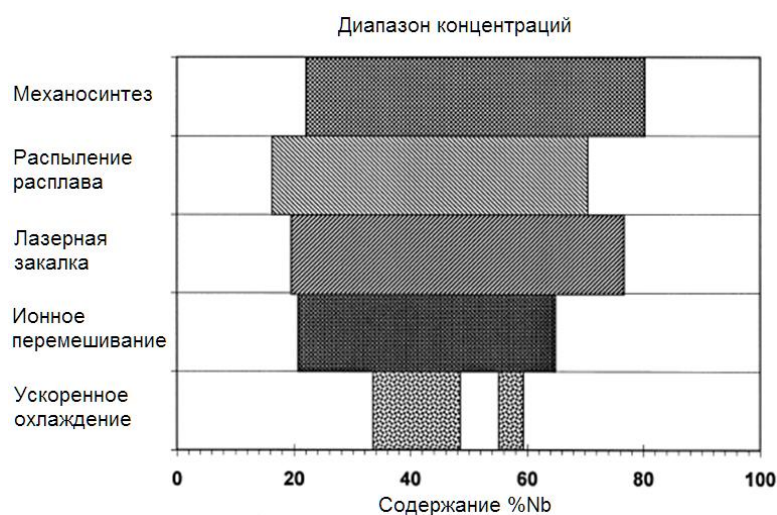


Рис. 129. Диапазон образования нанокристаллической структуры в сплаве системы Ni-Nb, полученном различными способами

Для получения нанопорошков и объемных наноматериалов широко применяют *методы порошковой металлургии*. Для этого используют нанопорошки с размером частиц менее 100 нм, крупнозернистые порошки с нанокристаллической структурой, полученные *методом механического легирования*, или аморфные порошки, которые подвергают контролируемой кристаллизации в процессе консолидации.

Перспективными технологиями получения порошков для АМ-машин являются *методы механохимического синтеза*, поскольку они обеспечивают возможность получения разнообразных по химическому составу порошковых материалов наноструктурных размеров.

Эффективность использования наноструктурированных порошков для целей аддитивных технологий может быть обеспечена пониманием сущности и возможностей методов механохимического синтеза. В данном разделе дано современное представление о механохимическом синтезе металлических соединений, приведены результаты исследований, свидетельствующие о возможности получения металлических порошков, имеющих нанокристаллическую структуру и уникальные физико-механические и эксплуатационные свойства, которые позволят снизить расход металла за счет облегчения массы изделий, а также повысить надежность и срок службы изделий.

Методы механохимического синтеза. *Механосинтез* (рис. 130, 131) как метод высокоэнергетического механического воздействия на твёрдое тело с целью получения нанопорошков разделяют на две основные категории: *механический размол* (*mechanical milling, ball milling*) и *механическое сплавление* (*mechanical alloying*) [18].

Механический размол используется как для измельчения исходного материала, так и для перевода его в аморфное состояние. *Механическое сплавление* обеспечивает измельчение, перемешивание, массоперенос и химическое взаимодействие порошков нескольких чистых элементов, соединений или сплавов. С помощью механического

сплавления можно получать вещества как в кристаллическом, так и в аморфном состояниях.

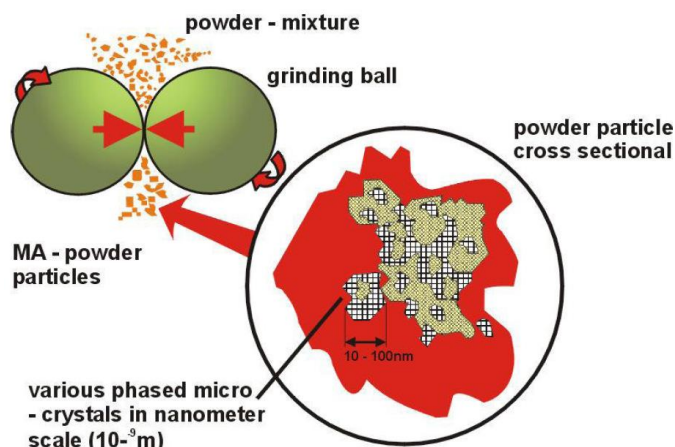


Рис. 130. Схема процесса механосинтеза

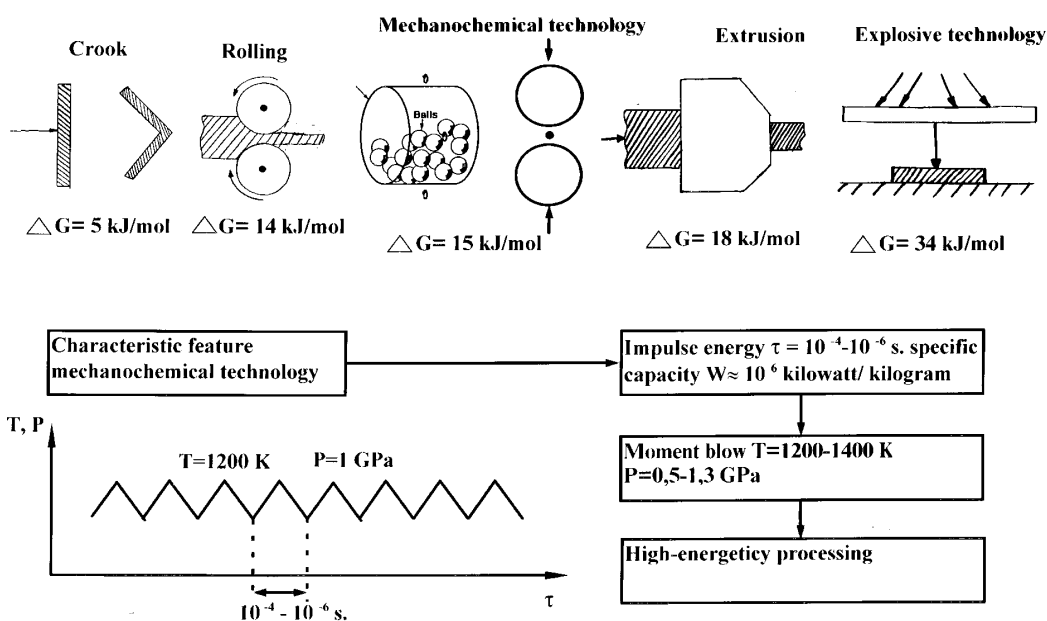


Рис. 131. Особенности механохимической технологии

Современные представления о механохимическом синтезе металлических соединений. По оценке некоторых авторов, механохимические методы обработки материалов по своей *энергонапряженности* сопоставимы с электронно-лучевой обработкой, а по воздействию на фазовые превращения – с ударно-

волновой. Отличительной особенностью механохимических процессов являются высокая доза энергии, подводимой к обрабатываемому материалу за короткий промежуток времени.

С помощью данной технологии можно получать *тугоплавкие соединения*, которые являются основой для получения современных конструкционных и инструментальных материалов и покрытий. Современное представление о механохимическом синтезе данных соединений базируется на работах Р.Р. Gilman и J.S. Benjamin [18], К.И. Портного и Б.Н. Бабича [110], С.С. Koch [25], П.Ю. Бутягина [58], В.В. Болдырева [55], Е.Ю. Иванова [75], Е.Г. Аввакумова [46], В.В. Неверова, В.Н. Бурова [99] и др.

Известно, что при обработке металлических порошков в высокоэнергонапряженных мельницах создаются условия, аналогичные обработке металлов на *наковальнях Бриджмена* [57]. Металл приобретает свойство «квази-жидкости», и тем самым создаются благоприятные условия для всех видов подвижности, необходимых для интенсификации диффузионных процессов. Время механического воздействия на частицу порошка при обработке в атритере между двумя актами составляет 100 мс, частота таких воздействий – примерно 10^{-1} с [123].

По данным работ [57, 60], в результате такой обработки металл приобретает энергию порядка сотен кДж/моль, что соизмеримо с энергией кристаллической решетки. В этих условиях скорости массопереноса значительно возрастают по сравнению с обычной диффузией и становятся соизмеримы со скоростями диффузии в жидкости ($10^{-4} \div 10^{-5}$ см²/с) [84]. Происходит взаимодействие на границе раздела частиц металлов, авторы работ [18, 57] рассматривают процесс механолегирования на основе стадийности процесса, заключающейся в последовательной смене стадий процессов диссипации энергии. В случае взаимодействия двух частиц *A* и *B* последовательность стадий будет иметь следующий порядок: фрагментация частиц → сварка фраг-

ментов → формоизменения сварных фрагментов с образованием равноосных частиц → сварка равноосных частиц. Критическим параметром для перехода от одной стадии к другой является *предельная плотность энергии деформации* [112].

Представленные схемы механохимического синтеза металлических соединений дают только общую картину простейших процессов взаимодействия двух тел *металл – металл* (металлическое соединение), *металл – газ* при механолегировании. В реальных условиях процессы механохимического синтеза металлических соединений протекают гораздо сложнее. В общем виде подобные процессы изложены в монографии Г. Хайнике [126].

Макрокартина описания процесса синтеза металлических соединений характерна как для «холодного», так и для «высокотемпературного» синтеза. Отличием «высокотемпературного» синтеза от «холодного» является то, что в результате «высокотемпературного» синтеза создаются благоприятные условия для самовозгорания и дальнейший процесс синтеза осуществляется за счет тепла химической реакции. Как правило, в случае «холодного» синтеза конечный продукт находится в неравновесном состоянии, а в случае «высокотемпературного» синтеза – в равновесном состоянии. Возможны также и *смешанные состояния* конечного продукта для обоих видов синтеза, но они отражают только частные варианты различных способов осуществления «холодного» и «высокотемпературного» синтезов [46, 108]. Таким образом, «холодный» синтез характерен образованием *метастабильных структур*, а «высокотемпературный» – *равновесных структур*.

Образование *метастабильных структур* может происходить как в процессе *механолегирования одного металла в другой*, так и в процессе *механоактивации металлического соединения*. Термодинамика и кинетика образования таких фаз может существенно отличаться

ся в зависимости от характера процесса и вида метастабильных структур.

Различают следующие виды метастабильных металлических соединений и материалов на их основе, полученные в результате механолегирования и механоактивации: *метастабильные твердые растворы, аморфные фазы, химические соединения, нанокмозиты (нанокристаллические материалы) и квази-кристаллы (квазикристаллические материалы).*

Впервые метастабильные твердые растворы были получены в условиях высокого давления со сдвигом в наковальнях Бриджмена [57]. В.В. Неверовым и В.Н. Буровым [99] было показано, что последовательность образования фаз при такой обработке отличается от той, которая наблюдается при термической активации. Механическое воздействие ускоряло процессы фазообразования, стимулировало образование пересыщенных твердых растворов, приводило к аморфизации структуры. Для большинства систем процесс механолегирования значительно увеличивает растворимость металла в металле. Для некоторых систем полученные значения соответствуют растворимостям при закалке из жидкого состояния.

Аморфные сплавы, полученные методом механического легирования, как правило, относятся к системам, в которых закалкой из жидкого состояния получают аморфные фазы [28, 34]. К таким системам относятся Ni–Nb, Ni–Zr, Ni–Ti, Co–Zr, Fe–Zr, Cu–Ti, Cu–Zr, Fe–Si–B, Ni–Si–B и др. Для некоторых систем наблюдаются различия в области концентраций исходных компонентов, где образуется аморфная структура. Однако, как правило, аморфные сплавы, полученные методом механического легирования, обладают более широкой концентрационной областью существования аморфной фазы, чем сплавы, полученные закалкой из жидкого состояния. Важнейшим свойством аморфных сплавов является их *термическая стабильность*, что обу-

словливается термодинамическими, кристаллографическими и электронными факторами [13, 119].

С помощью механохимического синтеза возможно получение различных химических соединений: интерметаллидов, сульфидов, фосфидов, карбидов, боридов, силицидов, нитридов и оксидов. Наибольшее количество литературных данных приходится на механохимический синтез интерметаллидов [32, 40, 75, 111]. Механохимическому синтезу нитридов посвящены работы [12, 15, 26, 29], в них рассматриваются различные стадии образования нитридов, приводится их классификация, описывается механизм образования нитридов титана, основанный на процессах трибоабсорбции азота титаном. Авторы работы [29] на примере системы Ti–Al–N показали *роль азота* при образовании нанокпозиционных материалов. Во всех работах образование нитридов происходило только при длительном размоле, характер рефлексов от данных соединений на рентгенограмме соответствовал неравновесному состоянию. Образование нитридов происходило чрезвычайно медленно, их состав, как правило, соответствовал низшим нитридам.

Исследованиям механохимического синтеза карбидов, боридов и силицидов посвящены работы [10, 22, 33, 35]. В работе [10] показано, что образование силицидов, боридов, карбидов протекает по одной из реакций:

- прямое образование соединения;
- образование аморфной фазы, а затем ее кристаллизация при отжиге;
- образование метастабильной наноструктуры с последующим ее переходом в равновесную фазу при отжиге;
- образование дисперсной смеси двух фаз с последующим ее переходом в химическое соединение при отжиге.

В работе [24] исследован процесс *механолегирования углеродом* многокомпонентных систем на базе титана (Ti–Mo–Ni). В качестве

исходных компонентов использовали порошки титана, молибдена, никеля и графита. Процесс осуществляли в вибрационной мельнице. В процессе исследования установлено, что синтез карбида титана происходит после 50 часов размолла. Введение никеля ускоряет этот процесс. Атмосфера механоактивации оказывает влияние только на размер частиц карбида титана после спекания [37].

Судя по имеющимся литературным данным [10, 22, 24, 33, 35, 37, 41], в системах металл – неметалл при механолегировании могут образовываться химические соединения. При этом процесс образования данных соединений может иметь различные схемы: прямой синтез, синтез при последующем отжиге, синтез через образование промежуточных неравновесных фаз. Как правило, образование подобных соединений происходит только после длительной механоактивации. Образующиеся при этом соединения чрезвычайно мелкодисперсные (100-200 Å) и неравновесные.

Механохимический синтез равновесных металлических соединений. В настоящее время особый интерес представляют исследования высокотемпературного синтеза тугоплавких соединений для разработки принципиально новой технологии получения тугоплавких соединений и сплавов на их основе и использования полученных порошковых материалов для целей аддитивных технологий.

Первые сведения о взрывном механохимическом синтезе металла с неметаллом были опубликованы в работах [39, 104, 109]. В дальнейшем данные исследования получили свое развитие в работах [26, 71, 132]. В работах [59, 104, 105] были даны первые предпосылки, объясняющие механизм взрывного механохимического синтеза тугоплавких соединений. В основу механизма запуска реакции с образованием тугоплавкого соединения была заложена *теория теплового самовоспламенения*. Авторы работы [103] исходили из следующих соображений:

реакции взаимодействия металла с неметаллами являются экзотермическими реакциями;

для большинства экзотермических реакций существуют критические параметры (температура, давление, скорость нагрева), при которых реакция переходит в режим самовоспламенения и теплового взрыва;

в высокоэнергетических мельницах большая часть работы, совершаемая против сил трения, освобождалась в виде тепла. По данным работ [123, 127], в таких аппаратах в локальных областях могут возникать температуры до 1030°C.

Таким образом, общий подход к изучению механизма взрывного механохимического синтеза основывался на *теории теплового самовоспламенения*. Роль механоактивации состояла в достижении определенных критических параметров, после которых реакция осуществлялась самопроизвольно за счет выделения тепла химической реакции [103].

Первоначально тепловая теория горения и взрыва была разработана для газообразных веществ. Я.Г. Вант-Гоффом [62] была впервые раскрыта физическая сущность данного явления. Им было установлено, что самовоспламенение есть результат предпламенной реакции, которая в случае, если она выделяет достаточно много тепла, приводит к бурному росту температуры и скорости реакции. В работах Д.А. Франк-Каменецкого, Я.В. Зельдовича и Н.Н. Семенова [73, 113] была дана количественная трактовка этого явления для ряда простейших случаев теплопередачи. В дальнейшем в связи с открытием явления *самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС)* [95] теория теплового самовоспламенения получила свое новое развитие для конденсированных систем.

В настоящее время в работах *по теории СВС* рассмотрены различные *режимы горения* (объемное, послойное, стационарное, автоколебательное и др.), *агрегатное состояние реагентов* [92], влияние

различных факторов (торможение реакции продуктами, плотность прессовки и др.) [94], исследованы *простые* и *стадийные реакции* [48, 91, 134] и др.

В принципиальном отношении решение проблемы самовоспламенения является общим как для СВС, так и для механохимического синтеза.

Можно рассмотреть простейший случай, когда реакция осуществляется между двумя компонентами с образованием одного соединения: $A + B \rightarrow AB$. Условно обозначим температуры плавления и температуры кипения исходных компонентов соответственно $T_{\text{пл}}^A$, $T_{\text{пл}}^B$, $T_{\text{кип}}^A$, $T_{\text{кип}}^B$, температуру горения – $T_{\text{ад}}$. В зависимости от соотношения $T_{\text{ад}}$ к $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{кип}}$ изменяется агрегатное состояние исходных компонентов, и реакция может осуществляться по различным механизмам. В общем случае возможны три принципиальных варианта протекания реакции в зависимости от агрегатного состояния исходных компонентов в зоне реакции: *твердофазный*, *безгазовый* и *газовый*.

Твердофазный механизм горения. Характерной чертой твердофазных реакций является то, что реакция проходит только в твердой фазе, без участия жидкой, скорость реакции чрезвычайно мала. В соответствии с классификацией реакций по агрегатному состоянию, *условием прохождения твердофазной реакции* является неравенство: $T_{\text{ад}} < T_{\text{пл}}^{A,B} (T_{\text{пл}}^{\text{эвт}})$, где $T_{\text{пл}}^{\text{эвт}}$ – температура плавления эвтектики. Данный механизм горения возможен в карбидах, боридах, силицидах и интерметаллидах. Чаще всего твердофазный механизм горения встречается в системах с участием тугоплавких металлов: вольфрама, тантала, молибдена и ниобия. Твердофазные реакции протекают крайне медленно даже при высоких температурах и, как правило, с сильным автоторможением. Твердофазное безгазовое горение было обнаружено в смесях порошков тугоплавких металлов (Ta, Nb, Mo) с бором и углеродом при проведении СВС [91, 92, 94, 134]. В ходе твердофаз-

ной реакции глубокого спекания смеси не происходит – частицы продукта сохраняют размер исходного металла [93]. Установлено, что твердофазное безгазовое горение очень чувствительно к изменению параметров: ухудшению контакта между частицами, увеличению размера частиц и уменьшению температуры горения [134], изменение этих параметров может привести к затуханию процесса.

Взрывной механохимический синтез карбидов, боридов и силицидов (вольфрама, тантала, молибдена, ниобия) осуществить не удалось [104]. Образование данных соединений при механоактивации исходных компонентов происходило чрезвычайно медленно. Процесс длился десятки и сотни часов. При этом, как правило, полученный продукт многофазен (в соответствии с диаграммой состояния Me – неметалл), а его структура метастабильна. Отличительной чертой подобных соединений является их *высокая дисперсность* (несколько нанометров).

Безгазовый механизм горения. Характерная черта данного механизма – независимость скорости реакции от давления и сохранение постоянной массы образца в ходе процесса. Возможны различные варианты протекания процесса в зависимости от соотношения $T_{ад}$ к температурам плавления и кипения исходных компонентов.

Рассмотрим, для примера, наиболее типичные случаи.

Случай А. Участники реакции $A + B \rightarrow AB$ реагируют в *жидкой фазе*. Условием прохождения такой реакции являются неравенства: $T_{пл}^A < T_{ад} < T_{пл}^B$, $T_{ад} < T_{пл}^{AB}$. К данному случаю относятся следующие соединения: бориды (TiB, TiB₂, ZrB₂, HfB₂, VB₂, CrB₂, NiB), силициды (Ti₅Si₃, Zr₂Si, Zr₅Si₃, ZrSi), интерметаллид NiAl и сульфид MnS. Случай А характерен тем, что в результате образования некоторых соединений выделяется тепло, достаточное не только для расплавления исходного компонента, но и для перевода его в парообразное состояние. Так, например, при горении смеси Ti + 2B температура поднимается до $T_{ад} = 2927^\circ\text{C}$. По данным работы [92], при проведении синтеза ди-

борида титана в вакууме из-за испарения титана процесс горения нарушается.

Аналогичные результаты были получены при проведении механохимического синтеза диборида титана в вакууме [107]. Образование диборида титана по взрывной кинетике не происходило. Таким образом, в случае высоких значений $T_{ад}$, когда давление одного из компонентов превосходит атмосферное давление, вакуум позволяет «гасить» взрывной механохимический синтез тугоплавкого соединения.

Случай В. Один из компонентов реакции находится в *жидком состоянии*, другой – в *твердом*. Условием прохождения данного случая является неравенство $T_{пл.}^A < T_{ад} < T_{пл.}^B$. Этот случай наиболее характерен при образовании карбидов титана, циркония, гафния и кремния. Как правило, в результате протекания реакции синтеза карбида металл плавится, а углерод находится в твердом состоянии. В случае СВС процесс взаимодействия жидкого металла с углеродом вызывает эффект капиллярного растекания, что приводит к резкому ускорению скорости горения. По данным ряда работ [134], смеси, горящие с эффектом капиллярного растекания, имеют наивысшие скорости распространения волны горения, приводящие в некоторых случаях к тепловому взрыву.

Взрывной механохимический синтез установлен для карбидов титана и циркония [75, 132]. При этом, как показали расчетные и экспериментальные результаты, в момент взрывного механохимического синтеза действительно развивается температура, достаточная для расплавления титана [103, 106]. Таким образом, как и в случае *А*, в данном случае наблюдается соответствие между экспериментальными результатами по СВС синтезу тугоплавких соединений и взрывному механохимическому синтезу.

Газовый механизм горения. Характерная черта данного механизма горения – зависимость скорости горения от давления и изменения массы реагентов в ходе процесса.

Возможны два принципиальных варианта протекания процесса.

Случай А. $T_{\text{кип}}^A < T_{\text{ад}} < T_{\text{кип}}^B$. Такой режим возможен в системах Ме – газ (N_2 , H_2 , O_2), а также в системах Ме–S, Ме–Р.

Случай Б. $T_{\text{ад}} > T_{\text{кип}}^{AB}$. Случай возможен в системе Mg + S.

Газовый механизм горения возможен только для некоторых нитридов, сульфидов, а также оксидов. В случае СВС по данному механизму синтезированы большинство нитридов. Взрывной механохимический синтез нитридов осуществить не удалось. Как правило, механохимический синтез нитридов проводят при атмосферном давлении азота. Процесс длится сотни часов и его механизм принципиально отличен от рассматриваемого случая. Газовый механизм горения в случае СВС процесса обнаружен для большинства нитридов, гидридов и оксидов. В случае механохимического синтеза взаимодействие металла с газом по взрывной кинетике обнаружено только при взаимодействии металлов с кислородом [46, 126].

Одним из основных способов повышения физико-механических свойств тугоплавких соединений является *легирование металлической и металлоидной подрешеток*. На примере безвольфрамовых твердых сплавов можно наблюдать, что наиболее высокие эксплуатационные свойства имеют сплавы на основе карбонитридов (оксикарбонитридов) титана типа КНТ16 и ЛЦК20, и эти свойства достигнуты при одновременном легировании металлической и металлоидной подрешеток карбида титана [87].

Для современной техники одним из важнейших *твердых растворов на базе тугоплавких соединений* является *карбонитрид титана*, используемый в основном как компонент безвольфрамовых твердых сплавов и износостойких покрытий. В работе [136] отмечена перспективность карбонитрида хрома в качестве *коррозионно- и износо-*

стойкого материала. Карбонитрид хрома образуется на базе решетки нитрида Cr_2N , имеющего решетку, отличную от карбида Cr_3C_2 . Карбонитрид хрома обладает более высокой коррозионной стойкостью в жидких и газообразных средах, высоким электросопротивлением и микротвердостью. Поскольку карбонитрид хрома, как и карбид хрома, обладает значительной хрупкостью, предложено применять его в виде композиционных материалов с никелевой связкой [136].

Так называемые *октаэдрические фазы Новотного*, открытые в середине 1960-х гг., имеют формулу $\text{Me}_a\text{M}_b\text{X}_c$ и включают фазы внедрения типа β -Mn $\text{Me}_3\text{M}_2\text{X}$, *H*-фазы $\text{Me}_{n+1}\text{MX}_n$, *P*-фазы Me_3MX типа перовскита и структуры типа η -карбида ($E9_3$) $\text{Me}_4\text{M}_2\text{X}$, а также *k*-карбиды (тип $\text{W}_9\text{Co}_3\text{C}_4$) и структуры $\text{Me}_5\text{M}_3\text{X}$, которые можно считать соединениями внедрения на базе решетки типа Mn_5Si_3 . В этих формулах *Me* – в основном переходные металлы III-VI групп (в случае перовскитных фаз *Me* – Mn, Fe, Co, Ni, Pd и Pt), *M* – в основном неперегородный металл, например Zn, Cd, Al, Ga, In, Tl, Sn и Pb или Ge и Si. Эти фазы, достаточно сложные в получении традиционными методами, обладают *необычным комплексом свойств*: хорошо поддаются механической обработке, имеют хорошую тепло- и электропроводность, аномально низкую твердость (HV 2-5 ГПа) и достаточно высокую жесткость (для Ti_3SiC_2 – $E = 330$ ГПа), устойчивы к термическому удару и концентрации напряжений на поверхностных дефектах, а также имеют сравнительно низкий коэффициент термического расширения ($<10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и сочетают анизотропию механических свойств с изотропией термических свойств. Такая комбинация свойств – следствие сочетания металлической связи и слоистой структуры [7, 16].

В обычном состоянии поверхности твердых тел малоактивны вследствие того, что они покрыты слоями адсорбированных веществ или продуктами их взаимодействия с окружающей средой. Наличие такой пленки затрудняет химическое взаимодействие с газами. Для

устранения пассивации и удаления продуктов реакции с поверхности применяется *механическая активация*. При этом пленки разрушаются, обнажается свежая поверхность с содержащимися на ней центрами, что облегчает протекание химических реакций. Таким образом, можно проводить широкий круг химических реакций тел с газами: окисление, хлорирование, получение карбониллов и т.д.

Некоторые металлы, к числу которых относятся никель, железо, молибден, вольфрам и хром, взаимодействуя с оксидом углерода, образуют *карбонилы металлов*. Разработанный Г. Хейнике *механохимический метод синтеза карбонила* оказался более экономичным и удобным, чем существующие методы. Этот метод нашел промышленное применение для изготовления изделий сложной конфигурации из металлического никеля. Синтез протекает при нормальном давлении и обычной температуре с выходом готового продукта на два порядка выше, чем у существующих способов. Поскольку массоперенос в газовой фазе происходит быстрее, чем в жидкой, время изготовления изделий из никеля сокращается в 5-7 раз по сравнению с электрохимическим способом [127]. Механохимическим методом можно также проводить синтез карбониллов и других металлов, например, вольфрама, молибдена, хрома и др. [45, 47]. Однако эффективность их значительно ниже, чем в случае карбонила никеля.

С целью эффективного использования нанопорошковых материалов для целей аддитивных технологий в *Санкт-Петербургском государственном политехническом университете* были проведены исследования ряда систем порошковых материалов, полученных методами механохимического синтеза (рис. 132).

Исследование механосинтеза твердых растворов карбидов. Известно, что для осуществления высокотемпературного механохимического синтеза (ВМС) тугоплавких соединений необходимы *термодинамические* и *кинетические* условия. Термодинамическим условием проведения ВМС является нарушение теплового баланса систе-

мы в процессе ее механоактивации и соблюдение неравенства $T_{ad} > T_{пл}$. Внешние условия проведения процесса, воздействуя на систему различными факторами, которые оказывают влияние на теплоприход, могут изменить взрывную кинетику образования тугоплавкого соединения.



Рис. 132. Оборудование для механохимического синтеза производства *ZoZ Group GmbH*

При проведении экспериментов наблюдался ряд закономерностей между строением диаграммы состояния металл-неметалл и термограммами процесса синтеза [102]. Установлено, что взрывной механохимический синтез наблюдается в системах металл-неметалл, в которых имеется ограниченная растворимость неметалла в металле. Так, для диаграмм систем Hf-C, Zr-C, Ti-C при содержании неметалла выше предела растворимости образование тугоплавкого соединения происходит по взрывной кинетике. При этом происходит скачкообразное повышение температуры механореактора, соответствующее

доле образования тугоплавкого соединения. Кроме того, чем выше концентрация неметалла в композиции, тем больше времени необходимо для осуществления ВМС.

Для диаграмм, в которых растворимость неметалла в металле чрезвычайно низкая (системы Nb-C, Cr-C), характерен постепенный подъем температуры механореактора. ВМС в этих системах не осуществляется. Образование тугоплавкого соединения происходит очень медленно. Конечный продукт состоит из множества фаз. Структура образующихся соединений неравновесная.

Отсутствие взрывной кинетики образования тугоплавких соединений в системах, образующих неустойчивые химические соединения при концентрациях неметалла, соответствующих области нестехиометрического состава устойчивого химического соединения, обусловлено распадом легкоплавкого соединения (системы Nb-C, Cr-C). Распад неустойчивого химического соединения приводит к поглощению тепла и, тем самым, к предотвращению теплового взрыва. В этой связи в системах Nb-C и Cr-C при содержаниях углерода менее стехиометрического состава механохимический синтез осуществляется с образованием многофазного продукта.

Формирование окончательной структуры сплавов на основе тугоплавких соединений определяется, главным образом, не процессами механолегирования, а температурно-временными параметрами ВМС [102]. Поскольку диаграммы состояния *тугоплавкое соединение – металл* в большинстве случаев – эвтектического типа, то следует ожидать, что характер структурообразования сплавов типа *металл – тугоплавкое соединение* будет определяться условиями кристаллизации эвтектики.

С целью проверки возможности образования неограниченных твердых растворов TiC–Me (Nb, Zr, Hf, Ta, Mo,) при ВМС исследовали *систему Ti-Nb-C*. Варьирование температуры ВМС достигалось путем изменения загрузки исходных компонентов.

Результаты экспериментов показали, что увеличение количества Nb до 48% приводит к росту периода решетки карбида титана. Это объясняется переходом титана из нестехиометрического карбида титана в твердый раствор на основе Nb. Влияние исходной загрузки шихты на фазовый состав сплава связано с температурой синтеза. При загрузке титана и углерода на 0,6 грамм-молекулы карбида титана максимальная температура синтеза составила 1800°C, а при 0,3 грамм-молекулы – 900°C. Судя по диаграмме состояния Nb-Ti, при 1800°C часть сплавов находится в двухфазной области, состоящей из жидкости и β -фазы. Следовательно, формирование окончательной структуры данных сплавов определяется процессами растворения и кристаллизации.

Аналогичные результаты были получены и для системы *Ti-C-Zr* [102]. Однако в отличие от системы Ti-C-Nb, величина периода решетки твердых растворов TiC-ZrC была больше. Так, например, после синтеза композиции Ti+16%C+20%Zr период решетки твердого раствора составлял 4,3713 Å, при этом карбид циркония не был обнаружен. Следовательно, в процессе ВМС в системах Ti-C-Nb, Ti-C-Zr образуются твердые растворы, как между карбидом титана и карбидами ниобия и циркония, так и между металлами (Ti-Nb, Ti-Zr). При этом твердые растворы TiC-ZrC имеют более высокие значения периодов решетки, чем твердые растворы TiC-NbC.

Для практического применения безвольфрамовых твердых карбидохромовых сплавов типа КХН немаловажное значение имеет исследование системы Ti-C-Ni-Cr, это связано с тем, что хром с углеродом образует ряд карбидов, а по некоторым данным [74-76, 86, 97, 114, 115, 124], определенное его количество может растворяться в карбиде титана.

Результаты исследований системы *Ti-C-Ni-Cr* показали, что независимо от содержания хрома в исходной шихте (содержание хрома в системе Ni-Cr изменяли от 10 до 30%)

Ti+20%C+40%(Ni_x+Cr_y) фазовый состав порошка после ВМС состоял из карбида титана и твердого раствора хрома в никеле [102]. Изменение количества хрома в исходной шихте оказывало влияние только на период решеток карбида титана и никеля. Максимальные значения периодов решеток карбида титана и никеля при исследуемых концентрациях хрома были получены при 20% Cr ($a_{\text{TiC}} = 4,3214 \text{ \AA}$) и при 10%Cr ($a_{\text{Ni}} = 3,5710 \text{ \AA}$).

Анализ микроструктуры синтезированных сплавов показал, что после обработки образцов травителем (50%HNO₃ + 50% HF) их структура состоит из белых зерен карбида титана круглой формы, которые располагаются на темном фоне [102]. При этом в зависимости от типа исследуемой системы и состава дисперсность и форма данных зерен различная. Из всех исследуемых систем наименьшей дисперсностью карбида титана обладали сплавы системы TiC-Ni-Cr. Размер зерна для сплава TiC + 40% (Ni₇₀ + Cr₃₀) составлял порядка 1-5 мкм. Наибольшим размером зерна обладали сплавы с незначительным (10-15%) количеством металлической связки, а также сплавы, в которых в качестве исходного компонента использовали порошок карбида титана (Ti + 20%C + 10%TiC + 30%Ni + 8%Mo). Порошок карбида титана в исходную шихту вводили с целью изучения возможности модифицирования данных сплавов. Результаты экспериментов показали, что введение 10% карбида титана в исходную шихту приводит к укрупнению структурных составляющих сплава [102].

Содержание Ni в сплаве изменяли от 17 до 40%. Было установлено, что с увеличением количества Ni в сплаве происходит своеобразное дробление сросшихся зерен карбида титана, размеры которых при содержании 40% никеля становятся порядка 1-3 мкм, а их форма приближается к шарообразной. Подобное изменение структуры сплава обусловлено воздействием состава сплава на скорость охлаждения. Чем меньше количество металлической связки или чем выше ее температура плавления, тем степень переохлаждения сплава меньше и

наоборот. В этой связи сплавы системы $\text{TiC} + 40\%(\text{Ni}_{70} + \text{Cr}_{30})$, у которых температура плавления связки была достаточно низкая ($T_{\text{пл}} = 1345^\circ\text{C}$), обладали наибольшими степенями переохлаждения. Аналогичная зависимость наблюдалась в системе $\text{TiC} + \text{Ni} + 8\% \text{Mo}$ в зависимости от содержания в ней Ni [102].

При проведении высокотемпературного механохимического синтеза, протекающего по взрывной кинетике, создаются чрезвычайно высокие скорости нагрева и охлаждения. Формирование структуры при таких условиях происходит при значительных переохлаждениях, что может привести к образованию различного рода метастабильных структур. В случае образования сплавов эвтектического типа возможно образование квазиэвтектики и других неравновесных структур.

В случае систем TiC-Me (Ni , Cr , Co , Fe), имеющих эвтектическую диаграмму состояния, наибольшие степени переохлаждения будут соответствовать эвтектической концентрации. Поэтому увеличение количества никеля в системе TiC-Ni должно приводить к увеличению переохлаждения расплава. При содержании Ni более 10% образуются крупные частицы сплава. Увеличение размера частиц сплава приводит к уменьшению переохлаждения. Таким образом, увеличение количества никеля в сплаве неоднозначно оказывает влияние на степень переохлаждения, а следовательно, и на размер эвтектических карбидов.

В системе Ti-C-Ta твердые растворы не образуются [102]. В зависимости от количества Ta в исходной композиции Ti-C-Ta , установлено присутствие карбида титана, карбида тантала и титана. Такое образование фаз в системе Ti-C-Ta после ВМС обусловлено высокой температурой плавления тантала ($T_{\text{пл}} = 2980^\circ\text{C}$).

В системе Ti-C-Hf образование твердых растворов зафиксировано при содержании гафния менее 15%. При большем содержании гафния в данной системе установлено образование карбида титана и карбида гафния.

Исследования механохимического синтеза карбонитридов.

Большая часть карбидов и нитридов переходных металлов IV и V групп образуют непрерывные ряды твердых растворов, за исключением сплавов с TaN, имеющих гексагональную структуру, и некоторых сплавов с VN и VC с периодами решеток, существенно отличающихся от периодов решеток других карбидов и нитридов. Наиболее подробные данные по ряду систем этого типа приведены в работе [19], где исследовались условия приготовления, структура и физические свойства систем TiC-ZrN и TiC-TaN. Все они представляют системы с непрерывными рядами твердых растворов, за исключением системы TiC-TaN, в которой твердые растворы образуются в области до содержаний TaN соответственно в 80 и 85 мол. %. В системах TiC-TaN и TiC-ZrN изменение молярной магнитной восприимчивости одно-типно – она плавно возрастает от отрицательных значений для соответствующих карбидов до положительных значений для нитридов; изменение это во всех случаях нелинейное с пересечением кривой восприимчивости оси составов при примерно 20 мол. % нитридного компонента.

Процессы, происходящие при высокотемпературном механохимическом синтезе карбонитридов, исследовали на примере системы Nb-C-N. В качестве углерода использовали сажу, а в качестве азотсодержащего компонента – уротропин ($C_6H_{12}N_4$). Исходя из химической формулы уротропина, рассчитывали количество содержащегося в нем азота. На основании расчетных данных была проведена серия экспериментов по ВМС карбонитридов в системе Nb-C-N. Полученные порошки композиций Nb + 20%С + 15% уротропина, Nb + 15%С + 20% уротропина, Nb + 10%С + 25% уротропина подвергались рентгенофазовому анализу. Полученные результаты не дают однозначного ответа на вопрос об образовании карбонитридов в данной системе. Однако характер полученных рефлексов на рентгенограмме говорит о том, что полученное соединение должно содержать твердый раствор

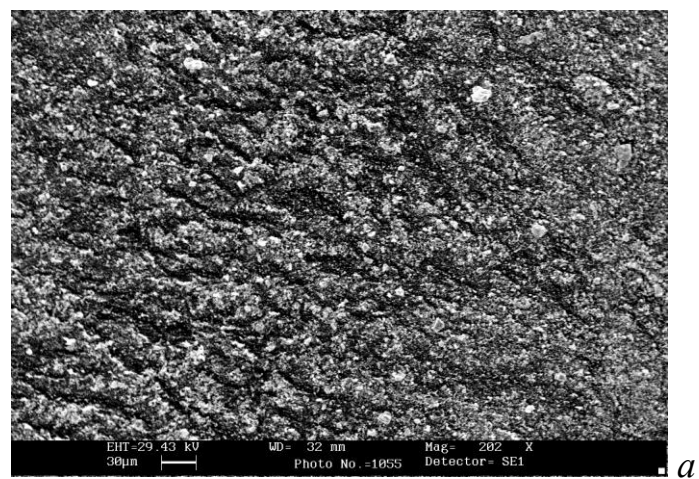
углерода и азота в ниобии. Последующие эксперименты на других системах (Ti-C-N, Zr-C-N) показали аналогичные результаты [101]. Таким образом, с помощью ВМС возможно получать карбонитриды в системах Nb-C-N, Ti-C-N, Zr-C-N, однако их фазовый состав не соответствует равновесному состоянию.

Исследование внешнего вида порошков металлоподобных тугоплавких соединений

Поскольку форма и размер частиц порошка оказывает существенное влияние на технологические свойства, был проведен детальный анализ внешнего вида частиц полученных порошков. Исследование осуществлялось с помощью электронного сканирующего микроскопа *LEO 430* (Германия) при увеличении от 100 до 2000 раз. Были исследованы системы *Ti-C-Zr*, *Ti-C-Hf* и *Ti-C-Ta*. Внешний вид порошка композиции *Ti-C-Zr* показал, что при содержании Zr до 20% порошок представлял собой практически однородную массу, состоящую более чем на 90% из частиц размером не более 3 мкм (рис. 133а).

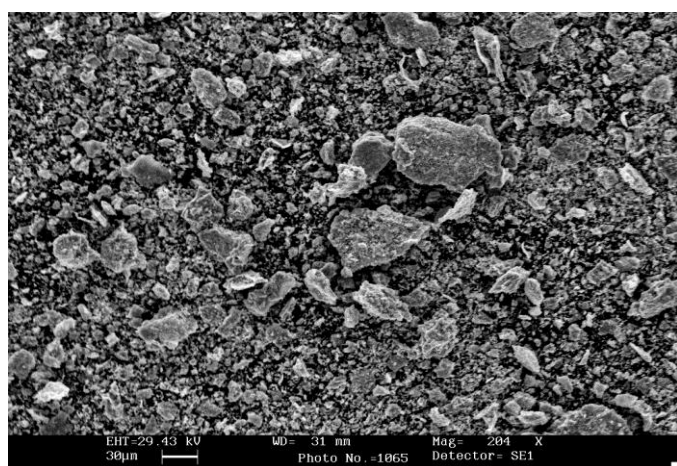
По мере увеличения процентного содержания Zr в исходной шихте до 27% размер частиц порошка укрупнялся, достигая 30 мкм (рис. 133б). Наибольший размер (100-120 мкм) соответствовал максимальному содержанию циркония 43%. При этом содержание крупных частиц в общей массе также увеличилось.

При замене циркония гафнием или танталом внешний вид порошка изменялся. В композиции Ti+C+27%Hf (рис. 134а) наблюдалось наличие крупных сплавленных частиц порошка размером до 60-90 мкм и более мелких частиц пластинчатой формы. При введении вместо циркония тантала (рис. 134б) размер наиболее крупных частиц в этом случае достигал 10-20 мкм, и их доля в общем объеме составляла не более 10%. В основном сплав состоял из частиц порошка размером от 1 до 3 мкм округлой формы.



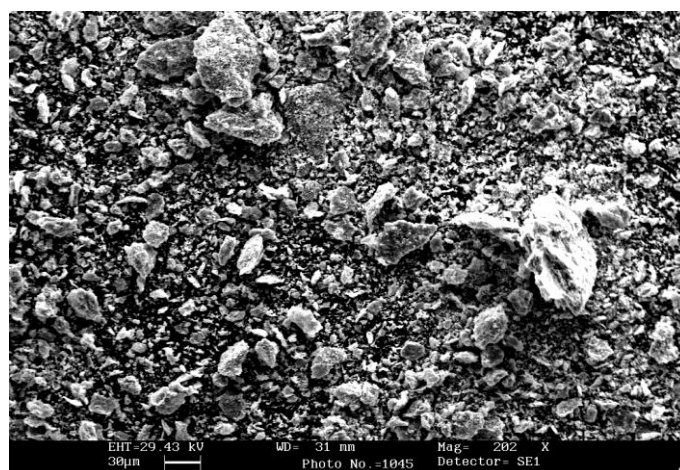
a

X300



б

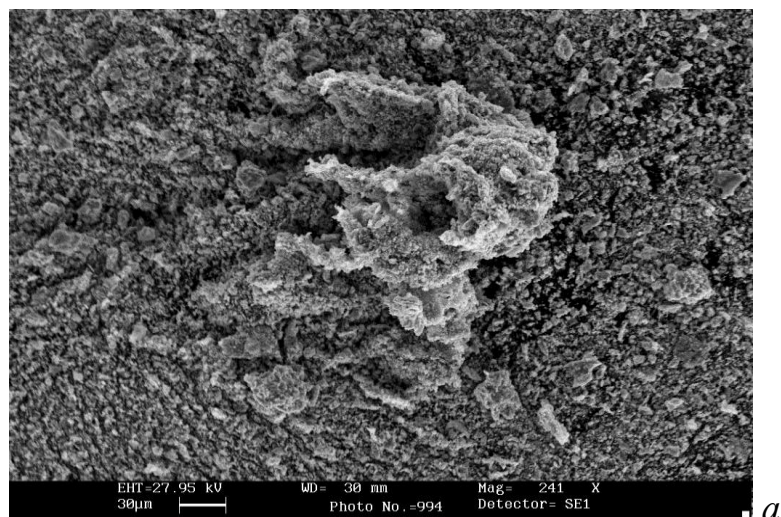
X200



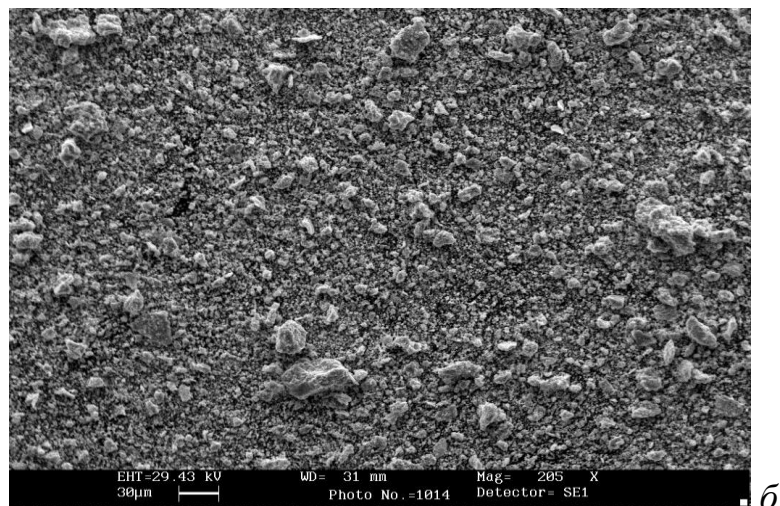
в

X200

Рис. 133. Внешний вид частиц порошка композиций [102]:
a – Ti+16%C+20%Zr; *б* – Ti + 15%C + 27%Zr; *в*– Ti+14%C+33%Zr



х 240



х 200

Рис. 134. Внешний вид частиц порошка композиций [102]:

а – Ti+15%C+27%Hf; *б* – Ti+15%C+27%Ta

Полученные результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения для целей аддитивных технологий порошковых композиций на основе титана, содержащих Zr и Ta, причем количество циркония в исходной шихте не должно превышать 20%.

Эффективность получения методом механохимического синтеза порошковых высокоазотистых аустенитных сплавов системы Fe-Cr-Ni-Mn-N с нанокристаллической структурой (рис. 135) показана в работе [105]. В результате механического легирования в атмосфере ам-

миака из порошков были созданы порошковые высоколегированные аустенитные сплавы с сверхравновесным содержанием азота и размером нанокристаллов аустенита 30-36 нм.

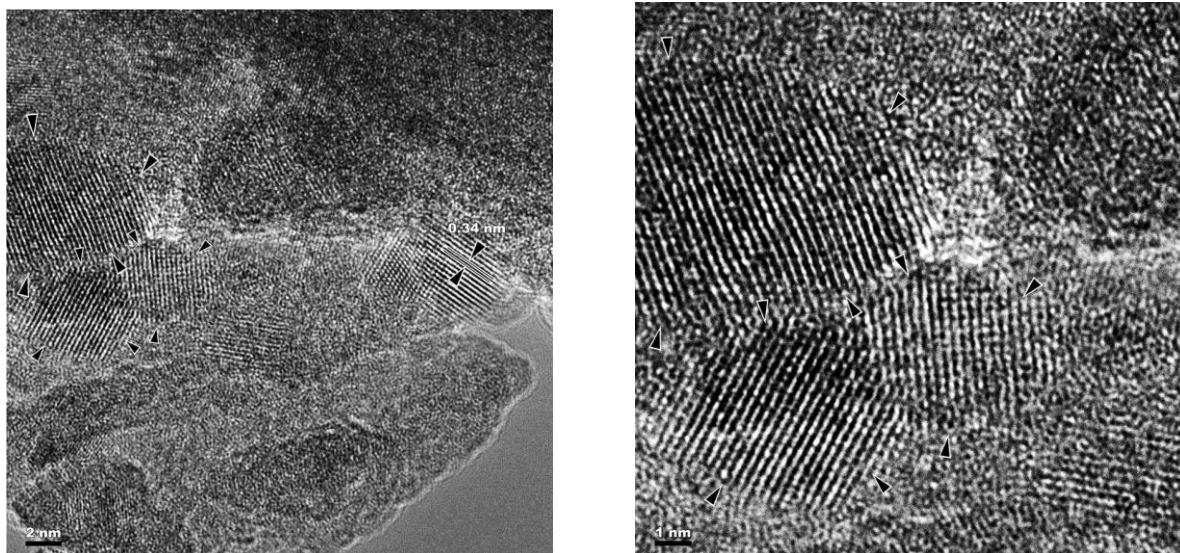


Рис. 135. Типичная нанокристаллическая структура высокоазотистого порошкового сплава системы Fe-18Cr-8Ni-12Mn-0,9N, полученного механолегированием [105]

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* (Голландия), *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 индустриального назначения с производительностью до 500 кг за одну плавку и более. Лабораторные атомайзеры *ALD VIGA 1-B*, *VIGA 2* (рис. 136) предназначены для получения порошков стали и спецсплавов в основном в исследовательских целях.



Рис. 136. Плавильная камера атомайзера VIGA 2

Атомайзеры используются для получения методом *VIGA* небольших партий порошков различных конструкционных сталей, никелевых сплавов, кобальта, меди и др. Стандартная конструкция включает печь для вакуумного индукционного плавления (*VIM*), где происходят процессы плавления, очищения и дегазации. Очищенный расплав сливается по предварительно нагретому желобу 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 инсталляции. 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 путем 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* (рис. 137) и *EIGA 100* отличаются размерами применяемого *фидстока*, соответственно, 50 и 100 мм. Машины *EIGA* имеют невысокую скорость распыливания – около 0,5 кг/с, но позволяют распыливать достаточно большой объем материала в течение одной плавки – от единиц до десятков килограммов. 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) путем осаждения распыливаемого металла на подложку.



a

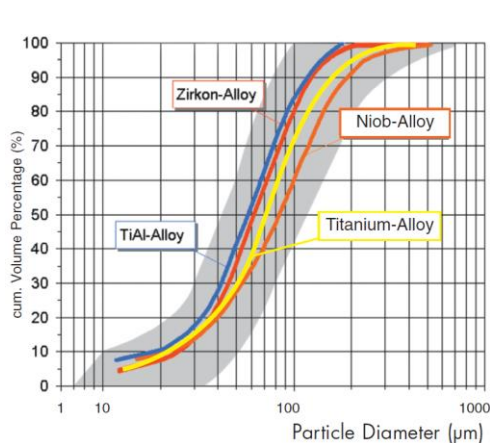


б

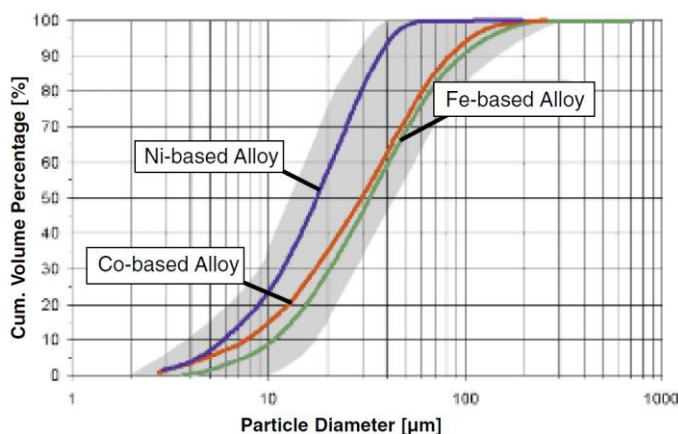
Рис. 137. Атомайзер *EIGA 50*: *a* – общий вид; *б* – плавильная камера.

Предоставлено *ALD*

Технология *VIGA* позволяет получать порошки металлов (кроме титановых сплавов и реактивных металлов) с дисперсностью $d_{50} = 30$ мкм. Технология *EIGA* весьма производительна (при 2-х сменной работе 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 (рис. 138).



a



b

Рис. 138. Фракционный состав порошков различных сплавов, полученных по технологиям *VIGA* (*a*) и *EIGA* (*b*)

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 формирования порошковых материалов посредством предварительной пластификации (с помощью связующего состава) и специальной термообработки на стадии получения конечного изделия.

Атомайзеры *Hermiga 75/3* (рис. 139а) 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.



а



б

Рис. 139. Атомайзер: а – *Hermiga 75/3*; б – *Hermiga 100/10 VI*.

Предоставлено компанией *PSI*

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

Атомайзер *Hermiga 100/10 VI* (рис. 139б) – лабораторно-исследовательская машина с донным сливом и с аргоновым распылителем для получения порошков спецсталей, титановых сплавов, редкоземельных металлов, пирофорных 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 данной 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, позволяющие получать в день 1-5 кг порошка, так и промышленные установки производительностью более 5 т в день (рис. 140).



Рис. 140. 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 [82].

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 табл. 3 (Приложение) приведен перечень порошковых композиций, предлагаемый компаниями – 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 Solution* или *Realiser*.

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 малоодоходной для них области, но развивают направления, где 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 табл. 4 (Приложение) приведены данные по материалам, которые предлагает одна из новых компаний на рынке аддитивных технологий – компания *LPW Technology* (Великобритания). Химсостав 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 привести:

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 mbH (Германия) – производство мелкодисперсных кобальтовых порошков $d_{50}=2-10$ мкм.

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/кг, *Ti-6Al-4V* – €200/кг, сплав *Co-Cr* – €150/кг, сплавы *Al* – €70-90/кг, *Inconel 625* – €75/кг. Российским потребителям они обходятся как минимум вдвое, как правило, – втрое дороже. В табл. 5 (Приложение) указаны цены по данным коммерческих предложений западных фирм для российских покупателей (цены приведены за 1 кг на условиях *EXW*, т.е. без НДС, таможенных, транспортных и других затрат). При этом существует минимальный предел заказа – от 10 до 50 кг.

Российские предприятия «недостаточно активно внедряют в промышленных масштабах новые технологии консолидации порош-

ковых материалов». Детали, произведенные с помощью методов послойного лазерного сплавления, «уже на десятки процентов дешевле (а при массовом производстве будут в разы дешевле), чем при традиционной металлургии и механической обработке... через пять-семь лет спрос на порошки и изделия порошковой металлургии может превысить спрос на прокат, и российский производитель, не принявший вовремя меры, будет к этой ситуации не готов...» [125, с. 56].

Для повышения эффективности использования аддитивных технологий в производстве различных изделий в работе [51] был проведен анализ влияния различных факторов на качество деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий. Выяснено, что качество полученных изделий зависит от таких факторов производственного процесса, как конструктивные характеристики детали (геометрические особенности, габаритные размеры, наличие полостей, несплошностей и отверстий), параметры оборудования (габариты рабочего пространства, мощность лазера и диаметр луча, программное обеспечение), технологические процессы и постобработка (полирование, частичное объединение деталей, удаление опор, металлизация), свойства материала (механические, физические и химические свойства), а также свойства окружающей среды (температура, влажность, вибрация). Возможность комплексного анализа перечисленных факторов позволит обосновать выбор технологического процесса изготовления, модель оборудования и вид материала.

ГЛАВА 8. КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ И МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Для металлургических исследований, дефектоскопии и широкого круга инженерных задач большой интерес представляют системы компьютерной томографии, позволяющие «увидеть» внутреннюю структуру изучаемого объекта (рис. 141). «Компьютерная томография позволяет получать трехмерное изображение при рентгеновском просвечивании отливок и определять тем самым геометрию внутренних поверхностей и каналов, получая объемную картину расположения металлургических дефектов» [64, с. 17].

Томографы представляют особый интерес для отработки технологии литья ответственных изделий, позволяют оперативно исследовать проблемные места в отливке, объективно оценивать степень их важности, проводить варианты исследования литниковой системы, режимов пред- и постобработки отливки и таким образом в сжатые сроки отрабатывать бездефектную технологию получения литых изделий. Современные системы компьютерной томографии позволяют идентифицировать объекты (поры, раковины, включения и т.д.) с высоким разрешением, получать трехмерный скан детали.

По томограмме можно получить наглядное изображение и любого сечения объекта, и 3-х мерной 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 четкое и достоверное изображение проецируется на детектор. В современных системах для промышленных задач размер пятна фокуса составляет 200 и менее 1 нм (0,2 мкм), что позволяет создавать томографы для достаточно габаритных объектов, таких

178

как блоки и головки цилиндров двигателей, корпусных деталей энергетических машин и т.д.

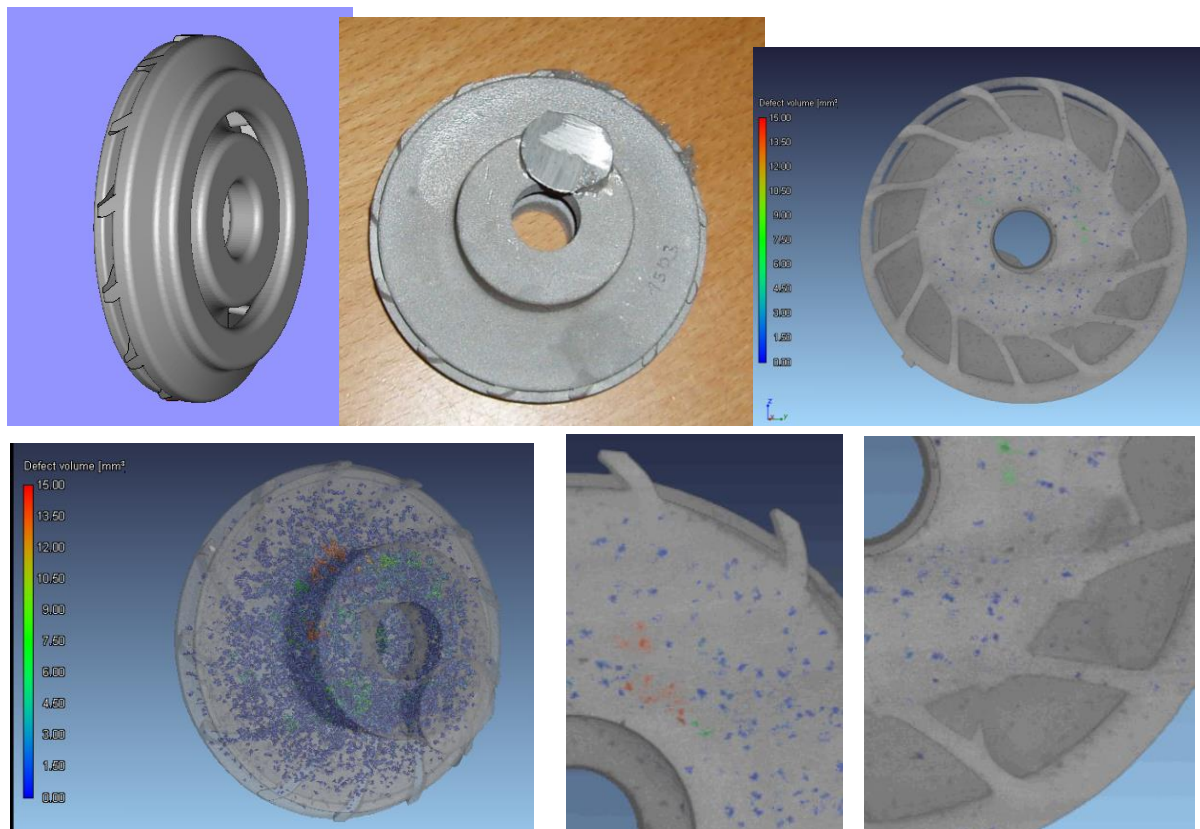


Рис. 141. Инспекционный контроль и анализ качества литейных деталей: CAD-модель, отливка и результаты томографических исследований (с указанием дефектных мест). Предоставлено ФГУП «НАМИ»

Ряд компаний, например, *YXLON* и *Werth* (Германия), выпускают специальные томографы *YXLON.CT Universal* и *Tomoscope*, имеющие в своем составе макро- и микрофокусные трубки и линейный и плоскочувствительный 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 inspectируемой детали – до 65 кг, высота – до 650 мм, диаметр – до 635 мм. 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 изделий с повышенными требованиями на герметичность и качество внутренней структуры материала (рис. 142, 143).

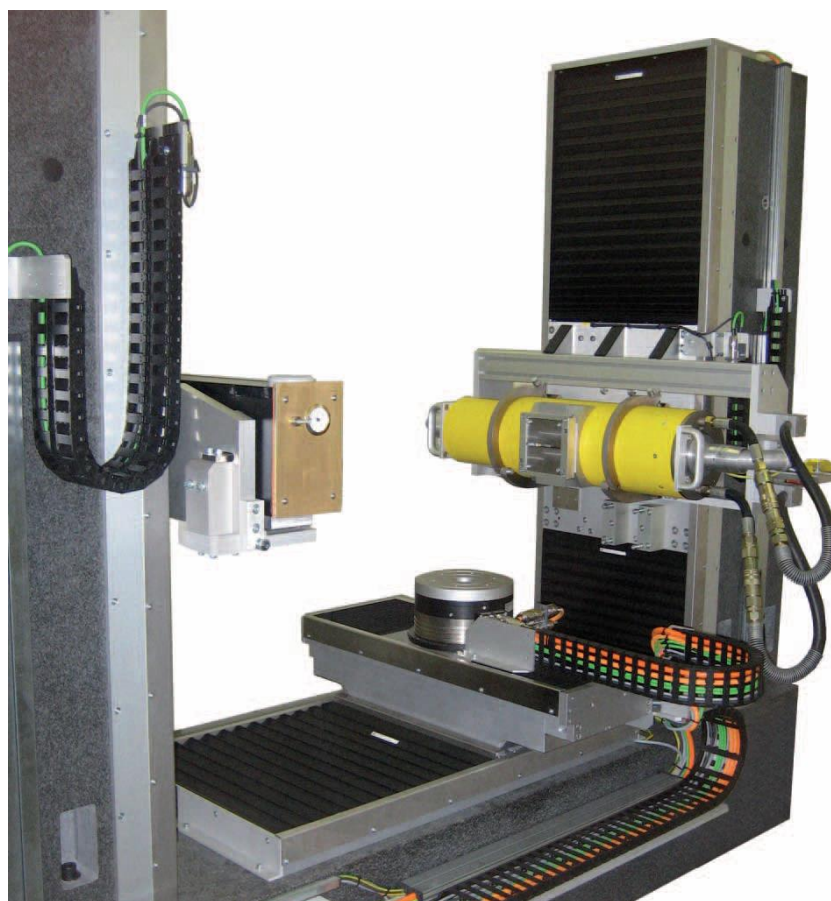


Рис. 142. Томограф Y.CT Modular



Рис. 143. Томограф YXLON Compact

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 кВ. Наиболее популярным программным продуктом для обработки данных томографирования, контрольных измерений и анализа является *VGStudio Max 2.1* компании *Volume Graphics*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном машиностроении все большее внимание специалистов привлекают так называемые «нетрадиционные» технологии, среди которых – нанотехнологии, прецизионные технологии и аддитивные технологии.

В данном учебном пособии приведены лишь некоторые сведения о современных аддитивных и литейных технологиях, а также технологиях порошковой металлургии, которые можно отнести к инновационным и которые в полной мере соответствуют задачам создания инновационной экономики.

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 определяют положение экономики страны в мире, ее 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*.

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 «теплого» 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.

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

Залогом успешного освоения данных технологий является их цельность, т.е. соединение их самих в определенную технологическую цепочку, которую можно переформатировать в зависимости от конкретной решаемой задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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>.
2. 5-akselinen pystykarainen työstökeskus MATSUURA MAM72-35V on uudistunut. 18.12.2012. URL: <http://www.makrum.fi>.
3. Ahsan M.N. et. al. A comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // Materials Science and Engineering. – 2011. – P. 7648-7657.
4. 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.
5. Al Dean. STL-формат для быстрого прототипирования. Часть I. Вывод в формате STL // CAD/CAM/CAE Observer. – 2005. – № 5 (23). – С. 64-69.
6. Al Dean. STL-формат для быстрого прототипирования. Часть II. Реальный опыт вывода STL-файлов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2005. – № 6 (24). – С. 65-69.
7. Barsoum M., Ali M., El-Raghy T. Processing and Characterization of Ti₂AlC, Ti₂AlN and Ti₂AlC_{0,5}N_{0,5} // Metall. Mater. Trans. A. – 2000. – Vol. 31a. – P. 1857-1865.
8. 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]. URL: <http://www.lia.org>.
9. Boulos M. Plasma power can make better powders. Metal Powder Report. 2004. – Vol. 59. – Issue 5. – P. 16-21.

10. Calka A., Radlinski A.P. Mechanical Alloying of High Melting Point Intermetallics // Mater. Sci. and Eng. A. – 1993. – Vol. 134. – P. 1366-1389.
11. Calka A., Williams J.S. Synthesis of Nitrides by Mechanical Alloying // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto, Japan / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Co. – USA, 1992. – P. 787-794.
12. Chen H.S., Park B.K. Role of Chemical Bonding in Metallic Glasses // Acta Metallurgica. – 1973. – Vol. 24. – № 4. – P. 395-400.
13. Chen H.S. The Glass Transition Temperature in Glassy Alloys: Effect of Atomic Sizes and the Heat of Mixing // Acta Metallurgica. – 1974. – Vol. 22. – № 22. – P. 897-900.
14. Donachie M.J. Donachie S. Superalloys: A Technical Guide, 2nd Ed. – ASM International, 2002. – 438 p.
15. El-Es Kandarany M.S., Sumiyama K., Ao Ki K., Suzuki K. Reactive Ball Mill for Solid State Synthesis of Metal Nitrides Powders // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto, Japan / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Co., USA. – 1992. – P. 801-805.
16. Finkel P., Barsoum M.W., El-Raghy T. Low Temperature Dependencies of the Elastic Properties of Ti_4AlN_3 , $\text{Ti}_3\text{Al}_{1,1}\text{C}_{1,8}$ and Ti_3SiC_2 // J. Appl. Phys. – 2000. – № 87. – P. 1701.
17. Fngelo H. C., Subramanian R. Powder Metalurge: Science, technology and application. – New Dehli, 2009.
18. Gilman P.P., Benjamin J.S. Mechanical alloying // Ann. Rev. Materials Sci. – 1933. – Vol. 13. – P. 279-330.
19. Goretzki H. Untersuchung der magnetischen elektrischen und thermoelektrischen Eigenschaften der Karbide und Nitride der 4a und 5a-Übergangsmetalle. Dissertation, Universität Wien, 1963. – S. 156.
20. 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.

21. 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.

22. Iwamoto N., Vesakas P. Поведение при механическом легировании систем металл-кремний // Funtai Oyobi Funmatsu Yakin / Journal of the Jap. Soc. Powder & Powder Technology. – 1991. – Vol. 37. – № 5. – P. 652-655.

23. 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]. URL: <https://docs.google.com>.

24. Kobayashi K., Takayanagi T., Ohta W., Ohnaka A. Влияние процесса механолегирования на металлокерамические сплавы // J. Jap. Soc. Powder & Powder Met. – 1992. – Vol. 38. – P. 51-54.

25. Koch C.C. Materials Synthesis by Mechanical Alloying // Annual Reviews of Materials Science. – 1988. – Vol. 19. – P. 18.

26. Koyano T., Lee G.H. Formation of Iron-Nitrides by Mechanical Alloying in NH₃ Atmosphere // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto, Japan / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Co., USA. – 1992. – P. 809-816.

27. Louvis E. et. al. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom. – 2011. – Vol. 211. – P. 275-284.

28. Oehring M., Bormann R. Int. Symp.on Amorphization by Solid State Reaction. Grenoble // Legresy E de Physique, Colloquia. – 1990. – Vol. 51. – P. 4-169.

29. Ogino Y., Miki M., Yamasaki T., Inuma T. Preparation of Ultrafine-Grained TiN and (Ti,Al)N Powders by Mechanical Alloying // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto, Japan / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Co., USA. – 1992. – P. 795-800.

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

31. 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]. URL: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>.

32. Schwartz R.B., Srinivasan S., Desh P.B. Synthesis of Metastable Aluminium-Based Intermetallics by Mechanical Alloying // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto, Japan / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Co., USA. – 1992. – P. 595-602.

33. Senna M., Okamoto K. Rapid Synthesis of Ti-and Zr-nitrides under Tribochemical Conditions // Solid State Ionics. – 1989. – Vol. 32/33. – № 1. – P. 453-460.

34. Shingu P.H. Mechanical Alloying. Proceedings of the Int. Symp. on Mechanical Alloying, Kyoto, Japan // Trans. Tech. Publications c/o Ashgate Publishing Co., Brookfield, USA. – 1992. – P.828.

35. Tanaka T., Hasu S., Nakagawa K., Ishihara K., Schingu P. Mechanical Alloying of Fe-C and Fe-C-Si System // Materials Science Forum Kyoto, Japan // Trans. Tech. Publications c/o Ashgate Publishing Co. – 1992. – P. 269.

36. 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. URL: <http://www.lia.org>.

37. Tomilin I.A., Mochalova T.J., Kaloshkin S.D. The Influence of Ball Milling on the Kinetics of Crystallization of the Amorphous Alloy Ni₇₈Si₁₀B₁₂ // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto,

Japan / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Company, USA. – 1992. – P. 289-286.

38. Tsantrizos P. G. et. al. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization. Pat. US № 5707419, дата выдачи: 13 янв. 1998.

39. Tschakarov Chr. G., Gospodinov G.G. und Bontschev Z. Über den Mechanismus der mechanochemischen Synthese anorganischer Verbindungen // Journal of Solid State Chemistry. 1982. – V. 41. – P. 244-252.

40. Vityaz P.A., Kolesnikov A.A., Stepanovich A.A., Nozdrin V.F. Study of Intermetallides Synthesis by Mechanical Alloying Technique // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Co., USA. – 1992. – P. 619-624.

41. Wang K.Y., Wang J.T., Quan M.X., Wei W.D. Ball Milling of the Partial Amorphous Fe₇₈Si₁₂B₁₀ Alloy // Mechanical Alloying. Materials Science Forum, Kyoto, Japan / Trans. Tech. Publication c/o Ashgate Publishing Company, USA. – 1992. – P.283-288.

42. 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.

43. 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, 259-270, Scientific paper [Электронный ресурс]. URL: <https://lirias.kuleuven.be>.

44. «Группа ГАЗ» внедрила уникальные технологии прототипирования для автомобилей «ГАЗель-Next». Новости // Журнал автомобильных инженеров. – 2001. – № 6 (71). – С. 4-5.

45. А.с. 50953 Способ получения карбонила вольфрама / Аввакумов Е.Г., Гимаутдинов Ю.В., Болдырев В.В. (СССР) – О.И., 1976. – № 13.
46. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 303 с.
47. Аввакумов Е.Г., Гимаутдинов Ю.В., Болдырев В.В. Механохимические реакции окиси углерода с тугоплавкими металлами / Материалы V Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. – Таллинн, 1977. – Ч. II. – С. 52-55.
48. Акопян А.Г., Долуханян С.К. Взаимодействие титана, бора и углерода в режиме горения // Физика горения и взрыва. – 1978. – № 3. – С. 70-75.
49. Александрова В.В., Зайцева А.А. 3D-технология и когнитивное программирование // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – № 5. – Т. 10. – С. 61-64.
50. Алтунян А.О. Методы формообразования в компьютерном искусстве и проектные технологии в архитектуре // АМІТ. – 2012. – № 2(19). – URL: www.marci.ru.
51. Балака Е.В. Основные факторы влияния на процесс формообразования деталей с помощью технологий послойного выращивания (Rapid Prototyping) // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. Вип. 1 (21). – С. 29-36.
52. Безобразов Ю.А. и др. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM-методами быстрого прототипирования. – Екатеринбург, 2012.
53. Белов В.Д., Белов Н.А., Дрокина В.В. Новые материалы и ускоренная подготовка производства – гарантия успеха на рынке литейной продукции // Литейное производство. – 2009. – № 5. – С. 13-16.
54. Бобцова С.В. Исследование и разработка методов использования технологий быстрого прототипирования в приборостроении:

диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.11.14. – СПб, 2005. – 124 с.

55. Болдырев З.В. Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ. – Новосибирск: Наука, 1983. – 65 с.

56. Бондарь Ю.В., Бондарь А.Ю., Кодолов В.И. Высокие технологии быстрого моделирования и прототипирования: анализ методов и перспектива их развития // Сборник трудов по материалам научных молодежных школ «Кластерные системы и материалы. Новые высокие технологии быстрого моделирования и прототипирования». – Ижевск, 1997. – С. 245-252.

57. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Ин. лит., 1955. – 444 с.

58. Бутягин П.Ю. Кинетика и природа механохимических реакций // Успехи химии. – 1971. – Т. 40. – С. 1935-1959.

59. Бутягин П.Ю. Химические силы в деформационном перемешивании и механическом синтезе // Сборник статей и докладов «Дезинтеграторная технология». – Таллинн: НПО «Дезинтегратор», 1990. – Т. 2. – С. 33-47.

60. Бутягин П. Ю. Энергетический выход механохимических процессов. – В кн.: УДА – технология. – Таллинн: НПО «Дезинтегратор», 1983. – С. 5-10.

61. Валетов В.А., Бобцова С.В. Влияние RP-технологий на качество изделий // Инструмент. – 2004. – № 19-20. – С. 21-25.

62. Вант-Гофф Я.Г. Очерки по химической динамике. – Ленинград: ОНТИ, Химтеорет, 1936. – 231 с.

63. Добринский Е.С. Быстрое прототипирование: идеи, технологии, изделия // Полимерные материалы. – 2011. – № 9. – С. 36-37.

64. Дорошенко В.А. Цифровые технологии и литье под низким давлением деталей из алюминиевых и магниевых сплавов // Литейное производство. – 2009. – № 8. – С. 16-18.

65. Евсеев А.В., Камаев В.С., Коцюба Е.В., Марков М.А., Новиков М.М., Панченко В.Я. Лазерная стереолитография // Сборник трудов ИПЛИТ РАН «Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Под. ред. чл.-кор. РАН В.Я. Панченко и проф. В.С. Голубева. – М.: Интерконтакт наука, 2005. – С. 40-42.

66. Евсеев А.В., Камаев В.С., Коцюба Е.В., Марков М.А., Новиков М.М., Панченко В.Я. Оперативное формирование трехмерных объектов методом лазерной стереолитографии // Сборник трудов ИПЛИТ РАН «Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. – М.: Интерконтакт наука, 2005. – С. 26-39.

67. Евсеев А.В., Камаев В.С., Коцюба Е.В., Марков М.А., Новиков М.М., Попов В.К., Панченко В.Я. Компьютерное биомоделирование и лазерная стереолитография // Сборник трудов ИПЛИТ РАН «Современные лазерно-информационные и лазерные технологии». – М.: Интерконтакт наука, 2005. – С. 119-130.

68. Евсеев А.В., Камаев С. В., Коцюба Е. В. и др. Изготовление физических моделей методом стереолитографии // Автоматизация проектирования, 1999, № 2. URL: www.osp.ru/ap/1999/02/005.htm.

69. Егоров Ф.Ф., Пшеничная О.В. Межфазное взаимодействие в металлах систем TiC-Cr и Ti(CN)-Cr // Порошковая металлургия. – 1991. – № 4. – С. 69-74.

70. Еременко В.Н., Найдич Ю.В. Спекание в присутствии жидкой металлической фазы. – Киев: Наукова думка, 1968. – 123 с.

71. Жанаев И.Д., Гольдберг Е.Л. Зависимость времени индукции механохимического синтеза карбида титана от интенсивности воздействия // Доклады Всесоюзной конференции «Механохимический синтез». – Владивосток: ДВГУ, 1990. – С. 61-65.

72. Задорожный А. 3D-разработка теплоотводящих систем // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 4. – С. 38-40.

73. Зельдович Я.В., Франк-Каменецкий Д.А. Теория теплового распространения пламени // Журнал физической химии. – 1938. – № 12. – Вып. 1. – С. 100-105.

74. Зыков С.Н., Ившин К.С., Коротаева Н.Ф., Ворончихин Н.С. Декоративно-прикладное искусство с применением технологий быстрого прототипирования // Вестник Удмурдского университета. – 2007. – № 12. – С. 145-150.

75. Иванов Е.Ю. Синтез метастабильных интерметаллидов и твердых растворов с высокой реакционной способностью в условиях механического сплавления: Автореф. дис. ... док. хим. наук. – Киев, 1991. – 43 с.

76. Иванченко В.Г., Погорелая В.В. Формирование структуры эвтектических сплавов хрома с карбидом титана // Металлофизика, 1992. – Т. 13. – № 2. – С. 30-37.

77. Ильин А.А., Гаранин С.В., Кошкин В.В., Филатов А.А. Опыт использования технологии прототипирования для изготовления деталей авиационных агрегатов // Литейное производство. – 2007. – № 6. – С. 39-41.

78. Интервью генерального директора компании ООО «АП-Проект» А. Петрова «От идеи до детали — за несколько дней!» // Пластикс. – 2011. – № 4 (98). – С. 36.

79. Кодолов В.И., Липанов А.М. Кластерные системы и технологии быстрого моделирования и прототипирования // Сборник трудов по материалам научных молодежных школ «Кластерные системы и материалы. Новые высокие технологии быстрого моделирования и прототипирования». – Ижевск, 1997. С. 7-15.

80. Колтыгин А.В., Горбузова И.В., Абрамова Т.И., Баженова В.Е. Материал Z-cast, используемый для производства форм методом трехмерной печати // Литейное производство. – 2010. – № 6. – С. 30-31.

81. Компания Raymor. Интернет-сайт компании Raymor. URL: www.raymor.com.

82. Компания НЕТРАМ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.netramm.com>.

83. Кочанов Д.И. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения // РИТМ. – 2010. – № 8 (56). – С. 16-21.

84. Кузнецов В. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. – № 4 (13). – С. 2-7.

85. Ларионов Л.Н., Фалоченко В.М., Мазанко В.Ф. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов // Доклады АН СССР, 1975. – Т. 221. – № 5. – С. 1073-1075.

86. Левинский Ю.В., Кюбарсепп Я.П., Петров А.П. Карбидо-стали на основе карбида титана из стружки титановых сплавов // Порошковая металлургия. – 1993. – № 10. – С. 78-82.

87. Любимов В.Д., Тимощук Т.А. Некоторые особенности начальных стадий структурообразования твердых сплавов на основе карбонитрида титана // Порошковая металлургия. – 1991. – №12. – С. 29-35.

88. Мареев Д.В., Челпанов И.Б. Перспективы развития технологии и конструкции мехатронных установок быстрого прототипирования путем интеграции обрабатывающего и сканирующего модулей // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2012. – Вып. 1,2 (43). – С. 197-200.

89. Марков В.А., Мальцев А.К. Использование ЛОМ-технологии при подготовке производства отливок // Ползуновский альманах. – 2003. – № 4. – С. 43-46.

90. Марченко А.П., Кесарийский А.Г. Лазерно-интерференционные технологии в современных системах разработки ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 2. – С. 131-135.

91. Мержанов А.Г. Новые явления при горении конденсированных систем // Доклады АН СССР. – 1973. – Т. 208. – № 4. – С. 892-894.
92. Мержанов А.Г. Проблемы горения в химической технологии и металлургии // Успехи химии. – 1976. – Вып. 5. – Т. 45. – С. 827-848.
93. Мержанов А.Г. Проблемы технологического горения.// Процессы горения в химической технологии и металлургии // ИХФ АН СССР. – Черниголова, 1975. – С. 194-208.
94. Мержанов А.Г., Боровинская И.П. СВС в химии и технологии тугоплавких соединений // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1979. – Т. 24. – № 3. – С. 223-227.
95. Мержанов А.Г., Боровинская И.П. СВС тугоплавких неорганических соединений // Доклады АН СССР. – 1972. – Т. 24. – № 2. – С. 366-369.
96. Минаев А.А. О закономерностях развития современного литейного производства // РИТМ. – 2010. – № 3 (51). – С. 26-30.
97. Монахова В.П., Терентьев В.В., Яковлев А.А. Проектирование узлов ГТД при использовании возможностей стереолитографии для получения модельных образцов // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14. – № 3 (38). – С. 144-150.
98. Мэллой Р.А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / пер. с англ. под ред. В.А. Брагинского, Е.С. Цобкалло, Г.В. Комарова. – СПб.: Профессия, 2006. – С. 323-372.
99. Неверов В.В., Буров В.Н. Условия образования соединений при механической активации // Известия СО АН СССР. – 1979. – № 9. Серия хим. наук, вып. 4. – С. 33.
100. 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.

101. Попович А.А. Механохимический синтез тугоплавких соединений. – Владивосток: ДВГТУ, 2003.

102. Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Рудницкий С.В., Алферов А.И., Родионов В.И., Монастырский В.П. Применение CALS-технологий в литейном производстве ФГУП «ММПП «Салют» // Литейное производство. – 2007. – № 8. – С. 6-8.

103. Попович А.А. Сравнительная оценка механохимического синтеза тугоплавких соединений с позиции теории теплового взрыва // Доклады Всесоюзной конференции «Механический синтез». – Владивосток: ДВГУ, 1990. – С. 41-49.

104. Попович А.А. Формирование фазового состава тугоплавких соединений при механическом синтезе // Известия вузов. Черная металлургия. – 1992. – № 5. – С. 58-60.

105. Попович А.А., Василенко В.Н., Рева В.П. Кинетика механохимического синтеза ультрадисперсных порошков тугоплавких соединений // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по физикохимии ультрадисперсных систем. – Рига, 1989. – АН СССР ИХФ, 1989. – С. 212.

106. Попович А.А., Разумов Н.Г., Силин А.О., Гюлиханданов Е.Л., Аношкин И.В., Насибулин А.Г., Kauppinen E.I. Механохимический синтез высоколегированных порошковых сплавов системы Fe-Cr-Ni-Mn-N // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. – № 1. – С. 18-22.

107. Попович А.А., Рева В.П., Аввакумов Е.Г., Василенко В.Н. Применение механохимической активации для инициирования СВС тугоплавких соединений // Труды VI Всесоюзной школы-семинара «Теория и практика СВС-процессов». – ИХФ АН СССР. Черниголовка, 1989. – С. 26-28.

108. Попович А.А., Рева В.П., Василенко В.Н. Механохимический синтез карбида титана в условиях предотвращения теплового

взрыва // Механохимический синтез: Доклады Всесоюз. науч.-тех. конф. – Владивосток: ДВГУ, 1990. – С. 219-226.

109. Попович А.А., Рева В.П., Махлярчук А.А., Коваленко Л.В. Механохимический синтез карбидов и карбидонитридов // Дезинтеграторная технология. Тезисы докладов V Всесоюзного семинара. Таллинн // Научно-производственное объединение «Дезинтегратор», 1987. – С. 64.

110. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсно-упрочненные материалы. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.

111. Релушко П.Ф., Берестицкая И.В., Москвин В.В. и др. Механохимическое сплавление высокодисперсных порошков железа. – Черногоровка, 1989. – С. 187-188.

112. Роман О.В., Аруначалама В.С. Актуальные проблемы порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1990. – 232 с.

113. Семенов Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов // Успехи физических наук. – 1940. – Т. 23. – Вып. 3. – С. 251-292.

114. Середа Н.Н., Ковальченко М.С. и др. Особенности структуры твердых сплавов на основе карбида титана // Порошковая металлургия. – 1985. – № 11. – С. 98-108.

115. Скаков Ю.А. Затвердевание в условиях сверхбыстрого охлаждения и фазовые превращения при нагреве металлических стекол // Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. – М.: ВИНТИ, 1980. – Т. 13. – С. 3-78.

116. Слюсар В. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования // Электроника: наука, технологии, бизнес. – 2003. – № 5. – С. 54-60.

117. Слюсар В. Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант // Конструктор. – 2002. – № 1. – С. 5-7.

118. Слюсар В.И. Микропланы: от шедевров конструирования – к серийным системам // Конструктор. – 2001. – № 2. – С. 23-25.

119. Сузуки К. Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987. – 546 с.

120. Тринева Т.Л. Rapid Prototyping (RP). Технологии получения твердотельных 3D CAD-моделей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 6 (12). – С. 37-40.

121. Туманов В.И. Влияние легирования на структуру и свойства сплавов карбид вольфрама-кобальт.: Автореф. дис....канд. тех. наук. – Киев, 1965. – 16 с.

122. Турищев В. Новые технологии в ЛВМ // CADmaster. – 2007. – № 2. – С. 68-69.

123. Уракаев Ф.Х. Теоретическая оценка импульсов давления и температуры на контакте трущихся частиц в диспергирующих аппаратах // Известия СО АН СССР. – 1978. – № 7. Серия хим. наук, вып. 3. – С. 5-10.

124. Федорченко В.В., Швейкин Г.П. Исследование взаимодействия карбида титана с никелем // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1977. – Т. 13. – № 7. – С. 1316-1319.

125. Федотов А.В. Новые технологии порошковой металлургии // Материалы в машиностроении. – 2012. – № 1 (76). – С. 53-56.

126. Хайнике Г. Трибохимия. – М.: Мир, 1987. – 582 с.

127. Хайнике Г., Бок Н. О трибохимическом приготовлении карбонила никеля и его техническом использовании при изготовлении формовочных инструментов // Материалы V Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. – Таллинн, 1977. – С. 39-77.

128. Хейфец М.Л. Алгоритмы процессов послойного синтеза изделий сложной формы из композиционных материалов // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2009. – Вып. 7. – С. 257-273.

129. Чернышев А.В., Демихов К.Е., Насибуллин С.Р., Пугачук А.С. Разработка вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования с применением технологии быстрого прототипирования //

Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2011. – № 3. – С. 3-15.

130. Шабров Н.Н. Реальные достижения виртуальной реальности // Rational Enterprise Management. – 2011. – № 2. – С. 46-48.

131. Шатульский А.А., Шаповалова М.А. Применение методов прототипирования для изготовления изделий машиностроения // Science intensive technologies in mechanical engineering. – 2011. – № 1. – С. 24-29.

132. Шелимов К.Е., Бутягин П.Ю. О взрывном механохимическом синтезе карбидов, боридов и силицидов // Тезисы докладов XI Всесоюзного симпозиума по механохимии, Чернигов, 1990. – АН СССР ИХФ. Москва, 1990. – Т. 1. – С. 42-45.

133. Шишковский И.В. Перспективы быстрого прототипирования для изготовления моделей и литейных форм // Литейное производство. – 2010. – № 6. – С. 23-29.

134. Шкиро В.М., Боровинская И.П. Капиллярное растекание жидкого металла при горении смесей титана и углерода // Физика горения и взрыва. – 1976. – № 6. – С. 945-948.

135. Юдин Е.Г., Кузьмин П.К., Норенков И.П. Этапы жизненного цикла сложных промышленных изделий в концепции CALS-технологий // Вестник МГТУ. – Сер. Приборостроение. – 2002. – № 1. – С. 3-21.

136. Юрченко Ю.Г., Колосветов Ю.П., Княжева В.М. и др. Исследование условий получения и определение некоторых свойств карбонитрида хрома и композиционных материалов на его основе // Тугоплавкие соединения. Получение, структура, свойства и применение. – Киев: Наука думка. – 1993. – С.141-144.

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.

Израиль Objet Geometries Ltd., www.objet.com.

Ирландия Mcor Technologies, www.mcor technologies.com.

Италия CRP Technology, www.crp technology.com.

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

DWS, www.dwssystems.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.

Южная Корея 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

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 - аббревиатура Additive fabrication.

AM – аббревиатура 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 XML (Extensible Markup Language – расширяемый язык разметки) и поддерживает размерности, цвета, текстуры, 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 текущим сечением CAD-модели, например, путем спека-

ния, 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 полимеров 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 РИМ-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-автомата), 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 по-

рошка) непосредственно в то место, где в данный момент времени происходит процесс послойного синтеза.

Directed energy deposition – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно в место 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);

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).

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

Fcubic – название одной из аддитивных технологий и компании, ее 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 происходит спекание обработанной указанным составом модели, тогда как не обработанная часть материала остается не спеченной.

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

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 АМ-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.

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

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

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

Lithoz – компания-разработчик АМ-технологии LCM- Lithography-based Ceramic Manufacturing (Австрия); технология предполагает фотосинтез грин-модели изделия из жидкого фотополимера с высо-

ким содержанием керамической компоненты с последующим спеканием грин-модели в печи.

Material extrusion – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством экструзии пластифицированного тем или иным способом строительного материала.

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

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

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.

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

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 тех-

нологий, предполагающих использование в процессе построения не только аддитивных процессов, например, фрезерования.

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

Objet Geometry – компания-производитель АМ-машин (Израиль), работающих по технологии PolyJet.

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

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, похожими на литье пластмасс в термопласт-автоматах. Подразделяются на CIM-технологии (Ceramic Injection Molding) и MIM-технологии (Metal Injection Molding).

PolyJet – 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 CAD-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 еще употребляющееся название аддитивных технологий.

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

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, работающих по DMD-технологии (США).

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

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

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.

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

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

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) путем газовой атомизации расплава и осаждения распыливаемого металла на подложку.

Steriolithography – слереолитография (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.

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, находяще-

гося в открытой ванне в рабочей камере АМ-машины, посредством светового воздействия, например, лазером.

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

VIM – Vacuum Induction Melting, вакуумная индукционная плавка, процесс, используемый для вакуумного литья жаропрочных и реактивных металлов, а также для получения металлопорошковых композиций путем газовой атомизации.

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

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Основные параметры машин для послойного синтеза из металлопорошковых композиций

Модель	Рабочая зона, мм	Шаг построения, мкм	Мощность, Вт	Производитель- ность, см ³ /ч	Модельные материалы*
Concept Laser					
Mlab	50x50x80 70x70x80 90x90x80	20-80	50 100	1-5	Н.с. 316L и 17-4PH, и.с. H13, Al, Co-Cr, Ti, Inconel, Cu, Au, Pt, Ag
M1 (для не реактивных ме- таллов)	250x250x250	20-80	200	2-10	Н.с. 316L и 17-4PH, и.с. H13, Ni, Co-Cr, Au, Pt, Cu, Ag
M2 (для реактивных метал- лов)	250x250x280	20-80	200 400	2-20	Н.с. 316L и 17-4PH, и.с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel, Cu, Au, Pt, Ag
M3 linear (с лазерной маркировкой)	300x350x300	20-80	200 400	2-20	Н.с. 316L и 17-4PH, и.с. H13, Cr, Ni, V, Co, Au, Pt, Cu, Ag
X line 1000R	630x400x500	30-200	1000	10-100	Н.с. 316L и 17-4PH, и.с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel 718 и 625, Cu, Au, Pt, Ag
EOS					
EOSINT 280	250x250x325	20-60	200 400	10-20	Н.с. 316L, Al, Fe, Co-Cr, Ni, Ti, Inconel
Phenix Systems					
PXS	100x100x80		50	1-5	Н.с., м.с., Inconel, керамика
PXM	140x140x100		300	5-10	
PXL	250x250x300		500	10-15	
SLM Solution					
SLM 125	125x125x75	20-75	100 200	10-15	Н.с. 316L, и.с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel, Au

Модель	Рабочая зона, мм	Шаг построения, мкм	Мощность, Вт	Производитель- ность, см ³ /ч	Модельные материалы*
SLM 250	250x250x350	20-75	200 400	10-15	Н.с. 316L; и.с. H13; Ti; Al; Co-Cr; Inconel
SLM 280	280x280x350	20-200	400+1000	20-35	
SLM 500	500x280x325	20-200	400+1000	60-70	
Realiser					
SLM 50	Ø70x40	20-50	20-120	5-10	Н.с. 316L, Ti, и.с. H13; Ti6Al4V, Co-Cr, Au
SLM 100	125x125x100	20-100	20-200	10-15	
SLM 250	250x250x300	20-100	400 600	10-15	и.с. 316L, и.с. H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel
Renishaw					
AM 125	125x125x125	20-100	100 200	5-10	Н.с. 316L и 17-4PH, и.с. H13, Ti, Al, Co- Cr, Inconel
AM 250	250x250x300; 250x250x360	20-100	200 400	5-20	
Arcam					
A1	200x200x180	50-100	50–3500	55-80	Ti, Co-Cr, Inconel
A2	200x200x350; Ø300x200	50-100	50–3500	55-80	
3D Systems					
sPro 60	380x330x457	100-200	50-100	10-15	Н.с.316L+бронза
sPro 140	550x550x460	100-200	100-200	15-20	
sPro 230	550x550x750	100-200	100-200	15-20	
ExOne					
M-Lab	40x60x35	min 50	100-150	н/д	Н.с.316L+бронза; и.с.420L+бронза; стекло
M-Flex	400x250x250	min 100	100-150	н/д	
M-Print	780x400x400	min 100	100-150	1780	

Модель	Рабочая зона, мм	Шаг построения, мкм	Мощность, Вт	Производитель- ность, см ³ /ч	Модельные материалы*
Matsuura					
Lumex Avance-25	250x250x185	20	400	н/д	и.с. H13
* н.с. – нержавеющая сталь; м.с. – мартенситностареющая сталь; и.с. – инструментальная сталь; Inconel – жаропрочные сплавы Инконель 625 и 718; н/д – нет данных					

Таблица 2

Основные параметры машин для послойного синтеза из металлопорошковых композиций

Модель	Размеры зоны построения, мм	Источник энергии, мощность, Вт.	Толщина слоя, мм	Производи- тельность, см ³ /ч	Модельные материалы
Optomec					
LENS 750	300x300x300	500; 1000; 2000	0,3-1,0	30-100	CP Ti, Ti-64
LENS MR-7	300x300x300	500	0,3-1,0	30-100	6264; и.с.: H13, A2, S7; н.с.: 304, 316, 420, 17-4 PH; Инконель 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	863 x 863 x 609	1000-5000	0,2-1,2	20-150	и.с. H13, S7; 420SS, 316SS; CPM1V, CPM10V; Cermets, C250, C276; Inconel 625, 718; Waspalloy; Invar; стеллиты - 6, 21, 31; Ti, Ti-6Al-4V
DMD103/105D	300 x 300 x 300	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
DMD 44R (Robotic DMD)	1950 x 2140 x 330°	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
DMD 66R (Robotic DMD)	3200 x 3665 x 360°	1000-5000	0,2-1,2	20-150	

Модель	Размеры зоны построения, мм	Источник энергии, мощность, Вт.	Толщина слоя, мм	Производительность, см ³ /ч	Модельные материалы
DMD IC106 (Robotic Inert chamber m/c)	800 (31.5) reach, 6-axis robot	1000-5000	0,2-1,2	20-150	
Irepa Laser (BeAM)					
VC LF200 (LF300, LF500)	400x350x200	300-500	0,1-0,3	0,5-4,0	н.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	950 x 900 x 500	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 (3)					
MX-3	1000x800x650	500-1000	н/д	н/д	P20, P21, H13, D2, 304, 316, and 420 steels; CP Ti, Ti-6-4; Инконель 600, 625, 690, 713, 718, 738; Hastelloy X; Ni, Co-Cr, слеттиты 6, 21
MX-4	450 x 450 x 350		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, Inconel, 316L
* н.с – нержавеющая сталь; и.с. – инструментальная сталь; Inc. – Inconel (Инконель); CpTi – чистый титан; Ni-Base – сплавы на основе Ni					

Таблица 3

Результаты сравнительных измерений поверхностей (предоставлено СПбГПУ)

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 (3D Systems)	Accura Xtreme	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 (3D Systems)	Duraform 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 HL (SLM Solutions)	AlSi10Mg	8,12	8,63	43,3	39,1	10,76	3,55	39,2	14,2
DLP	Ultra (Envision Tec)	SI500	0,53	0,55	3,87	2,26	1,44	1,36	5,4	6,6
PolyJet	Eden 250 (Objet)	DurusWhite	0,89	3,98	3,68	17,8	2,41	6,18	8,5	29,3
		TangoGray	0,22	1,3	1,08	7,9	1	1,02	16,6	11,7
		FullCure720	1,39	2	6,76	11,3	2,01	3,06	6,2	13,4
		VeroBlue	1,82	1,94	6,61	9,42	2,2	2,39	12,9	13,3
		TangoPlus*	2,18	2,81	15	18,3	2,36	6,61	9,4	23,9
		VeroBlack	1,17	2,64	5,02	14,1	1,8	4,91	8,2	20,8
		VeroGray	0,9	2,36	4,03	10,9	2,28	5,26	16,8	18,1
		TangoBlack	1,18	3,14	7,79	18,1	2,55	8,62	6,8	36,4

Технология	АF-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
		Plus*								
		VeroWhite	1,39	4,33	7,75	23,3	0,62	8,46	5,2	43
		TangoBlack*	1,54	2,11	1,34	12,1	0,69	6,93	0,9	45,5
InkJet	Invision XT (3D Systems)	VisiJet EX200	2,55	9,38	11,9	46,1	0,91	6,12	3,7	19,5
LOM	SD300 (Solido)	PVC	0,06	5,25	0,52	24,9	0,06	5,25	0,41	4,14

Таблица 4

Порошковые композиции, поставляемые компаниями-производителями АМ-машин

Производитель АМ-машин	Фирменное обозначение	Стандарты Европы	Стандарты США
Concept Laser			
Нержавеющая сталь	CL 20ES	1.4404	316L
Инструментальная сталь (Cr>12%)	CL 90RW	1.2083	
Инструментальная сталь	CL 91RW		
Мартенситностареющая сталь	CL 50/60WS	DIN 1.2803 1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Алюминиевый сплав AlSi12	CL 30AL	ISO AlSi12	AA 4047 ASTM A04130
Алюминиевый сплав AlSi10Mg	CL 31AL	ISO 3522	A03600
Титановый сплав Ti6Al4V ELI	CL 40TI ELI		ASTM F136

Производитель АМ-машин	Фирменное обозначение	Стандарты Европы	Стандарты США
Титановый сплав 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			
Алюминиевый сплав AlSi10Mg	Aluminium AlSi10Mg	ISO 3522	A03600
Сплав кобальт-хром-молибден (CoCrMo), биосовместимый	CobaltChrome MP1	ISO 5832-4 ISO 5832-12 UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
Сплав кобальт-хром	CobaltChrome SP1	ISO 5832-4; ISO 5832-12 UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
Мартенситностареющая сталь	MaragingSteel MS1	1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Инконель 625	NickelAlloy IN625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G
Никелевый сплав Inconel 718	NickelAlloy IN718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
Нержавеющая сталь	StainlessSteel GP1	1.4542	17-4 PH
Нержавеющая сталь	StainlessSteel PH1	DIN 1.4540	UNS S15500
Титановый сплав Ti6Al4V	Titanium Ti64	ISO 5832-3	ASTM F1472
Титановый сплав Ti6Al4V ELI (extra-low interstitials)	Titanium Ti64 ELI	ISO 5832-3, UNS R56401	ASTM F136
Phenix Systems			
Нержавеющая сталь	ST4404D	1.4404	316 L
Мартенситностареющая сталь	ST2709B	1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Сплав Co-Cr	ST2724G	ISO 5832-4	

Производитель АМ-машин	Фирменное обозначение	Стандарты Европы	Стандарты США
SLM Solution			
Коммерчески чистый титан	CP Titanium	ISO 5832-2; UNS R50400	ASTM Grade 2
Титановый сплав Ti6Al4V	Ti6Al4V	ISO 5832-3	ASTM F136; ASTM F1472
Титановый сплав TiAl6Nb7	TiAl6Nb7	ISO 5832-11	ASTM F1295
Мартенситностареющая сталь	1.2709	1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Нержавеющая 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 Al3560
	AlSi9Cu3	ISO AlSi9Cu3	
	AlMg4,5Mn0,4	ISO 5182	
Сплав кобальт-хром	Co212-f		ASTM F75
Инконель	Inconel 625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G
	Inconel 718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	AMS 5662, AMS 5664
	Inconel HX	2.4665	
Realizer			
Мартенситностареющая сталь	Tool steel H13	DIN 1.2803 1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Коммерчески чистый титан	CP Titanium	ISO 5832-2 UNS R50400	ASTM Grade 2
Титановый сплав	Titanium V4	ISO 5832-3	ASTM F136

Производитель АМ-машин	Фирменное обозначение	Стандарты Европы	Стандарты США
			ASTM F1472
Алюминий	н/д	н/д	н/д
Сплав Co-Cr	Cobalt chrome	ISO 5832-4 ISO 5832-12 UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
Нержавеющая 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

Таблица 5

Номенклатура порошков компании *LPW Technology* для применения в АМ-машинах

Металлопорошки	Сплав	Химический состав	Стандарты					
			UNS	ASTM	ISO	AMS	DIN	Аналог
Металлопорошки на основе Ni и Co								
LPW CoCr-1LC + LPW CoCr-2LC	CoCrMo	max – C 0,16; Mn 1,0; Si 1,0; Cr 27,0-30,0, Ni 0,50; Mo 5,0-7,0; Fe 0,75; S 0,010; max – P 0,020; Al 0,10; Ti 0,10; W 0,20; B 0,010; Co Bal	31537	F1527, F75	ISO 5832-4 ISO 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	7718	B537 B670		AMS 5832, AMS 5596	2.4668	IN718

Металлопорошки	Сплав	Химический состав	Стандарты					
			UNS	ASTM	ISO	AMS	DIN	Аналог
		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						
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; Cr 20,0-23,0; S 0,015 max; Cu 0,50 max; Ni Bal	6625	446 Gr1, 443 Gr1		AMS 5599, AMS 5666	2.4856	IN625
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	ISO15156-3	AMS 5604 AMS 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		AMS 5659, AMS 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	ISO 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;	R56400	F1472,	ISO 5832-3	AMS 4954,	3.7164	Ti64

Металлопорошки	Сплав	Химический состав	Стандарты					
			UNS	ASTM	ISO	AMS	DIN	Аналог
		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		B348 gr 5		AMS 4911, AMS 4928		
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	ISO 5832-3	AMS 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, B348 gr 1	ISO 5832-2			
LPW CpTi2-2	CpTi gr 2	N 0,03 max; C 0,08 max; H ₂ 0,015 max; Fe 0,30 max; O 0,25 max; Res Each 0,1; Res Total 0,4; Ti Bal	R50400	F67, B348 gr 2	ISO 5832-2	AMS 4921 AMS 4902		
Металлопорошки на основе Al								
LPW AlSi10Mg-1	AlSi10Mg	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 0,05 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					3.2581.01	

Таблица 6

Примерные цены на некоторые металлопорошковые композиции для российского рынка

Фирмы	Ti-6Al-4V	Co-Cr	316L	Tool steel	AlSi12	CL 50/60 WS	CL20	Inconel	
								625	718
SLM Solutions	520	210	90	130	60			160	210
EOS	485	320		235	122				
Conzept Laser						150	95		
Raymor	\$235								
Sandwik Ospray								£58.35 (€71,6)	