

***В.И. КУЛИК, А.С. НИЛОВ***

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ  
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНИКИ**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

*В.И. КУЛИК, А.С. НИЛОВ*

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ  
ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ  
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНИКИ

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2018

УДК 621–024.41:629.7(075.8)  
К90

**Кулик, В.И.**

**К90** Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2018. – 160 с.

Рассмотрены основные термины быстрого прототипирования и приведены классификации и краткое описание методов аддитивного производства, а также обзор аддитивного оборудования основных фирм-изготовителей. Проанализированы перспективы применения аддитивных технологий в различных областях промышленности, особенно при изготовлении изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Предназначено для студентов машиностроительных специальностей и, в первую очередь, специалистов в области авиационной и ракетно-космической техники, кроме того, может быть полезно для широкого круга инженеров, конструкторов, технологов, чья деятельность связана с созданием новой продукции и организацией современного промышленного производства.

**УДК 621–024.41:629.7(075.8)**

**Рецензенты:** д-р техн. наук, проф. СПбПУ Петра Великого  
*А.П. Гаршин*; канд. техн. наук, проф. БГТУ *Г.А. Воробьева*

*Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета*

© Авторы, 2018  
© БГТУ, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

В последние три десятилетия произошло становление и активно развиваются технологии быстрого прототипирования (Rapid Prototyping), еще известные как «Твердотельное производство» (Solid Freeform Fabrication), «Настольное производство» (Desktop Manufacturing) или «Послойные аддитивные технологии (АТ)» (Layer Additive Manufacturing Technologies). Последнее определение (послойное) аддитивного производства (АП) наиболее полно отражает смысл процесса.

Интенсивность их развития не имеет аналогов, при этом внедрение их промышленностью называют не иначе как «Третьей индустриальной революцией». Эти технологии принципиально изменили этапы проектирования и конструирования изделий, превратив их в процессы непрерывного создания изделий. Конечно, еще много нерешенных задач в области производительности аддитивных процессов, точности производимых изделий, материалов, используемых для изготовления изделий, но все эти проблемы решаемы. А главное в том, что уже современное проектирование и производство изделий немислимо без аддитивных технологий, например, 3D-принтеры стали такими же привычными и распространенными, как персональные компьютеры.

Модели создаются путем наслаивания вещества, и при малой толщине слоя они очень близки к своему прототипу. Обычно толщина слоев в АП  $\sim 0,1$  мм, и этого оказывается достаточно для широкого практического применения прототипов: в электронике, моделировании и производстве продуктов потребления, ювелирной промышленности, авто- и авиастроении и т.д. Во многих отраслях, например, для ряда изделий в ракетно-космической отрасли, альтернативы аддитивным технологиям уже сегодня нет.

Сейчас АП стало мощным инструментом в машиностроении и практически отдельной отраслью промышленности. Разрабатываются инновационные процессы, позволяющие создавать модели со все более высокой точностью, скоростью, с уникальными свойствами и с новыми экономическими преимуществами. Другими словами, АП – это совокупность методик (технологий), позволяющих создавать

трехмерные изделия в едином технологическом процессе по данным компьютерных моделей.

Развиваемые разными фирмами-производителями аддитивные техно-логии могут носить различные названия (запатентованные фирмами), но при этом оставаться примерно идентичными по физическим принципам процесса формования. Кроме того, следует учитывать, что некоторые технологии либо не нашли еще широкого применения в промышленности, либо оказались экономически несостоятельными по сравнению с применяемыми в настоящий момент в аддитивных машинах.

## **1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Разработка нового вида изделия – длительный и трудоемкий процесс, требующий нескольких этапов проектирования и оценки до начала массового выпуска. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают внедряющиеся во всем мире методы 3-мерного компьютерного моделирования. Современные системы компьютерного проектирования (CAD) также позволяют значительно сократить затраты времени и средств на разработку и конструирование новых изделий. Однако проблема изготовления первого физического образа и даже отдельной детали для изделия сколько-нибудь сложной формы остается наиболее узким местом, поскольку разработка технологии изготовления детали и соответствующей оснастки зачастую требуют затрат, сопоставимых со стоимостью разработки самого изделия.

В процессе работы над новым проектом, особенно на стадии комплексного проектирования, трудно выявить различные ошибки и недостатки только на экране дисплея. Имея реальную физическую модель будущего изделия, можно обнаружить и устранить различные ошибки, скорректировать пути продолжения процесса проектирования. Прототип изделия можно использовать в качестве концептуальной модели для визуализации и анализа конструкции. Он позволяет конструкторам выполнить доработку и провести некоторые функциональные тесты, а также может служить мастер-моделью для изготовления инструментальной оснастки. Кроме того, прототип может использоваться в маркетинговых целях или при определении стоимости изготовления.

Контрольные модели уменьшают затраты на проектирование и подготовку производства за счёт выявления возможных ошибок на

ранних стадиях и усиливают связь и взаимопонимание между проектировщиками и заказчиками, сокращая время выхода продукта на рынок.

Именно поэтому, в конце 80-х гг. XX в. начали интенсивно развивать технологии формирования трехмерных объектов не путем удаления материала (точение, фрезерование, электроэрозионная обработка) или изменения формы заготовки (ковка, штамповка, прессовка), а путем постепенного наращивания (добавления) материала или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства. На данный момент значительного прогресса достигли технологии послойного формирования трехмерных объектов по их компьютерным моделям.

Аддитивные технологии (от английского Additive Fabrication (AF)) – 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.

Послойный синтез предполагает построение 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.), полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения.

При использовании AF-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 «бесбумажным» технологиям, когда для изготовления детали традиционная бумажная чертежная документация в принципе не требуется.

Суть Additive Fabrication (AF) может быть проиллюстрирована простым примером: CAD-модель → AF-машина → деталь (рис. 1.1).

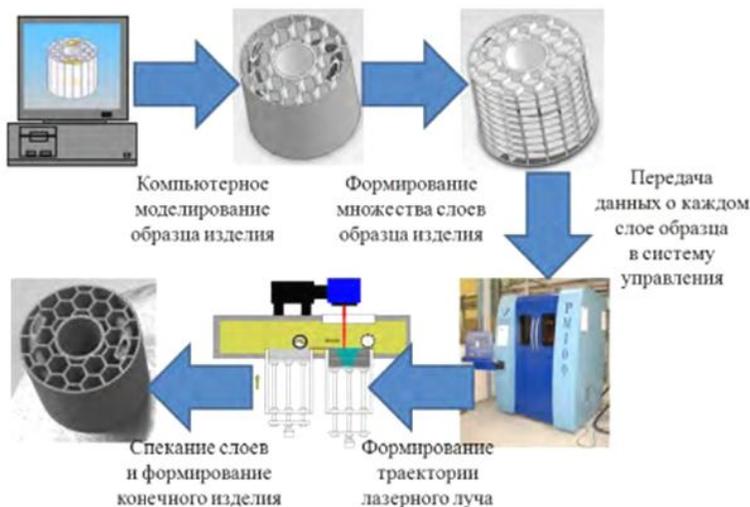


Рис. 1.1. Одна из типовых схем реализации аддитивной технологии

В настоящее время существует уже более 30 различных типов аддитивных технологических процессов. Основные преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными:

- сокращение сроков и стоимости запуска изделия в производство благодаря отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке;
- возможность и экономическая целесообразность мелкосерийного производства;
- оперативные изменения в проекте на этапе производства;
- функциональная оптимизация продукции (например, формы каналов охлаждения);
- улучшенные и стабильные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки;
- мобильность производства и ускорение обмена данными;

- возможность изготовления изделий со сложной геометрией;
- экономическая целесообразность производства кастомизированной\* продукции;
- сокращение потерь и отходов производства;
- возможности для упрощения логистики, сокращения времени поставок, уменьшения объемов складских запасов;
- персонализация дизайна и др.

Эффективность применения аддитивных технологий можно увидеть на примере сравнения технологий получения детали методом литья под давлением и с помощью 3D-технологий (рис. 1.2–1.4), в котором приведены сравнительные показатели получения деталей литьем под давлением в литейные формы, изготовленных по традиционной технологии механической обработки, и методами аддитивной технологии по маршрутной технологии, требуемому оборудованию и рабочему персоналу соответственно.



Рис. 1.2. Сравнение маршрутной технологии получения детали методами литья под давлением и по аддитивной технологии

Результаты сравнения:

1. Время производства с помощью аддитивных технологий сокращается до 95% (изготовление литейных пресс-формы занимает до 1 года) по сравнению с традиционными технологическими процессами.
2. Отсутствие «вредного производства», что снижает выплату налогов, сокращение финансов на поддержку такого производства.

\* Кастомизация – индивидуализация продукции под заказы конкретных потребителей путем внесения конструктивных или дизайнерских решений.

3. Количество используемого оборудования гораздо меньше, что сказывается на стоимости его обслуживания, содержании специалистов группы главного механика.
4. Освобождение используемых площадей.
5. Затраты электрической и тепловой энергии меньше на порядок.
6. Не применяется инструмент для механической обработки, что также экономит значительные средства.

Обработка центр	<b>3-D принтер</b>
Печь для калки	
Печь для нормализации	
Гальваническая ванна	
Станочные приспособления	
Шлифовальная машина	
Термопласт автомат	

Дополнительные технологические факторы, влияющие на стоимость

Инструмент	Нет
СОЖ	
Технологические маршруты, средства перемещения	

Рис. 1.3. Сравнение станочного парка и оснастки при получении детали методами литья под давлением и по аддитивной технологии

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

Под «вычитающими» технологиями подразумевается механообработка – удаление («вычитание») материала из массива заготовки. Таким образом, сообщество американских инженеров прибегло к понятию (subtractive) «вычитание», чтобы определить новое понятие (additive) «добавление». Уже в самом определении «аддитивные тех-

нологии» трактуются как противоположность технологиям механообработки, но не все технологии соединения материала, а только те, которые создают объект по данным 3D-модели или из CAD-данных, т.е. на основе трёхмерной компьютерной модели. Это второе ключевое слово – CAD. Третье ключевое слово здесь – «послойно». Можно отметить, что американцы используют в определении термина слово «usually» (обычно), по-видимому, допуская, по меньшей мере, теоретическую возможность и непослойного построения.

Конструктор детали	Конструктор детали
Технолог основного производства	Оператор 3D принтера
Конструктор отдела подготовки производства	Технолог
Технолог вспомогательного производства	Экономист-нормировщик
Технолог станков с ЧПУ	Контролер
Оператор станка с ЧПУ	
Контролер вспомогательного механического производства	
Слесарь-доводчик	
Технолог литейного производства	
Оператор печи отжига	
Оператор гальванической ванны	
Транспортировщик	
Оператор термопласт автомата	
Экономисты литейного, вспомогательного, основного производства	
Нормировщики литейного, вспомогательного, основного производства	
Контролеры литейного, основного и гальванического производства	

Рис. 1.4. Сравнение численности рабочего персонала для реализации процессов получения детали методами литья под давлением (слева) и по аддитивной технологии (справа)

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

Термины «прототипирование» или «Rapid Prototyping», т.е. «быстрое прототипирование» рекомендовано изъять из обращения, поскольку прототипирование – это лишь одно из разновидностей (составляющих) аддитивных технологий, уже далеко не доминирующее.

В настоящий момент как в мире, так и в России устоявшаяся классификация аддитивных технологий пока не принята. Организация ASTM, занимающаяся разработкой отраслевых стандартов, разделяет 3D-аддитивные технологии на семь категорий.

1. **Material Extrusion** – выдавливание материала. В точку построения по подогретому экструдеру подаётся пастообразный материал, представляющий собой смесь связующего и металлического порошка. Построенная сырая модель помещается в печь для того, чтобы удалить связующее и спечь порошок, так же, как это происходит в традиционных технологиях. Эта аддитивная технология реализована под марками MJS (Multiphase Jet Solidification – многофазное отверждение струи), FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование методом послойного наплавления), FFF (Fused Filament Fabrication – производство способом наплавления нитей).

2. **Material Jetting** – разбрызгивание материала. Например, в технологии Polyjet воск или фотополимер по многоструйной головке подается в точку построения. Эта аддитивная технология также называется Multi Jetting Material.

3. **Binder Jetting** – разбрызгивание связующего. Например, струйные Ink-Jet-технологии впрыскивания в зону построения не модельного материала, а связующего реагента (технология аддитивного производства ExOne).

4. **Sheet Lamination** – соединение листовых материалов, представляющих собой полимерную плёнку, металлическую фольгу, листы бумаги и др. Используется, например, в технологии ультразвукового аддитивного производства Fabrisonic. Тонкие пластины из металла сваривают ультразвуком, после чего излишки металла удаляют фрезерованием. Аддитивная технология здесь применяется в сочетании с субстративной.

5. **Vat Photopolymerization** – фотополимеризация в ванне. Технология использует жидкие модельные материалы – фотополимерные смолы. Примером могут служить SLA-технология компании 3D Systems и DLP-технология компаний Envisiontec, Digital Light Procession.

6. **Powder Bed Fusion** – расплавление материала в заранее сформированном слое или последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала. В категорию Powder Bed Fusion входит многочисленная группа SLS-технологий, в которых в качестве источника тепла применяется лазер. К этой же категории относят такие технологии, как Arcam-технология, использующая электронный

луч, и технология SHS (Selective Heat Sintering), в которой источником тепла являются ТЭНы.

7. **Directed energy deposition** – прямое подведение энергии в место построения. Материал и энергия для его плавления поступают в точку построения одновременно. Рабочий орган – головка, оснащённая системой подвода энергии и материала. Энергия поступает в виде сконцентрированного пучка электронов (компания Sciaky) или луча лазера (компании POM, Optomes). Иногда головка устанавливается на «руке» робота.

В некоторых классификациях аддитивные технологии подразделяют по следующим методам:

1) *формирования слоя* (рис. 1.5);



Рис. 1.5. Классификация аддитивных технологий по методу формирования слоя: *а* – Bed Deposition; *б* – Direct Deposition

2) *фиксации слоя* (рис. 1.6);

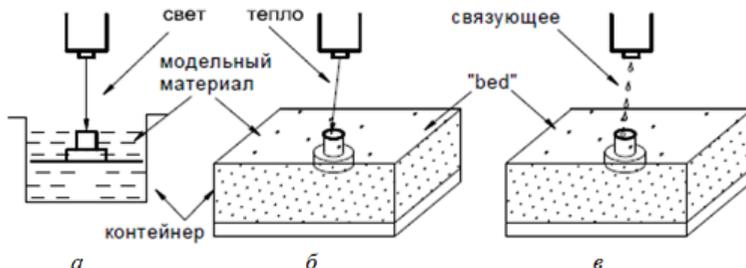


Рис. 1.6. Классификация аддитивных технологий по методам фиксации слоя: *а* – фотополимеризацией (активирующий источник – свет); *б* – сплавлением (активирующий источник – тепло); *в* – склеиванием (активирующий источник – связующее)

3) по применяемым строительным (модельным) материалам:

- жидким – фотополимеры (акриловые, эпоксидные и др.)
- сыпучим (порошки): полимеры – полиамид, полистирол, полиметилметаакрилат (ПММА), воск и др.; керамика –  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.; металлы – Al, Cu, Ti-Al, Ti-Al-V, Ag, Au, Co-Cr, Inconel, Ni-Fe, инструментальные стали и др.; композиционные материалы, например, металлокерамика Co-WC;
- нитевидные, прутковые: полимеры – АБС, полиуретан и др.; металлы (аналогичные порошковому);
- листовые, пленочные: полимеры – ПВХ-пленки и др.; металлы – металлическая фольга, листовой прокат.

4) по ключевым технологиям (лазерным, нелазерным) (рис. 1.7);

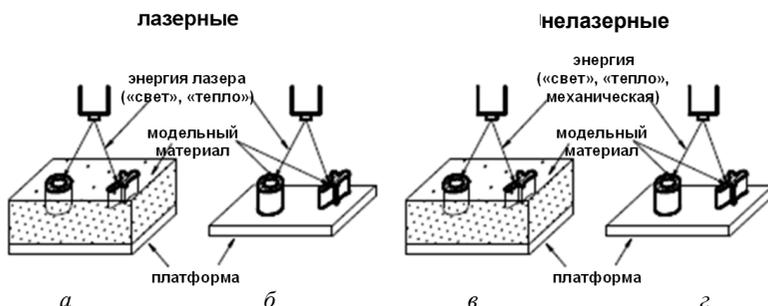


Рис. 1.7. Классификация аддитивных технологий по ключевым технологиям:

а, в – Bed Deposition; б, г – Direct Deposition

5) по методам подвода энергии для фиксации слоя построения:

- с помощью теплового воздействия,
- облучения ультрафиолетовым или видимым светом,
- посредством связующего состава и т.д.

С развитием технологических методов и оборудования, применяемого для производства деталей с помощью аддитивных технологий, приведенные классификации, очевидно, будут расширяться и дополняться. На рис. 1.8 приведена более подробная классификация аддитивных технологий с учетом физического состояния и механизма нанесения материала в процессе формирования детали.

Тем не менее, из всех перечисленных классификационных признаков следует выделить, пожалуй, первый, принципиально отличающий два вида аддитивных технологий, определяемых как Bed Deposition и Direct Deposition.

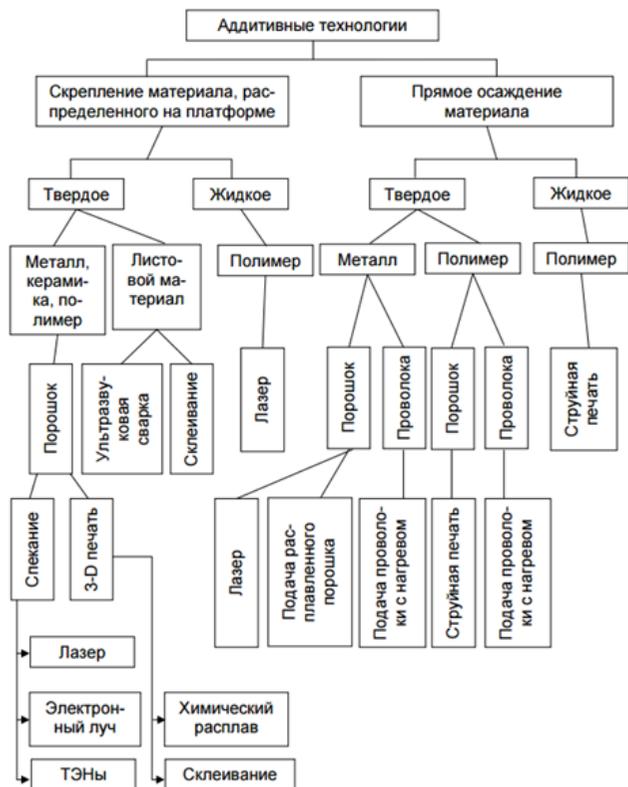


Рис. 1.8. Классификация аддитивных технологий с учетом физического состояния и механизма нанесения материала в процессе формирования детали

## 2. БАЗОВЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### 2.1. Технологии Bed Deposition

При использовании данной технологии (рис. 1.5, а) сначала формируют слой, например, насыпают на поверхность рабочей платформы дозу порошкового материала и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», чтобы слой материала был 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.

Эта технология, называемая в англоязычной традиции «Bed Deposition», предполагает наличие некой поверхности («bed»), на которой сначала формируют слой, а затем в этом слое выборочно отверждают (фиксируют) строительный материал. В процессе отверждения положение плоскости построения неизменно, при этом часть строительного материала (в данном случае – порошка) остается в созданном слое нетронутой.

Указанной технологии достаточно точно соответствует термин «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание» (SLS – Selective Laser Sintering), если «отверждающим» инструментом является лазер, который здесь, в отличие от лазерной стереолитографии (SLA-технологии), применяется в качестве источника тепла, а не ультрафиолетового излучения. После завершения построения платформа «bed» перемещается в вертикальном направлении (вниз) на величину шага построения, и на ней формируют новый слой, далее процесс повторяется до полного построения модели.

К Bed Deposition, кроме SLS-(компания ExOne, 3D Systems, VoxelJet) и SLA-технологий (компания 3D Systems), относят созданные и развиваемые одними или несколькими фирмами-производителями оборудования для реализации аддитивных технологий, такие известные технологии, как:

- SLM – Selective Laser Melting (компания SLM Solutions, Германия);
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering (компания EOS, Германия);
- EBM – Electron Beam Melting (компания Arcam, Швеция);
- Laser Cusing (компания Concept Laser, Германия);
- Ink-Jet или Binder Jetting (компания ExOne, 3D Systems, США);
- DLP – Digital Light Procession (компания Envisiontec, США);
- SGC – Solid Ground Curing (компания EnvisionTEC, Германия);
- SHS – Selective Heating Sintering (компания Blueprinter, Дания);
- UAM – Ultrasonic Additive Manufacturing, Fabrisonic (компания Solidica, США);
- LOM – Laminated Object Manufacturing (компания Mcor, Ирландия; Kira, Япония).

При этом следует учитывать, что желание компаний выделиться среди других на рынке привело к тому, что практически одинаковые способы производства носят разные названия. Сегодня практически одинаковыми машинами, в плане способа производства, обладают такие компании, как Concept Laser (Германия); EOS (Германия); Phe-

nix Systems (Франция); Realizes (Германия); Renishaw (Великобритания); SLM Solutions (Германия); 3D Systems (США).

Поскольку наиболее емко описывающая процесс аббревиатура SLM (Selective Laser Melting – выборочная плавка металла) уже занята фирмой SLM Solutions, другие компании стали совершенствовать и патентовать схожие технологии: LaserCUSING, DMLS, SLS.

При этом следует отметить, что выбор мощности лазера (в тех технологиях, где он используется) влияет на скорость и качество 3D-печати, которые обратно пропорциональны друг другу. То есть, чем выше скорость (мощность лазера), тем ниже качество. Добиться идеального соотношения – это и есть ноу-хау каждой компании. Для повышения качества изделия плавление в камере происходит с минимальным участием кислорода, так в машинах EOS применяют газы: азот и аргон.

В рамках технологий Bed Deposition могут использоваться различные типы строительных материалов: жидкие, сыпучие, прутковые, листовые.

### ***2.1.1. Аддитивные технологии на основе жидкостных строительных материалов***

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

Основа стереолитографии – локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход «жидкость – твердое тело») в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Суть фотополимеризации состоит в создании с помощью иницилирующего (в данном случае лазерного) излучения в жидкой реакционноспособной среде активных центров (радикалов, ионов, активированных комплексов), которые, взаимодействуя с молекулами мономера, инициируют рост полимерных цепей. Следствием этого является изменение фазового состояния среды, т.е. в облученной области образуется твердый полимер.

Согласно способу SLA-технологии предполагается последовательное «пробегание» лазерного луча по всей поверхности формируемого слоя там, где в сечении «тело» модели. У DLP-технологии предполагается засветка 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-технологии выше. Но стереолитография по-прежнему остается самой точной технологией и применяется там, где требования к чистоте поверхности и точности построения модели основные и определяющие.

Фирма 3D Systems – пионер в области практического освоения технологий быстрого прототипирования SLA – лазерной стереолитографии, в 1987 г. представила для коммерческого освоения первую стереолитографическую машину SLA-250 с размерами зоны построения 250×250×250 мм (рис. 2.1).

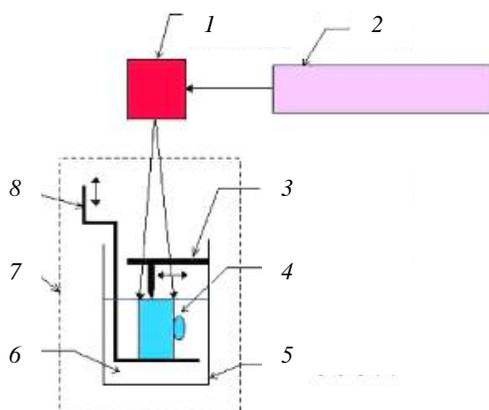


Рис. 2.1. Технология SLA: 1 – сканирующая система; 2 – лазер; 3 – нивелирующее устройство; 4 – формируемый объект; 5 – резервуар; 6 – фотополимер; 7 – герметичная камера; 8 – передвижная платформа

Передвижная платформа или подъемник 8, первоначально помещены на низ поверхности резервуара 5, который заполняется жидкой полимерной смолой 6. Ванна с полимером обычно вмещает 20...200 л. Этот материал имеет особенность – отверждает под действием ультрафиолетового излучения. В основном используются He-Cd или Ag-ионный лазеры, работающие в области УФ-излучения (длина волны 320...370 нм). Физика процесса основана на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения конкрет-

ной длины волны, в результате чего в месте поглощения наблюдается процесс радикальной полимеризации, т.е. отверждения, полимера.

Обычно применяют материалы, которые отвердевают под воздействием УФ-излучения, но бывают смолы, которые отвердевают при видимом излучении. Фотополимер очень светочувствителен и токсичен, поэтому ванна должна быть защищена от света и иметь проточную вентиляцию.

Лазерный луч перемещается по поверхности жидкого фотополимера, чтобы «очертить» геометрию сечения объекта. Смола застывает только там, где ее касался лазерный луч, который перемещается в плоскости  $X-Y$  под управлением сканирующей системы  $I$ . Сканирующая система включает в себя дефлекторы, которые управляют зеркалами, причем информация о перемещениях поступает из САД данных. Таким образом, лазерный луч перемещается очень быстро и по заданному контуру.

Изделие опускается вниз (на  $\sim 0,5 \dots 1,3$  мм) на некоторое время, в течение которого его поверхность заполняется непolyмеризованной жидкостью, далее нивелирующее устройство  $Z$  удаляет излишки жидкого полимера с поверхности. При этом амплитуда колебаний жидкости должна быть заранее выверена. Изделие опускается вниз, в то время как сфокусированный лазерный луч остается на поверхности полимера. При отверждении происходит усадка полимера, которая может привести к изменению объема жидкости в ванне и должна все время проверяться. В случае отклонения уровень восстанавливается. Толщины слоев составляют от 50 до 500 мкм. Контроль необходим, чтобы определить, на какую величину нужно опускать платформу. Чем тоньше отвержденные слои, тем точнее, «глаже» поверхность изделия, но, с другой стороны, процесс идет дольше. Параметры лазерного излучения стабилизированы, но дефлекторы позволяют управлять движением луча по  $X-Y$  поверхности жидкости.

Рассмотренные шаги повторяют, пока объект полностью не изготовлен. Некоторые конфигурации объектов могут иметь нависающие конструкции, которые должны быть поддержаны в течение процесса изготовления. Поддержки, т.е. внутренние или внешние «переборки», создаются на стадии компьютерной обработки 3-мерного вида изделия при помощи различных программ (например, Solid Concepts), которые позволяют:

- стабилизировать выступы, консоли на краях изделия;
- предотвратить расслаивание в сложных участках изделия;
- корректировать возможное искривление слоев на платформе;

- легко отделять синтезированное изделие от основания-платформы;
- синтезировать сложные модели, создавая их из нескольких частей.

После того как процесс изготовления объекта закончен, готовое изделие поднимается над уровнем жидкости, и ее излишки стекают, остатки смолы смывают ацетоном или спиртом, поддержки удаляют. После выемки изделия из ванны, его помещают в печь с ультрафиолетовой лампой для дополнительного отверждения полимера. Лазерная мощность составляет 10...200 мВ (чем она больше, тем быстрее идет процесс полимеризации).

Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое, и часто модель не требует последующей обработки. При необходимости чистота поверхности может быть улучшена, так как «зафиксированный» фотополимер хорошо обрабатывается и поверхность модели может быть доведена до зеркальной. В некоторых случаях, если угол между строящейся поверхностью модели и вертикалью меньше  $30^\circ$ , модель можно построить без поддержек. Например, модели, для которых не возникает проблем удаления поддержек из внутренних полостей, что позволяет получать модели, которые невозможно изготовить традиционными методами (рис. 2.2).

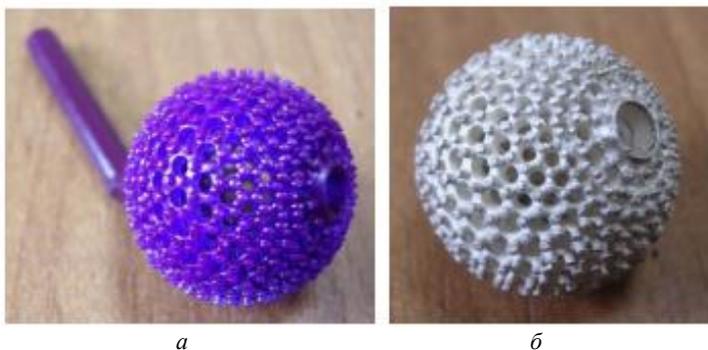


Рис. 2.2. Сферическое изделие: *а* – SLA-выжигаемая модель; *б* – серебряная отливка

Тем не менее, для данной технологии есть и практические ограничения по форме, которые связаны только с невозможностью вырастить изделия с полностью изолированными внутренними полостями.

Точнее, вырастить можно, но при этом в полости останется неудаленная жидкая смола, которая в дальнейшем полимеризуется.

Стереолитография широко применяется в следующих направлениях:

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

Основные плюсы этой технологии:

- отличная точность позиционирования, гладкость поверхности;
- изготовление моделей любой сложности (тонкостенные и мелкие детали);
- довольно высокая, по сравнению с другими технологиями, скорость создания объекта;
- отсутствие каких-либо технологических проблем с печатью (перегрев, расслаивание, обрушение под весом, сбой маршрута головки, плохое прилипание, отклеивание углов).

К недостаткам можно отнести:

- невысокую физическую прочность изготовленных объектов;
- ограничения в выборе материалов (возможность задействовать только специальные типы фотополимеров);
- необходимость в ультрафиолетовой засветке объекта после печати для окончательного затвердевания;
- высокую стоимость оборудования и используемых материалов;
- сложность конструкции, высокие требования к условиям эксплуатации и обслуживания;
- необходимость построения поддерживающих элементов;
- сложность замены одного материала другим, высокие издержки.

Разработчиком DLP-технологии является международная компания Envisiontec, которая свои первые установки выпустила в 2003 г. В машинах Envisiontec семейства Perfactory применяется оригинальная технология Digital Light Procession (DLP), разработанная компанией Texas Instruments® для получения качественной цифровой проекции. Ключевым элементом проекторов, работающих по DLP-тех-

нологии, является цифровое мультизеркальное устройство (Digital Micromirror Device, или DMD-устройство) – матрица жестких зеркал из алюминиевого сплава, обладающих высоким коэффициентом отражения.

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  $20^\circ$  благодаря ограничителям, расположенным на основании матрицы. Два этих положения соответствуют отражению поступающего светового потока в объектив и светопоглотитель. Площадь каждого зеркала матрицы 16 мкм и менее, расстояние между зеркалами  $\sim 1$  мкм. Изменением соотношения времени, в течение которого зеркало находится в разных положениях, регулируется яркость проецируемого изображения. Весь DMD-элемент имеет среднее время жизни около 6 лет при работе проектора 10 ч/день. Схема реализации технологии DLP приведена на рис. 2.3.

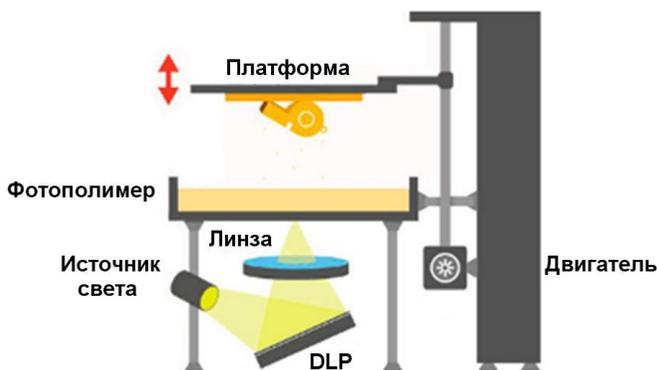


Рис. 2.3. Схема реализации технологии DLP

При построении модели формируется так называемая «маска» каждого текущего сечения САД-модели, которая проецируется на рабочую платформу через систему DMD-элементов (зеркал) с помощью прожектора с высокой яркостью света. Причем каждый слой (сечение САД-модели) разбивается не на «плоские» пиксели, а на «объемные» – воксели (voxel) размерами XYZ –  $16 \times 16 \times 15$  мкм. Размер вокселя может регулироваться по XY в диапазоне  $16 \dots 69$  мкм, по Z  $15 \dots 150$  мкм. Таким образом, процесс построения можно представить

как сборку модели из мельчайших строительных блоков. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя происходит в течение 3...7 с.

Таким образом, если в SLA-машинах применяется «точечный» принцип засветки, то в машинах Envisiontec – «поверхностный», т.е. засвечивается вся поверхность слоя. Этим объясняется весьма высокая скорость построения моделей, в среднем 25 мм/ч по высоте при толщине слоя построения 0,05 мм. Материал поддержек тот же, что и основной материал – акриловый фотополимер.

Модели Envisiontec используют так же, как и SLA-модели, в качестве мастер-моделей и выжигаемых литейных моделей. Качество моделей уступает SLA-моделям только по точности, что связано с применением акриловых фотополимеров, имеющих коэффициент усадки при полимеризации, равный 0,6% (в машинах 3D Systems используют малоусадочные эпоксидные фотополимеры). Модели Envisiontec (рис. 2.4) характеризуются достаточно высокой точностью и чистой поверхностью, прочностью и удобством в обращении при весьма умеренной (по сравнению со стереолитографией) стоимости. Преимуществом технологии Envisiontec являются высокая скорость построения моделей и, следовательно, производительность, хорошая выжигаемость моделей и малая зольность. Технология DLP весьма перспективна и эффективна для литейного производства. Так, например, время построения с учетом подготовительно-заключительных операций впускной трубы высотой 32 мм и ресивера высотой 100 мм составляет 1,5 и 5 ч соответственно. На сопоставимой по размерам SLA-машине Viper si2 для построение таких моделей необходимо не менее 5,5 и 16 ч соответственно.



Рис. 2.4. Модели, полученные по технологии DLP:  
*а* – выжигаемая литейная модель; *б* – функциональная модель

Основные преимущества технологии DLP: высокая точность изготовления; высокая производительность; широкий спектр используемых материалов, возможность изготовления функциональных про-

тотипов; оборудование имеет более низкую стоимость по сравнению с SLA при сопоставимых возможностях, менее сложную конструкцию.

Недостатки: высокая стоимость используемых материалов; сложность замены одного материала другим, высокие издержки; отсутствие возможности цветной печати.

Технология LCoS (Liquid Crystal on Silicon) очень похожа на технологию DLP, главное отличие – использование в качестве отражающих поверхностей жидких кристаллов. Свет в таких проекторах отражается от специальных жидких кристаллов на силиконе. Таким образом достигается высокое качество изображения, лишенное недостатков DLP-технологий. LCoS позволяет наращивать число пикселей, поэтому высокая разрешающая способность этих матриц достигается значительно проще. Но для создания таких матриц необходимы достаточно сложные технологии, что сильно отражается на их стоимости. LCoS чипы устойчивы к высокому излучению и поэтому применяются в более мощных, с высоким уровнем яркости проекторах.

Масочная стереолитография Solid Ground Curing (SGC) – метод аддитивного производства, во многом схожий с технологией печати методом цифровой светодиодной проекции (DLP). Технология была разработана и внедрена на рынок израильской компанией Cubital Ltd в 1986 г. Компания Cubital закончила свое существование, но интеллектуальные права были сохранены компанией Objet Geometries Ltd, а в 2012 г. перешли к корпорации Stratsasys в результате слияния двух компаний. В связи с этим, вариант технологии SGC, используемый на принтерах конкурирующей компании 3D Systems, известен под названием Film Transfer Imaging (FTI).

По данной технологии на плоскость построения наносится слой жидкого фотополимера. После нанесения тонкого слоя пластика он через специальную фотомаску с изображением очередного сечения обрабатывается ультрафиолетовыми лучами (рис. 2.5). Незасвеченные участки с жидким полимером очищаются при помощи вакуума, а оставшийся затвердевший материал повторно облучается жёстким ультрафиолетом. Образовавшиеся пустоты заполняются жидким воском, который затвердевает благодаря прислоненной холодной пластине. Затем слой фрезеруется до необходимой толщины, и аналогично начинается формироваться следующий. Технология обладает достаточно высокой точностью в Z-направлении, но большое количество отходов при фрезеровании слоев и высокие эксплуатационные затраты на сложную конструкцию принтера повышают стоимость печати.

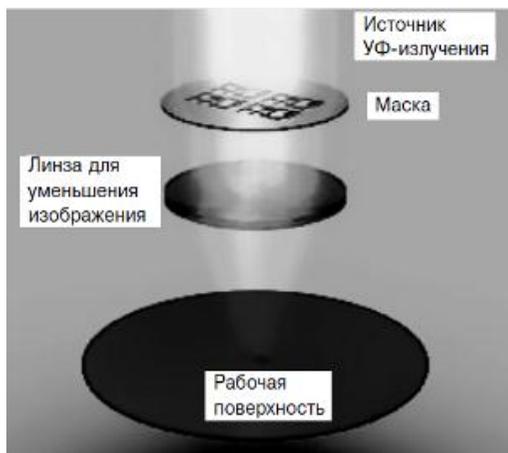


Рис. 2.5. Технология облучения ультрафиолетом через маску

Основным преимуществом SGC является отсутствие необходимости в построении поддерживающих структур как в случае с такими стереолитографическими методами, как SLA или DLP. В дополнение к высокому разрешению по горизонтали, механическая обработка каждого наносимого слоя позволяет добиваться высокой точности по оси Z. Наконец, технология отличается достаточно высокой производительностью за счет одновременного облучения целых слоев. Среди недостатков следует отметить достаточно высокую шумность и большое количество отходов, повышающих себестоимость печати. Сами же установки достаточно дороги из-за сложности конструкции. В последнее время метод SGC почти не используется, а его вариация FTI стала практически неотличима от цифровой светодиодной печати (DLP) ввиду внедрения цифровых проекторов.

*Выборочное тепловое спекание SHS (Selective Heating Sintering).* В большинстве технологий аддитивного производства деталь формируется постепенно, при этом эта постепенность сильно увеличивает время изготовления детали. Метод позволяет частично решить эту проблему, так как слой формируется одновременно. Суть в том, что здесь используется не дорогостоящий высокоточный лазер, а лишь направленное тепло. Специальная лампа закрывается маской, и таким образом появляется возможность выборочно воздействовать на исходный материал. В данной технологии применяют специальные инфракрасные лампы.

Одним из основных преимуществ является то, что для данной длины волны ИК-излучения возможно подобрать два вида материала: один будет пропускать тепло, а другой отражать. Одно из основных свойств ИК-излучения – возможность подобрать такую длину волны, при которой конкретный материал будет поглощать или отражать все излучение.

Предварительно изображение печатается на пластине из кварцевого стекла, которое размещают между источником излучения и подложкой, где создается модель. Незатронутые зоны печати пропускают тепло и запекают порошок, остальные – отражают тепловой поток, таким образом, формируется готовое изделие. Один слой толщиной 0,1 мм печатается за 1...2 с. Печать маски занимает 10 с. Оставшийся порошок можно использовать повторно.

Метод SHS имеет ряд особенностей:

- 3D-печать выполняется с низкой себестоимостью;
- минимальная толщина стенки слоя – 1 мм;
- с помощью технологии SHS можно печатать даже сложные объекты, которые требуют внимательного продумывания формы и высокой детализации;
- оставшийся после печати материал может использоваться повторно, что удешевляет процесс;
- именно выборочное спекание позволяет сэкономить на стоимости и габаритах устройств, при этом можно создавать даже настольные печатающие устройства.

К недостаткам технологии можно отнести низкую энергетическую отдачу, из-за чего расходных материалов в данном методе гораздо меньше. Да и сами модели часто требуют дополнительного обжига, чтобы достичь большей прочности.

*Струйная печать (технология Ink-Jet).* К категории Binder Jetting относятся струйные 3DP технологии или Ink-Jet, в которых, в отличие от Material Jetting, в зону построения впрыскивают не модельный материал, а связующий реагент (рис. 2.6). Данная технология может быть применена как в Direct Deposition, так и Bed Deposition исполнении. Технология была разработана в Массачусетском технологическом институте и в настоящее время успешно используется в принтерах компаний ExOne, 3D Systems, VoxelJet, в частности, для получения литейных моделей и песчаных синтез-форм (рис. 2.7).

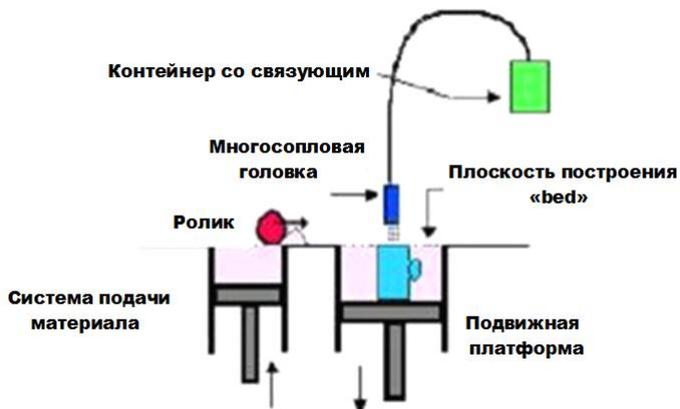


Рис. 2.6. Ink-Jet-технология



Рис. 2.7. Синтезированные песчаные формы (ExOne)

Для получения различного рода модельных изделий в качестве базового строительного материала могут использоваться полимерные и неполимерные порошковые материалы (акриловый полимер РММА – полиметилметакрилат, крахмально-целлюлозный порошок, керамический песок, порошки металлов и др.), а в качестве связующего – различные жидкие полимерные, например, полиэфирные клеи, в том числе и на водной основе, или специальные воски, которые, поступая из многоструйной головки, связывают частицы порошка, формируя контур одного сечения модели.

Данную технологию реанимируют с помощью различных типов принтеров, например, с двумя камерами (рис. 2.8): подающей и камерой, в которой формируется изделие. Перед работой принтера оператор засыпает порошок в подающую камеру, поршень которой опущен полностью вниз. Поршень второй камеры поднят в это время до упора вверх. После этого запускается специальная функция, которая автоматически наносит несколько слоев порошка из подающей камеры в зону печати и выравнивает уровни порошка в обеих камерах. Теперь 3D-принтер готов к работе. Во время очередного цикла печати формируется одно сечение изделия (разбиение изделия на сечения происходит автоматически при помощи, например, управляющего программного обеспечения ZPrint). Разравнивание на рабочей платформе послойное с шагом 0,2...0,4 мм аналогично SLS-системам. Сечение печатается так же, как и в обычном струйном принтере, но вместо бумаги – тонкий слой порошка, а вместо чернил – связующее вещество. Один слой формируется примерно за 30 с, и таким методом при шаге построения 0,2 мм машина может строить модели со скоростью от 12 до 48 мм/ч по высоте.

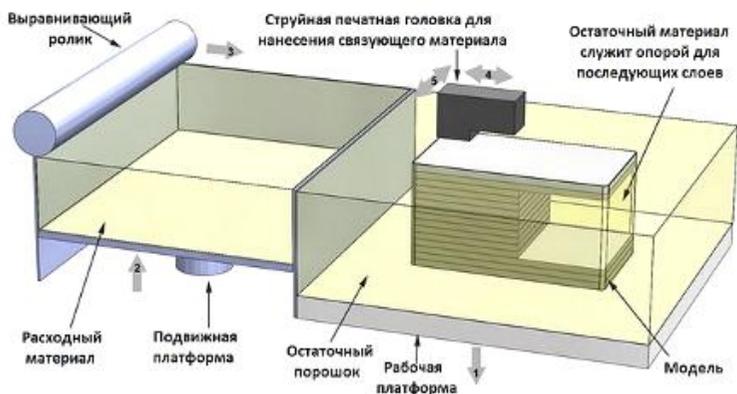


Рис. 2.8. Ink-Jet-технология с двухкамерным принтером

После того как сечение изделия напечатано, каретка перемещается в подающую зону, поршень с изделием опускается на толщину одного слоя, а подающий порошок поршень поднимается на толщину одного слоя. Затем ролик каретки, перемещаясь обратно, наносит очередной слой порошка в зону печати, и цикл повторяется. По окончании работы принтера изделие извлекают из порошка (в тех местах, где не было нанесено связующее вещество, порошок остался рассып-

чатым) и помещают в специальную установку для удаления остатков порошка с изделия (установка для удаления порошка).

После завершения построения рабочий бункер извлекают из машины, модели очищают и подготавливают к сборке. В этом случае дополнительной термообработки «выращенных» песчаных моделей не требуется.

Другой вариант конструктивного исполнения подачи порошкового материала в рабочую зону и технологии формования изделия приведен на рис. 2.9.

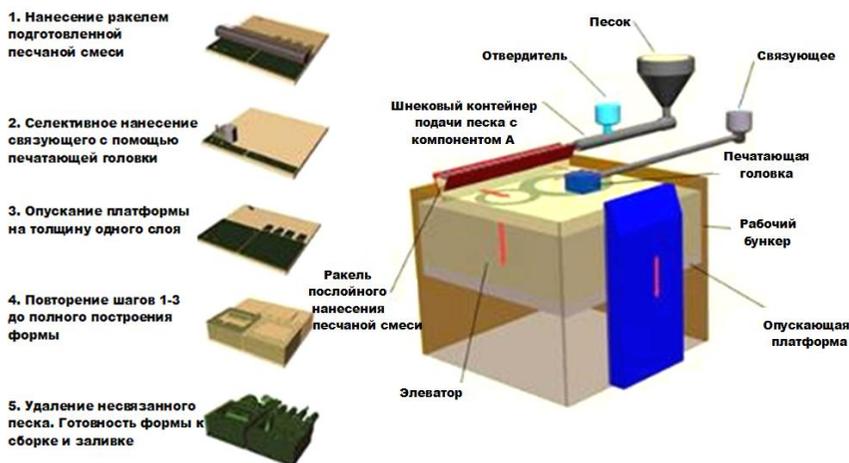


Рис. 2.9. Конструктивная схема Ink-Jet-установки и технологии формования на ней изделия

Для получения литейных песчаных синтез-форм используют литейный кремниевый и/или циркониевый песок.

Аналогичные гипсовые модели получаются не очень прочными, но и они сразу могут служить в качестве форм для литья.

Для существенного увеличения прочности, теплостойкости и влагостойкости напечатанные изделия могут быть обработаны цианоакрилом или эпоксидной смолой, например, Z-Max. Дополнительная прочность изделий позволяет их обрабатывать на станках. Таким образом, они могут совместно работать с промышленными изделиями.

Независимо от метода построения собственно формы, алгоритм действий конструктора-технолога практически одинаков:

- создать CAD-модель изделия, назначить припуск на обрабатываемые поверхности;

- согласно рекомендациям технолога, проектировать литниковую систему, которая сочленяется с основной CAD-моделью, модель масштабировать в соответствии с коэффициентом усадки литейного материала, получить технологическую CAD-модель;
- создать CAD-модели стержней и внешних форм.

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

Основные преимущества Ink-Jet-технологии: широкий спектр используемых материалов; при изготовлении прототипа не требуется построение поддерживающих структур, возможно повторное использование оставшегося порошка; относительно невысокая стоимость прототипов.

Недостатки: высокая стоимость оборудования; низкое качество поверхностей; невысокая механическая прочность прототипов; необходимость последующей обработки прототипов после построения (пропитка, обжиг и т.д.).

*Технология Color Jet Printing (CJP)* – цветная струйная печать – разновидность струйной трехмерной печати (3DP), фирменная технология компании 3D Systems.

Как и в случае с трехмерной струйной печатью (3DP), технология CJP подразумевает нанесение тонких слоев порошкообразных расходных материалов и выборочное – связующего полимера. Отличительной особенностью технологии является использование разноцветных связующих элементов, что позволяет создавать комплексные цветные 3D-модели.

Неизрасходованные материалы не удаляются из рабочей камеры во время процесса, а служат в качестве опоры для последующих слоев, что позволяет создавать объекты высокой геометрической сложности. Тем не менее, по завершении цикла остаточный порошок может быть собран и использован заново.

Материал основы, как правило, – гипс, реже крахмально-целлюлозный порошок.

В *технология Two Photon Polymerization (2PP)* и сверхкороткие лазерные импульсы фокусируются в объем полимера толщиной в несколько сотен микрометров, который в составе имеет инициатор. Инициатор активируется и запускает реакцию полимеризации лишь при поглощении двух фотонов одновременно. Такая ситуация возможна

лишь в фатальной точке лазера – его центре. Данная технология позволяет создавать объекты размером до 100 мкм.

### ***2.1.2. Аддитивные технологии на основе порошковых материалов***

*SLS-технология* относится к категории Powder Bed Fusion согласно классификации ASTM и заключается в следующем. 3D-объект создаётся из порошкообразных материалов. Частицы порошка диаметром 50...150 мкм, находящиеся в емкости, расплавляются под воздействием лазерного излучения. Лазерный луч (обычно CO<sub>2</sub>-лазеры), попадая на тонкий слой порошка, спекает порошковые частицы, которые затвердевают при охлаждении, формируя твёрдый слой. Подвижная платформа опускается. Сверху при помощи ролика наносится порошок, и процесс повторяется до полного изготовления прототипа. В данной технологии строящееся изделие не нуждается в подпорках (как, например, при стереолитографии), так как нерасплавленный порошковый материал остается лежать в камере, обеспечивая тем самым необходимую поддержку. После построения изделие полностью окружено неиспользованным материалом. Порошок очень осторожно удаляют только после полного застывания изделия, которое в зависимости от материала может длиться несколько часов. После очистки изделие может быть подвергнуто дальнейшей обработке. Преимущество этого метода заключается в том, что наряду с пластмассами, можно изготавливать изделия из всех материалов, которые под воздействием тепла расплавляются, а затем при охлаждении вновь становятся твердыми.

В качестве примера можно рассмотреть применение полимерных порошков для изготовления различного рода литейных моделей.

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 «пробегает» там, где компьютер «видит» в данном сечении САD-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 спекаются частицы полистирола (рабочая температура ~120 °С). Затем платформа опускается на 0,1...0,2 мм, и новая порция порошка накатывается поверх отвержденного – формируется новый слой, который также спекается с предыдущим. Процесс повторяется до полного построения модели, которая в конце процесса

оказывается заключенной в массив неспеченного порошка. Далее модель извлекают из машины и очищают от порошка. Преимуществом данной технологии является отсутствие поддержек, поскольку во время построения модель и все её строящиеся слои удерживаются массивом порошка.

Имеющиеся на рынке машины фирм 3D Systems и EOS позволяют строить достаточно крупные модели размерами до 550×550×750 мм без склейки отдельных фрагментов, что повышает точность отливки и надежность, особенно вакуумного литья. При этом возможна высокая детализация построения моделей: могут быть построены поверхностные элементы (номера деталей, условные знаки, надписи и пр.) с толщиной фрагментов до 0,6 мм; гарантированная толщина стенки модели – до 1,5 мм.

К недостаткам технологии надо отнести следующее. Процесс спекания порошка – это тепловой процесс, характеризующийся неравномерностью распределения тепла по рабочей камере и массиву материала, короблением вследствие температурных деформаций. В результате того, что порошок полистирола не сплавляется, как например, порошки полиамида или металла, а именно спекается, то структура модели – пористая, похожая на структуру пенопласта. Однако это облегчает удаление материала модели из формы с минимальными внутренними напряжениями. Построенная модель требует весьма аккуратного обращения при очистке и 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. Модель помещают в специальную печь и при температуре ~80 °С пропитывают специальным воскообразным составом (инфильтрированные модели красного цвета, из машины же извлекаются полистирольные модели снежно-белого цвета). Это также несет в себе опасность деформирования модели и требует определенных навыков персонала.

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

В последние годы появляются новые модельные материалы. Например, в машинах EOS используется полистирол, не требующий инфильтрации воском после построения модели. Однако это ослабляет, но не устраняет присущий SLS-технологиям недостаток.

Вследствие отмеченных причин точность изделий, полученных SLS-технологией, не может быть выше, чем при использовании других технологий, не связанных с температурными деформациями, например технологии фотополимеризации (SLA или DLP).

Говоря об SLS-технологии, следует отметить ещё одно, не связанное с полистиролом, но «родственное» направление, иногда также используемое в литейном деле. Это «выращивание» литейной формовочной оснастки из порошкового полиамида. Полиамид широко применяется для функционального прототипирования, полиамидные модели достаточно прочные и во многих случаях позволяют воспроизвести прототип максимально близко к конечному изделию. В ряде случаев экономически целесообразны полиамидные модели в качестве альтернативы деревянным.

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

В качестве материала для построения используется широкий спектр гранулированных (порошковых) материалов, чаще всего воск, полистирол, нейлон, керамика, стекло, нержавеющая сталь, титан, алюминий и другие металлические сплавы.

К достоинствам данного метода необходимо отнести прежде всего:

- возможность печатать объекты без поддерживающих структур под нависающими поверхностями (в отличие от технологии Direct Deposition);
- разнообразие материалов для печати;
- достаточно высокую прочность изделий при использовании соответствующих материалов.

Недостатки данной технологии:

- сложность последующей обработки (обжига) после печати в специальной печи для окончательного спекания порошка (если это необходимо);
- усадка детали после обжига, достигающая порой 30% (а в среднем 8...10% в зависимости от используемого материала) от исходного объема, что накладывает ограничения на допуски точности и требует последующей механической обработки для приведения к требуемым значениям параметров;
- порошок летуч и при неправильно подобранных режимах работы способен засорять рабочее пространство и ухудшать качество печати;
- сложность и громоздкость оборудования, используемого в основном при промышленном производстве (например, необходимость защиты порошков титана от окисления путем применения защитных газов или вакуумного оборудования);
- невозможность применения данного метода как технологии восстановления и ремонта деталей;
- возможно спекание порошинок, соседствующих с порошинками в месте построения;
- не позволяет изготавливать детали с закрытыми полостями;
- высокая стоимость оборудования, а главное – высокая стоимость сырья (сферического порошка).

*Технология DMLS (прямое лазерное спекание)* практически идентична технологии получения изделий на SLS-установках. Так же в компьютер, подключенный к машине, загружается трехмерная модель в stl-формате, на специальной платформе 3D-принтера распыляется и разравнивается начальный слой из специального металлического порошка – первый «этаж» будущей конструкции, толщина которого может составлять 20 мкм. Далее лазером мощностью от 200 до 1000 Вт производят спекание порошка по координатам, переданным компьютером. Таким образом получают первый этаж (слой) конструкции. Наносится второй слой порошка и процесс повторяется.

Главным отличием процесса DMLS от SLS является использование в смесевых или плакированных порошках связующих веществ с температурой плавления ниже, чем у основного металлического компонента. Такими связующими материалами могут быть полимерные порошки, которые выжигаются из изделия при последующей обработке, либо металлические порошки с более низкой точкой плавления.

Процесс прямого лазерного спекания легированных порошков требует точного контроля параметров лазерной обработки для обеспечения неконгруэнтного плавления порошка в двухфазной области. Однако характерные для DMLS локализованные быстрые тепловые циклы осложняют точное управление температурой спекания. Эти трудности приводят к недостаточному уплотнению порошка, возникновению гетерогенной микроструктуры и ухудшают свойства изделий из легированных порошков. Поэтому для получения приемлемых механических свойств обычно требуется провести последующую обработку, такую как нагрев для повторного спекания, горячее изостатическое прессование или вторичное насыщение материалом с более низкой температурой плавления.

Основные преимущества технологии DMLS:

- широкий спектр используемых материалов, возможность изготовления функциональных прототипов;
- при изготовлении прототипа не нужно строить поддерживающие структуры, можно изготовить детали со сложной геометрией, позволяющие создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т.д.);
- высокая точность изготовления;
- высокое качество поверхностей, механическая доработка практически не требуется.

Недостатки: высокая стоимость оборудования; сложность конструкции; высокие требования к условиям эксплуатации и обслуживания; высокая стоимость используемых материалов.

*Суть технологии SLM (селективной лазерной плавки)* заключается в следующем (рис. 2.10): тонкие слои качественного порошка металла, керамики, полимера с размером зерен 10...40 мкм равномерно распределяются с использованием специального покрывающего механизма, формируя слой толщиной 20...40 мкм, платформа, на которой расположен порошок, при этом может опускаться по вертикали. Весь процесс происходит внутри камеры, которая поддерживает жесткий контроль атмосферных инертных газов (аргон, азот, кислород). Затем каждый слой формируется путем избирательного воздействия лазера на поверхность порошка с помощью двух высокочастотных сканеров. Тем самым формируется 2D срез модели. При SLM-технологии применяют импульсные лазеры высокой мощности (обычно YAG-волоконные лазеры (1064 нм, 1070 нм)) – 0,05...1 кВт.

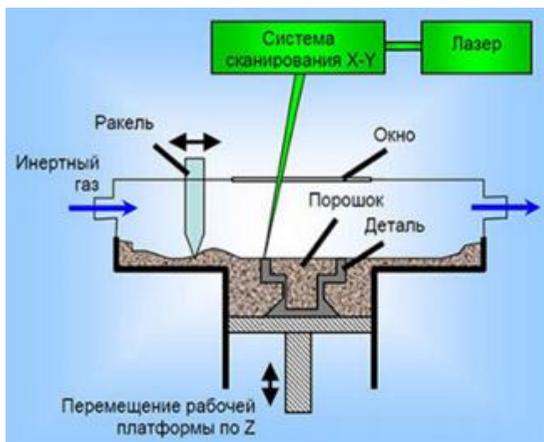


Рис. 2.10. Принципиальная схема SLM

Для лазерной плавки используют те же установки и процедуры, что и в процессе SLS. Единственное отличие состоит в том, что в процессе SLM происходит полное расплавление порошка. Это существенно улучшает микроструктуру и характеристики изделия по сравнению с DMLS. Плотность 99,99% для металлических изделий достижима без последующей термической обработки, а их характеристики сопоставимы с характеристиками деталей, полученных механообработкой.

Еще одним преимуществом SLM является возможность работать с чистыми цветными металлами, такими как титан, алюминий, медь, которые вплоть до сегодняшнего дня требуют высокой мощности лазера, хорошего качества лазерного пучка и малой толщины порошкового слоя.

Однако при затвердевании детали склонны давать сильную усадку, вызывая в изготовленных изделиях значительные остаточные напряжения, которые могут приводить к деформациям и даже расслоениям в конечном продукте.

Для нависающих элементов изделия нужны поддерживающие структуры, а термические напряжения, порождаемые процессом, требуют наличия фиксаторов. Как и в стереолитографическом процессе, создание опор приводит к перерасходу материала и вынуждает прибегать к последующей чистовой обработке.

В рамках данной технологии наиболее часто используются кобальтохромовые, титановые, сплавы на основе стали и инструментальные стали.

### Основные преимущества технологии SLM:

- высокая точность изготовления;
- высокое качество поверхностей, механическая доработка практически не требуется;
- широкий спектр используемых материалов, возможность изготовления функциональных прототипов;
- не нужно строить поддерживающие структуры при изготовлении прототипа, возможно формование деталей со сложной геометрией, позволяющих создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т.д.).

Недостатки: высокая стоимость оборудования; сложность конструкции, высокие требования к условиям эксплуатации и обслуживания; высокая стоимость используемых материалов.

*Технология ЕВМ.* Процесс электронно-лучевой плавки ЕВМ был поставлен на коммерческую основу компанией Arcam (Швеция) в 1997 г. (рис. 2.11). Сущность технологии ЕВМ следующая: электроны испускаются нитью накала, разогретой до 2500 °С, и далее, проходя через анод, разгоняются до 1/2 скорости света. Пучок электронов фокусируется магнитным полем, другим магнитным полем контролируется отклонение пучка. При достижении электронами порошка кинетическая энергия превращается в тепло, сканирующий пучок выборочно плавит металлический порошок (с толщиной слоя 70... ..250 мкм), вызывая его спекание. Мощность регулируется количеством электронов.

Порошок, спекшийся вокруг изделия, обеспечивает опору для поверхностей, направленных вниз. В процессе постобработки он счищается, тем самым сохраняя большую часть не подвергшегося спеканию порошка для повторного использования. Процесс ЕВМ выгодно отличается от лазерных процессов более высокой скоростью сканирования, что сокращает время изготовления детали, и меньшими термическими напряжениями. Это обусловливается тем, что электронно-лучевая плавка проводится при повышенных фоновых температурах, достигающих порядка 700...1000 °С, что позволяет создавать детали, не страдающие от остаточного механического напряжения, вызываемого градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия – отсюда максимальная прочность и отсутствие необходимости обжига.

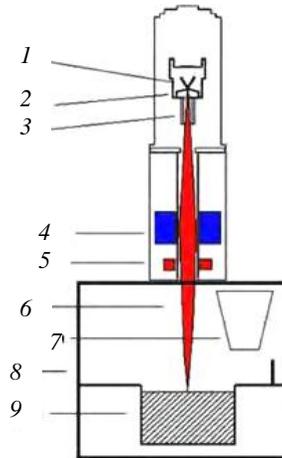


Рис. 2.11. Технология EBM: 1 – нить накала; 2 – чаша; 3 – анод; 4 – фокусирующая катушка; 5 – отклоняющая катушка; 6 – электронный пучок; 7 – контейнер с порошком; 8 – вакуумная камера; 9 – платформа

Однако особенности технологии EBM 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.

Кроме того, круг используемых материалов ограничен проводящими электрический ток металлическими порошками, а качество поверхности изделия уступает результату лазерных процессов. Процесс EBM выполняется в камере с глубоким вакуумом, что делает его довольно затратным, но облегчает работу с материалами, чувствительными к окислению, что особенно важно для изделий авиационно-космического приложения.

Основные преимущества технологии EBM:

- в сравнении с SLS, SLM и DMLS обладает более высокой скоростью построения за счет более высокой мощности излучателей и электронного, а не электромеханического, отклонения пучков;
- не требуется обжигание напечатанной модели для достижения необходимой механической прочности;
- в отличие от технологий спекания, позволяет создавать детали особо высокой плотности и прочности;

- высокая точность и достаточно высокое качество изготовления, механическая доработка практически не требуется.

Недостатки: высокая стоимость оборудования и используемых материалов; сложность конструкции, жесткие требования к условиям эксплуатации и обслуживания; требует применения токопроводящих порошков и дорогостоящих вакуумных камер.

### **2.1.3. Аддитивные технологии на основе листовых строительных материалов**

К категории Sheet Lamination относят технологии, использующие в качестве строительного листового материала в виде полимерной пленки, металлической фольги, листов бумаги и т.д. Примером могут быть технологии UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing, Fabrisonic) и LOM-технология (Laminated Object Manufacturing).

Сущность *технологии UAM* заключается в том, что тонкие металлические пластины собирают и сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием (рис. 2.12). Эта технология – сочетание аддитивной и «субтрактивной» технологий.

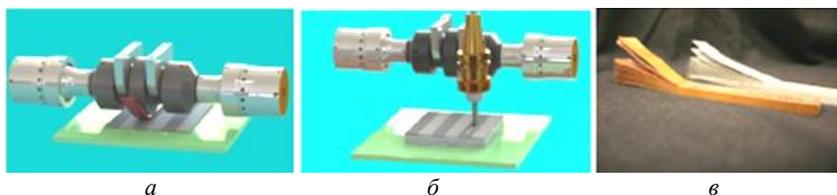


Рис. 2.12. UAM-технология: *а* – ультразвуковая сварка; *б* – фрезерование; *в* – модельная лента

Другая разновидность UAM-технологии заключается в следующем. Металлическую фольгу накатывают роликом, к которому при этом прикладывают нормальную силу. С помощью ультразвукового генератора создают микроперемещения в направлении, поперечном направлению движения ролика. В результате в месте контакта двух листов фольги разрушается оксидная пленка, возникают пластическая деформация и тепловыделение, которого достаточно для диффузионного проникновения молекул одного металла в другой. Происходит диффузионная сварка слоев фольги. Затем сформированный слой фольги, так же как и в первом варианте, обрабатывают фрезерованием, удаляя «лишний» металл. Таким способом могут быть получены

композитные изделия из в принципе не свариваемых материалов, например композиция «сталь-титан-медь». Данную технологию применяют как для создания композиционных материалов, так и для изготовления изделий: технологической оснастки, пресс-форм с системой охлаждения, матриц для термовакuumной формовки и т.д.

*LOM-технология* (Laminated Object Manufacturing) (рис. 2.13) – одна из первых аддитивных технологий, которая стала применяться в промышленности для изготовления модельной оснастки.

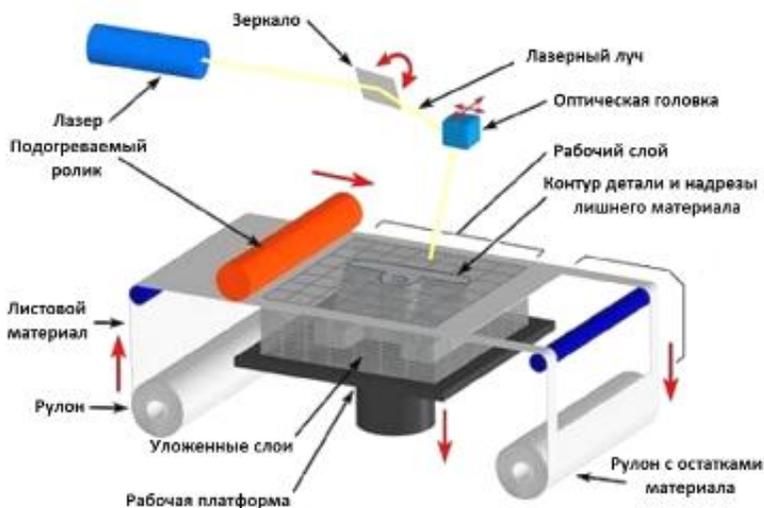


Рис. 2.13. LOM-технология

LOM-технология – это создание трехмерных изделий методом послойного склеивания элементов, вырезанных из листового материала. Изготовленные по LOM-технологии изделия идеально подходят для решения задач, требующих оценки формы и эстетических свойств изделий. Прочность LOM-объектов в большинстве случаев позволяет использовать их для проверки функциональности проектируемого изделия. Изделия изготавливают из бумаги или листового пластика с нанесенным сухим связующим веществом. Изготовленные LOM-изделия по составу сходны с древесиной и легко обрабатываются.

С помощью специального программного обеспечения рассчитывается необходимое количество поперечных сечений изделия. Далее CAD-данные, содержащие информацию об изделии, транслируются в

систему управления процессом LOM-машины. Материал из рулона подается на рабочую поверхность и лучом лазера вырезается контур поперечного сечения. Области лишнего материала разрезаются на мелкие элементы для последующего удаления. На рабочую поверхность подается материал для нового слоя и склеивается с предыдущим за счет прокатки термороликом. После чего создается и вырезается новое поперечное сечение. После завершения изготовления всех слоев, лишний материал удаляют вручную. При необходимости выполняется чистовая обработка изделия (шлифовка, покрытие краской или лаком).

Благодаря недорогим твердым листовым материалам, преимуществом LOM изделий является надежность, устойчивость к деформациям и предельно эффективная стоимость, не зависящая от их геометрической сложности.

В машинах Mcoг (Ирландия) и Kira (Япония) в качестве строительного материала используют бумагу и клей, а вместо лазера – нож с остро заточенным лезвием с износостойким покрытием. Кроме того, принтер Mcoг Iris (рис. 2.14) может быть оснащен цветными картриджами, что делает его настоящим цветным 3D-принтером.



Рис. 2.14. Принтер Mcoг Iris (зона построения XYZ = 256×169×150 мм; толщина слоя 0,1 мм)

Разновидность технологии LOM – Plastic Sheet Lamination (PSL), в которой построение модели осуществляется путем послойного склеивания полихлорвиниловой (ПВХ) пленки толщиной 0,15 мм, пяти цветов: полупрозрачной (янтарной), красной, синей, кремовой, черной. Модель формируется за счет последовательного склеивания слоев пленки и вырезания контура модели с помощью лезвия, закреп-

ленного на подвижной головке. Модель строится на специальной магнитной подложке, устанавливаемой на подвижной (вертикально) платформе. На всю поверхность слоя пленки наносится клеевой состав, а в те места, где после построения необходимо обеспечить легкое удаление пленки, – антиадгезив. Тело модели формируется за счет последовательного склеивания пленки, а «пустоты» остаются несклеенными, чтобы обеспечить легкое удаление «лишней» пленки из них в процессе постобработки. Антиадгезив наносится с помощью специальных «карандашей» или «фломастеров» с различным диаметром стержня 1, 3 и 6 мм. В зависимости от размеров полости модели, которую необходимо сформировать, используется фломастер соответствующего размера.

Рабочим материалом может быть не только бумага и пластиковая лента, но и металлическая фольга или даже листовой металл. Вырезать контур в этом случае можно не только лучом лазера, но и фрезой, струей воды и т.д. Такой процесс иногда называют LOM2. Правда, в этих случаях усложняется процесс стыковки и соединения отдельных слоев материала между собой. Главным недостатком метода лазерной резки листовых материалов является большое количество отходов, а также необходимость ручной очистки готового изделия от остатков материала. Кроме того, поверхность изделия получается шероховатой, а при работе установки необходима интенсивная вентиляция из-за дыма, выделяющегося при лазерной резке бумаги.

Основные преимущества технологии LOM:

- низкая себестоимость продукции;
- использование широко распространенных материалов;
- сравнительно высокая точность изготовления объектов, от 0,3 мм;
- на некоторых LOM-принтерах возможно сразу изготавливать цветные модели.

Недостатки – низкая прочность изделий вдоль направления слоев, есть риск расслоения; малая распространенность, небольшой выбор моделей 3D-принтера; повышенная шероховатость поверхности.

## **2.2. Технологии Direct Deposition**

Термин на русский можно перевести как «прямое или непосредственное осаждение (материала)», т.е. направление энергии и осаждение материала в конкретную точку построения (рис. 1.6, а, 1.7 б, г).

Иными словами, здесь не формируется слой строительного материала на поверхности («bed») платформы, а материал подается в кон-

кретное место, куда в данный момент времени подводится энергия и где идет процесс формирования детали, подобно тому, как сварщик подводит электрод к месту, где за счет электрической дуги формируется зона расплава.

К технологии Direct Deposition относят следующие технологии:

- DMD – Direct Metal Deposition (компания POM, США);
- LMD – Laser Metal Deposition (компания Optomec, POM США, Trumpf, Германия);
- LENS – Laser Engineered Net Shape (компания Optomec, США);
- MJS – Multiphase Jet Solidification (компания Fraunhofer IFAM, Германия; FDM, США);
- FDM – Fused Deposition Modeling (компания Stratasys, США);
- MJM (или Poly-Jet) – Multi Jetting Material (компания Stratasys, США);
- EBF – Electron Beam Freeform Fabrication (исследовательский центр LaRC при NASA);
- DM – Direct Manufacturing (аналогична технологии EBF (компания Sciaky, США)).

Как и для Bed Deposition, для технологий Direct Deposition так же могут использоваться различные типы строительных материалов: жидкие, сыпучие, прутковые.

### ***2.2.1. Аддитивные технологии на основе жидкостных строительных материалов***

К категории Material Extrusion в рамках технологий Direct Deposition относится *технология MJS (Multiphase Jet Solidification)*, в соответствии с которой в место построения модели через подогреваемый экструдер выдавливается пастообразный строительный материал: смесь металлического порошка и связующего – пластификатора. Построенную таким образом грин-модель («green» – в значении «зеленая», незрелая, сырая) помещают в печь для удаления связующего и дальнейшего спекания.

В рамках технологии Material Jetting реализуется технология MJM (*Multi Jetting Material*) другое название – технология Poly-Jet, которая может быть применена как в Direct Deposition, так и Bed Deposition исполнении. Согласно данной технологии модельный материал (обычно фотополимер или воск), подается в зону построения через многоструйную головку. Фотополимер отверждается при засветки лучом в виде линии от управляемой ультрафиолетовой лампы.

Эта технология применяется в принтерах компании Stratasys. Здесь используют два материала – строительный и поддерживающий, который предотвращает обрушение нависающих частей модели при построении. После построения поддерживающий материал смывают горячей водой. Модельный материал – фотополимерная смола, которую подают в зону построения через многосопловую головку (рис. 2.15).

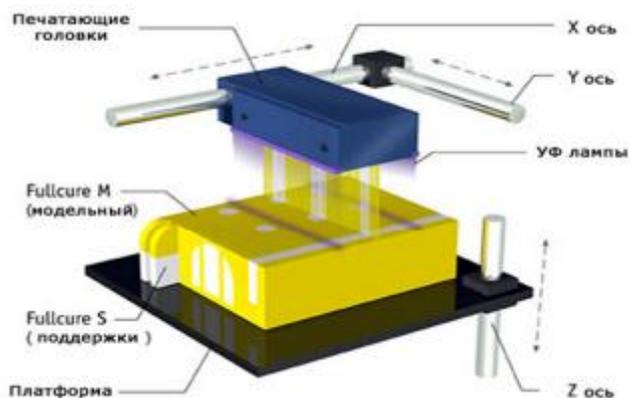


Рис. 2.15. Технология MJM

Разноцветные фотополимеры или воски позволяют получать многоцветные полимерные или восковые изделия.

В литейном производстве с помощью MJM-технологии можно создавать «восковки» – воскоподобные синтез-модели для последующего литья по выплавляемым моделям. Модели строят на 3D-принтерах с использованием светочувствительной смолы – фотополимера на акриловой основе и литейного воска (более 50% по массе). Фотополимер является связующим элементом. Материал многоструйной головкой послойно наносится на поверхность рабочей платформы, отверждение каждого слоя происходит за счет облучения ультрафиолетовой лампой.

В компании 3D Systems разработаны принтеры, работающие по технологии MJM (компания 3D Systems), специально для «выращивания» моделей для точного литья металлов в гипсокерамические и оболочковые формы (рис. 2.16 и 2.17).

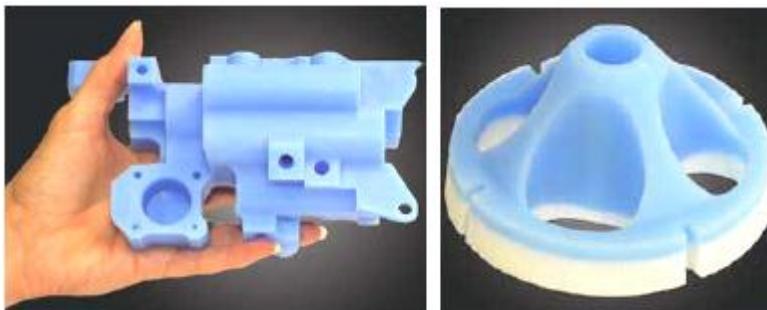


Рис. 2.16. Литейные модели, полученные по технологии MJM



Рис. 2.17. Оболочковая форма и чугунная отливка корпуса турбины, полученные по восковой синтез-модели

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

Недостаток технологии – относительно высокая стоимость расходных материалов – около 400 евро/кг.

Основные преимущества технологии MJM:

- высокие скорость получения модели, качество и точность модельного материала с точки зрения собственно технологии литья по выплавляемым моделям (формовки, вытапливания модели);
- широкий спектр используемых материалов, возможность изготовления функциональных прототипов;
- возможно изготовление опоры нависающих элементов моделей из относительно легкоплавкого воска и деталей со сложной геометрией.

Недостатки: высокая стоимость оборудования и используемых расходных материалов; сложность конструкции, высокие требования к условиям эксплуатации и обслуживания.

*Технология многоструйной печати MJP (Multi Jet Printing)* – фирменный метод аддитивного производства, запатентованный компанией 3D Systems. Технология MJP позволяет осуществлять высокоточное прототипирование с высоким уровнем детализации и фактически является разновидностью технологии MJM, главными отличиями является получение, во-первых, готовых, а не модельных изделий, а, во-вторых, композиционных материалов (жестких, эластичных, резиноподобных) путем подачи по соответствующим соплам различных типов материалов и смешивания их на поверхности создаваемого слоя в задаваемых соотношениях.

Технология MJP сочетает черты таких методов 3D-печати, как моделирование методом послойного наплавления (FDM/FFF) и стереолитография (SLA). Построение слоев производится с помощью специальной печатной головки, оснащенной массивом сопл. Количество сопл в существующих моделях принтеров варьируется от 96 до 448.

Печать производится термопластиками, восками и фотополимерными смолами. В первых двух случаях материалы затвердевают за счет постепенного охлаждения. При печати фотополимерами каждый нанесенный слой обрабатывается ультрафиолетовым излучателем для полимеризации (затвердевания).

MJP позволяет создавать опоры нависающих элементов моделей из относительно легкоплавкого воска. В случае использования вспомогательных восковых структур, по окончании печати готовая модель помещается в печь (встроенную или отдельную) и нагревается до температуры ~60 °С для выплавки воска.

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности, сравнимых с лазерной стереолитографией (SLA) – минимальная толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750×750×1600 DPI.

Ранние модели MJP принтеров использовали обычные термопластики. Развитие и совершенствование фотополимерных материалов привело к постепенной замене термопластиков фотополимерными смолами и восками.

Другой разновидностью технологии MJM является *технология «капельная/струйная печать» DoD (Drop-on-Demand)* (рис. 2.18).

Наибольшее применение этот метод нашел в сфере биопечати для послойного нанесения живых клеток с целью построения органических тканей.

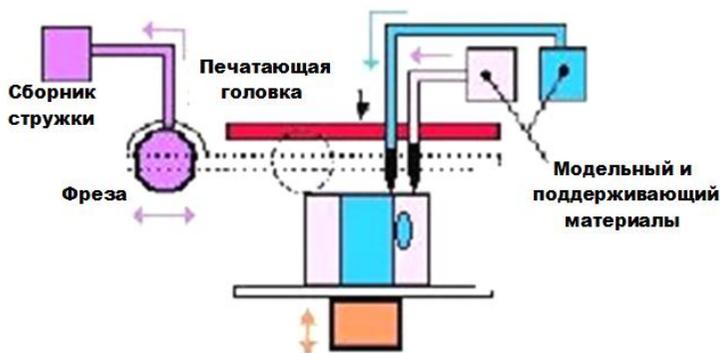


Рис. 2.18. Технология DoD

Здесь так же используют два материала: модельный – воск, который в расплавленном виде подают в зону построения; и поддерживающий, который после построения модели смывают теплой водой. Принтер оснащен фрезерной головкой, с помощью которой производят «механообработку» построенного слоя, обеспечивая его необходимую высоту, удаляя излишки модельного и поддерживающего материалов. Эта технология, которую называют и WDM (Wax Deposition Modeling), также применяется в ювелирной промышленности для выращивания восковых моделей (восковок) и последующего литья по выплавляемым моделям и в дентальной медицине. В машиностроении используется редко в связи с невысокой производительностью существующих машин.

*Технология Ballistic Particle Manufacturing (BPM)* – выращивание объекта за счет нанесения микрокапель (струйного нанесения) из сопла движущейся печатной головки расплавленного материала на поверхность построения. Материал построения, например, термопластик и воск, поступает к печатной головке уже в расплавленном состоянии. После окончания печати одного слоя платформа опускается и печатается следующий слой.

*Комбинированная технология аддитивного производства и послойного напыления металла (Spray forming)* позволяет быстро изготовить отливку. Технология получения заготовок сложной формы

относительно больших размеров с умеренными требованиями по точности из конструкционных и специальных сплавов посредством распыления металла (Spray Forming) предложена в 1970 г. проф. Singer (Swansea University, Великобритания). Суть технологии заключается в послойном напылении металла на подложку и формировании заготовки для последующей механообработки. Металл расплавляется в плавильной камере и затем через специальное сопло распыляется потоком инертного газа. Частички металла размером от 10 до 100 мкм осаждаются на подложку, формируя таким образом тело заготовки (рис. 2.19).

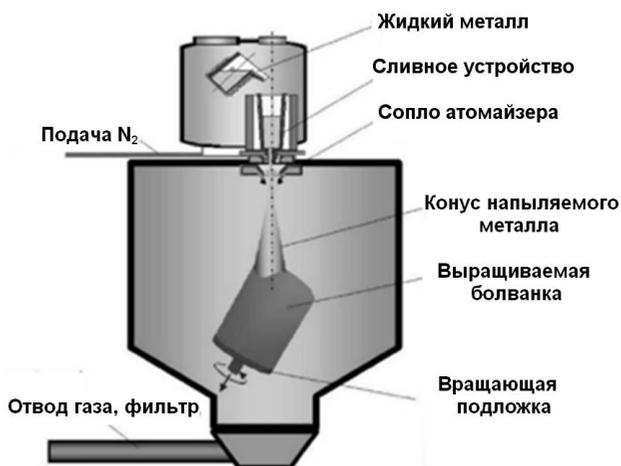


Рис. 2.19. Схема установки Spray Forming

Особенностью Spray Forming является наличие микропор в структуре материала, их появление 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 и последующей обработкой давлением – прокаткой или ковкой.

В отличие от литой заготовки, полученной простым сливом металла в изложницу, заготовка, изготовленная методом Spray Forming, имеет более высокую однородность материала. Одно из самых важных достоинств этой технологии – возможность создания новых материалов и разнообразных покрытий с заданными эксплуатационными свойствами.

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.

В связи с развитием и повышением технического уровня прототипирующих машин практический интерес может представлять применение технологии Spray forming для получения изделий путем напыления металла, например, на керамическую модель (реплику). Суть технологии в следующем (рис. 2.20): по CAD-модели на прототипирующей машине, например SLA-установке, выращивается стереолитографическая мастер-модель, по которой изготавливается силиконовая форма, по которой изготавливается силиконовая форма.

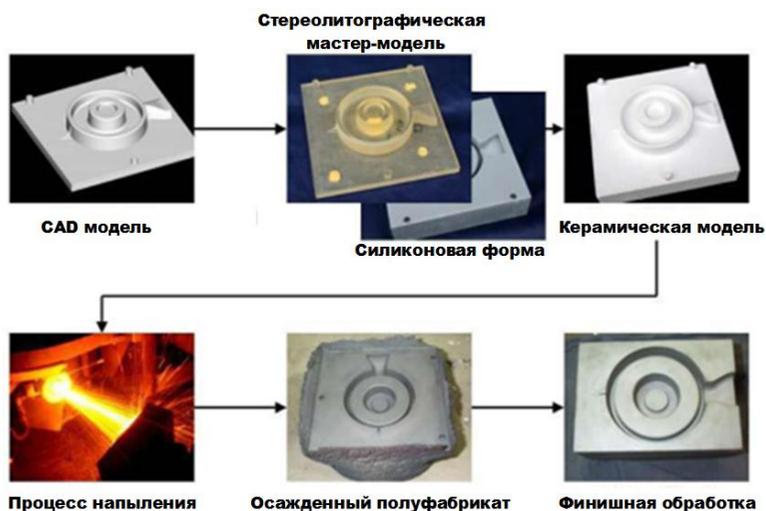


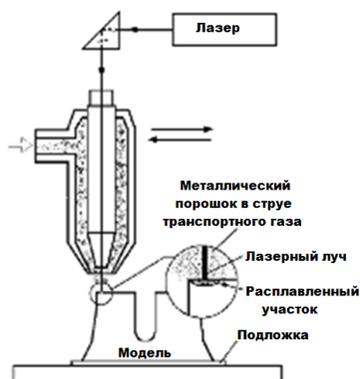
Рис. 2.20. Процесс получения изделий напылением металла на керамическую модель

В форму заливают жидкую керамику и получают керамическую модель-реплику, которую устанавливают в Spray Forming-машину и послойно напыляют на нее расплавленный металл. Так образуется «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 изготовления пресс-форм и технологической оснастки, но ее применяют и для ответственных деталей в авиационной и ракетно-космической технике.

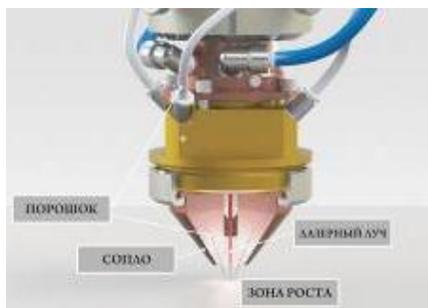
## 2.2.2. Аддитивные технологии на основе порошковых строительных материалов

Технология LMD (*Laser Metal Deposition*) отличается от DMLS и SLM способом подачи порошка (рис. 15). Система LMD состоит из порошкового питателя, который вводит порошок через сопло в систему подачи газа. В литературе встречается также другое название данной технологии «прямое лазерное аддитивное построение» – *Construction Laser Additive Directe (CLAD)*, развиваемое французской фирмой *BeAM*.

Принцип ее работы иллюстрирует рис. 2.21, а. Струя инертного газа подает порошок на поверхность детали. Свет мощного лазерного пучка пробивается сквозь центр набора сопел и фокусируется вблизи подложки – основы, на которой будет изготовлена деталь. Подложка сканируется в поперечных направлениях, чтобы сформировать требуемую геометрию, при этом происходит послойное нанесение порошка до формирования трехмерного изделия. Лазерное излучение расплавляет поверхность формирующейся детали в заданной точке. Порошок попадая на всю деталь, приваривается к ней только в точке, где металл расплавлен лазером. Излишний порошок тут же выдувается из зоны обработки. При этом газопорошковая струя может быть как коаксиальной, так и не коаксиальной сфокусированному лазерному лучу, обеспечивающему нагрев и частичное плавление порошка и подогрев подложки.



а



б

Рис. 2.21. Технология LMD: а – схема реализации технологии;  
б – схема рабочей лазерной головки

Толщина слоя при выращивании изменяется в диапазоне 0,02...0,10 мм, производительность ~20 мм<sup>3</sup>/с. Точность размещения материала 0,05 мм (контролируется специальной оптической системой). Размер рабочей зоны может достигать 457×457×1067 мм. Производители: Optomes, POM (США), Trumpf (Германия), VeAM (Франция).

Данная технология позволяет не только получать новые детали из титановых и алюминиевых сплавов, инструментальных или нержавеющей сталей, но и производить ремонт уже существующих изделий. Поскольку состав порошка может непрерывно изменяться в процессе выращивания, деталь может иметь сложную (градиентную) структуру, состоящую из различных материалов или даже отдельных устройств. При этом в рамках одного технологического процесса становится возможным формирование изделия, характеристики различных участков которого отличаются и определяются локальными условиями эксплуатации. Есть примеры выращивания биметаллических пресс-форм, где рабочая поверхность выполнена из инструментальной стали, а конформные каналы охлаждения – из меди, причем сталь плавно переходит в медь.

Такая «умная» пресс-форма дает возможность в два раза сократить время охлаждения детали при литье. При этом стоимость изготовления сложных пресс-форм оказывается примерно на треть меньше, чем при использовании такой производительной технологии, как высокоскоростное фрезерование. По прочности, стойкости к износу и коррозионной стойкости выращенные изделия превосходят детали из аналогичного материала, но произведенные по традиционной технологии.

Причина в том, что при сверхбыстром застывании капельки расплавленного металла (кристаллы) в ней просто не успевают сформироваться, т.е. структура сплава типа «металлическое стекло». Подавая в зону обработки одновременно порошки разных металлов, теоретически возможно получить самые экзотические сплавы с заранее заданными свойствами, которые практически невозможно достичь никакими иными способами. Единственное ограничение – температура плавления одного металла не должна превышать температуру кипения другого металла.

Кроме того, LMD-система, объединяющая в себе многоосную систему позиционирования, возможность подачи нескольких материалов и систему управления с обратной связью, может использоваться для изготовления новых деталей, восстановления и ремонта поврежденных

или изношенных изделий, а также для нанесения износостойких и антикоррозионных покрытий. Способность подавать нужный материал в нужное место дает LMD-процессу ряд уникальных преимуществ, недоступных процессам SLS/SLM, которые используют емкость с порошком.

К недостаткам данной технологии, помимо относительно низкой скорости выращивания и потребности в финишной обработке, следует отнести ее закрытость. Производители установок для непосредственного размещения металла выясняют список задач клиента и готовят набор программ управления установкой именно под их решение. Затем клиент покупает у них же порошки металлов, засыпает в установку, нажимает на кнопку и получает готовую деталь. Использовать порошки других производителей или самостоятельно разрабатывать программу обработки оригинальной детали практически невозможно (такая деталь рассыпается из-за внутренних напряжений).

Процессы прямого нанесения металлов (DMD), точного лазерного формования (LENS) и DLF (Direction Light Fabrication) по сути являются разновидностями технологии LMD.

### ***2.2.3. Аддитивные технологии на основе прутковых строительных материалов***

*Технология EBF (Electron Beam Freeform Fabrication)* – производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой – новаторский метод аддитивного производства, разработанный Исследовательским центром NASA в Лэнгли (LaRC) под руководством Карен Тамингер. Технология EBF нацелена на аддитивное производство комплексных моделей с пониженным, по сравнению с традиционными методами, расходом материалов и практическим отсутствием механической обработки. Метод использует электронные пучки высокой мощности для последовательного наплавления материалов в форме металлической проволоки.

Алгоритмы механической обработки служат для определения траектории движения режущих инструментов в процессе создания готового изделия из болванки. В случае с EBF процесс имеет прямо противоположное направление: те же самые цифровые модели служат для выработки производственных алгоритмов, регулирующих не удаление лишней массы, а нанесение необходимого материала. Технология использует электронные излучатели высокой мощности в вакуумной камере для плавки металла. Электронный пучок передвигается по рабочей поверхности, повторяя контуры цифровой модели, в то время

как металлическая проволока постепенно подается в точку фокусирования пучка (рис. 2.22). Расплавленный материал немедленно застывает, формируя прочные слои заданной модели. Процесс повторяется до построения цельной модели, требующей лишь минимальной обработки внешней поверхности. Технология EBF позволяет создавать объекты размером от нескольких миллиметров до нескольких метров. Практические ограничения по объему построения накладывают физические размеры вакуумной рабочей камеры и количество доступного расходного материала.

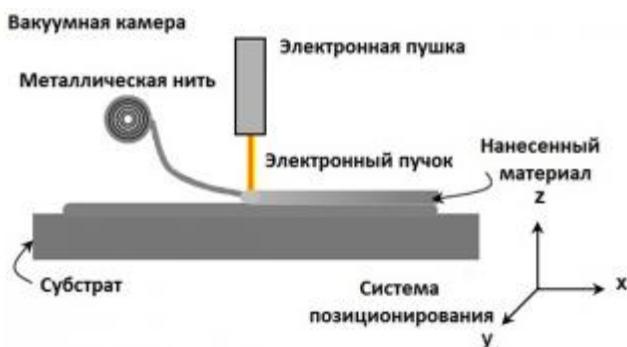


Рис. 2.22. Технология EBF

Аналогичную технологию под названием EBDM – Electron Beam Direct Manufacturing («прямое производство посредством электронного пучка») реализует компания Sciaky, США. Основное преимущество этой технологии, как и EBF, – высокая производительность 7...18 кг/ч, что позволяет выращивать крупные детали, размеры которых исчисляются метрами, и что невозможно или чрезмерно дорого обеспечить, используя другие аддитивные технологии.

Сам принцип формирования детали обуславливает низкое качество поверхности синтезированной детали. Однако сочетание EBF (EBDM)-технологии с традиционными технологиями механообработки позволяет достичь результата с приемлемыми затратами. Это 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 в порошковом состоянии.

Относительно новый процесс IFF (Ion Fusion Formation) в 2004 г. запатентовала компания Honeywell Aerospace, США. Технология относится к группе Direct Deposition и аналогична технологии Sciaky, но в качестве источника энергии для плавления предполагает использование плазматрона, ионизирующего инертный газ и генерирующего поток плазмы. Температура плазмы достигает 5000...30000 К.

Основные преимущества технологии EBF (EBDM): высокая точность изготовления; высокое качество поверхностей, механическая доработка практически не требуется; широкий спектр применяемых металлических порошков.

Недостатки: высокая стоимость оборудования; сложность конструкции, высокие требования к условиям эксплуатации и обслуживания; высокая стоимость используемых материалов.

К этой же категории относится и наиболее популярная технология FDM (*Fused Deposition Modeling*), реализуемая компанией Stratasys в многочисленных принтерах «любительского» и «профессионального» классов. Фидсток в виде полимерной нити подводят к экструдеру, где полимерную нить расплавляют и с её помощью формируют физическую модель в соответствии с конфигурацией сечения виртуальной CAD-модели (рис. 2.23 и 2.24).

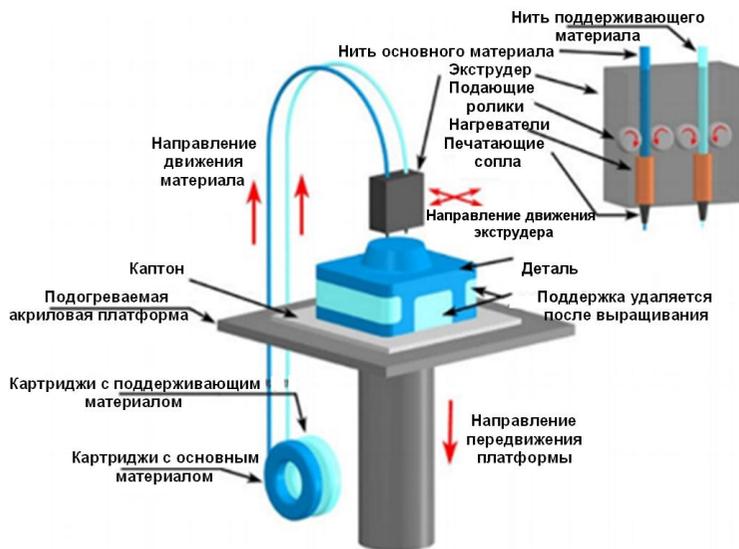


Рис. 2.23. Принципиальная схема технологии FDM

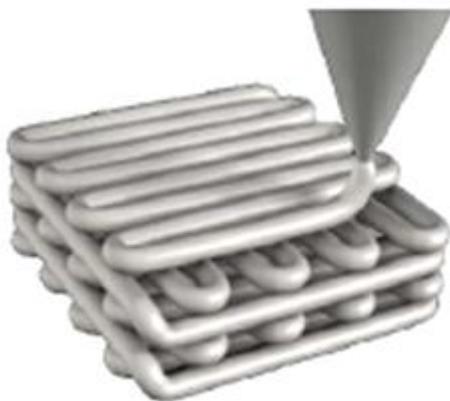


Рис. 2.24. Раскладка расплавленного материала через экструдер

FDM – процесс послойного наложения расплавленной полимерной нити. FDM-система позволит превратить концепцию изделия в реальный экземпляр, проверить его на соответствие форме и размерам и даже смоделировать работоспособность изделия, не прибегая к излишним временным и материальным затратам.

При помощи FDM-технологии можно создавать трехмерные объекты из твердотельных или поверхностных электронных моделей, полученных в CAD-системе. Термопластичный моделирующий материал в форме тонкой нити, диаметром 0,07 дюйма (1,78 мм), подается в экструзионную (выдавливающую) головку с системой регулировки температуры, где он разогревается до полужидкого состояния. Выдавливающая головка наносит материал очень тонкими слоями на неподвижное основание, формируя за один проход законченный слой изделия. Последующие слои наносятся на предыдущие, отвердевают, соединяются друг с другом.

Процесс начинается с проектирования концептуальной геометрической модели на рабочей станции CAD-системы, а непосредственно процесс изготовления изделия – с программного обеспечения QuickSlice фирмы Stratasys, которое в течение нескольких минут обрабатывает stl-файл, математически разбивая концептуальную модель на горизонтальные слои – сечения. При необходимости с помощью программного обеспечения SupportWorks автоматически формируются поддерживающие (опорные) структуры. При создании изделия используют два вида материала: первый (основной) – для формирования

самого изделия, а другой – в качестве опорного (материал поддержки – обычно водорастворимые материалы типа крахмала). Поддержка легко удаляется, оставляя чистую и гладкую поверхность раздела между поддержкой и изделием, что в результате дает превосходное качество законченного изделия. Траектория перемещения инструмента задается оператором простым нажатием соответствующей клавиши, и эти данные в цифровой форме вводятся затем в FDM-установку. Установка обеспечивает перемещение по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , при этом за один проход создается один слой изделия. Полученные таким способом изделия можно затем маркировать, шлифовать, красить, сверлить. Преимущество этого способа заключается в том, что существует огромная палитра материалов, позволяющая пользователю подбирать именно тот материал, который лучше всего соответствует его требованиям к изготавливаемому изделию. Кроме того, важен тот факт, что в процессе построения объекта можно изменять материал.

Инсталляция FDM-системы исключительно проста – нужно всего лишь вставить вилку в розетку. Систему можно использовать в любом офисном помещении, поскольку не требуются никакие специальные условия работы (вентиляция, дополнительная инфраструктура или специальные разрешения). Все поставляется в виде законченного решения, поэтому конструкторский коллектив может быстро проектировать, проверять и изготавливать свои изделия. Системы FDM имеют модульную конструкцию, что позволяет пользователям наращивать возможности системы по мере роста сложности изготавливаемых изделий.

Базовая система любой модели включает все необходимые компоненты для изготовления изделий из материала одного типа (обычно из ABS-пластика). Существуют дополнительные модули, расширяющие функциональные возможности системы благодаря другим типам моделирующих материалов, самые распространенные из них, кроме ABS: PLA – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный материал; Nylon; LAYWOOD – композитный материал, на 40% состоящий из натурального дерева и безопасного связующего полимера; PET – полиэтилентерефталат; Laybrick – полимер с эффектом песка для 3D-печати и др.

Достоинства данного метода: недорогое и широко распространенное сырье для печати (полимеры и пластик); простая в изготовлении и ремонте механическая часть устройства; обширная палитра цветов для печати; невысокая стоимость печати; возможность изготовления крупногабаритных прототипов.

Недостатками являются: растекание пластика из-за нагрева за границы печатаемой области; ограничение применения других материалов кроме тех, которые можно расплавить и продавить; чувствительность к перепадам температур во время процесса печати; недостаточно высокая точность изготовления прототипов, низкое качество поверхности; низкая производительность печати; необходимость построения поддерживающих элементов; технологические ограничения при изготовлении тонкостенных прототипов со сложной геометрией.

Многие производители 3D-принтеров используют другие названия FDM-технологии: Thermoplastic Extrusion, Plastic Jet Printing (PJP), Fused Filament Method (FFM), Fused Filament Fabrication (FFF).

### **3. МАШИНЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

#### **3.1. Оборудование (принтеры) для аддитивных технологий**

Ввиду достаточно большого количества классификационных подходов, возможности использования различных типов строительных материалов на одном и том же оборудовании, однотипности аддитивных технологий, различающихся только названиями и фирмами-производителями, в рамках данного пособия обзор и анализ производимого промышленного оборудования для аддитивных технологий разделен на три группы: оборудование, работающее с жидкими (расплавленными) строительными материалами, оборудование с применением порошковых материалов, оборудование с применением листовых и прутковых материалов. Кроме того, рассматриваемое оборудование разделено на три группы, определяемые задачами и возможностями, стоящими перед ними, а именно: любительские, профессиональные и производственные. Представленный анализ фирм-производителей и аддитивного оборудования, естественно, не является полным, и рассматривается, главным образом, оборудование, зарекомендовавшее себя на рынке в 2014–2017 гг., а также оборудование, часто упоминаемое в различного рода научных и производственных публикациях.

##### ***3.1.1. Аддитивное оборудование на основе стереолитографических технологий***

Входит в группу оборудования, использующего жидкие (расплавленные) строительные материалы. Суть стереолитографических

технологий 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 получили SLA, MJM (Polyjet) и DLP-технологии. Первый способ предполагает последовательное «пробегание» лазерного луча по всей поверхности формируемого слоя там, где в сечении находится «тело» модели. Во втором способе отверждение производится лучом в виде линии в процессе формирования слоя за счет излучения от управляемой ультрафиолетовой лампы. Третий способ предполагает засветку всего слоя одновременно за счет создания так называемой маски – «фотографии» текущего сечения CAD-модели.

Различие в способах формирования слоев обуславливает и различие в скорости построения модели на различных типах оборудования. Скорость выращивания по DLP- и Polyjet-технологиям выше. Но SLA-технология (табл. 3.1) по-прежнему остается самой точной и применяется там, где требования к чистоте поверхности и точности построения модели являются основными и определяющими. Некоторые технические характеристики аддитивного оборудования по технологиям SLA, DLP, MJM соответственно, а также их разновидностей приведены в табл. 3.1–3.3.

Т а б л и ц а 3.1

**Аддитивное оборудование, работающее по технологии SLA**

Наименование оборудования, производитель	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницилирующего источника
FORM 1 <i>Formlabs</i> , США	Фотополлимер	125×125×65	0,025...0,1	10...30 мм/ч*	УФ-лазер, 405 нм
FORM 2 <i>Formlabs</i> , США	"	145×145×175	0,025...0,1	10...30 мм/ч*	УФ-лазер, 250 мВт
Pegasus Touch, <i>Full Spectrum Laser LLC</i> , США	"	177×177×228	0,025...0,1	22 см <sup>3</sup> /ч**	УФ-лазер, 405 нм
SLA-250, <i>3D Systems</i> , США	"	250×250×50	Min 0,075	0,793 м/с***	HeCd лазер, 325 нм, 25 мВт

Окончание табл. 3.1

Наименование оборудования, производитель	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницирующего источника
SLA-5000, 3D Systems, США	"	508×508×600	Min 0,05	5 м/с***	Nd лазер, 354,7 нм, 216 мВт
SLA-7000, 3D Systems, США	"	508×508×600	Min 0,025	9,52 м/с***	Nd лазер, 354,7 нм, 800 мВт
ProJet 6000 HD, 3D Systems, США	"	250×250×125	0,05...0,125	5 мм/ч*	УФ-лазер, 2000 мВт
ProJet 7000 HD, 3D Systems, США	"	380×380×50	0,05...0,125	5 мм/ч*	
iPro 9000, 3D Systems, США	"	1500×750×550	0,05...0,15	3,5 м/с***	УФ-лазер, 1450 мВт
DigitalWax 029J +, DWS, Италия	"	150×150×100	0,01...0,1	5 м/с***	УФ-лазер, Solid State BluEdge
OWL Nano, OWL, США	Фотополимер, акрилат	150×150×200	0,01	25 см <sup>3</sup> /ч**	УФ-лазер
Freeform Pico 2, Asiga, США	Фотополимер	51×32×75	0,039	40 мм/ч*	УФ-лампа, 385 и 405 нм
Viper si 2, 3D Systems, США	"	250×250×250	0,02...0,1	Не заявлена	Nd лазер, 354,7 нм, 100 мВт
СМЕТ АТОМм-4000, СМЕТ Inc., Япония	"	400×400×300	0,025		УФ-лазер
Ceramaker, 3D Ceram,	Фотополимер+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> и др.	300×300×110	0,01...0,125		УФ-лазер, 2 кВт

\* Скорость печати по оси Z.

\*\* Суммарный объем печати в единицу времени.

\*\*\* Скорость перемещения лазерного луча (диаметр пятна 0,2...0,3 мм).

Таблица 3.2

**Аддитивное оборудование, работающее по технологиям DLP и FTI с использованием фотополимеров и иницирующего УФ-Full HD проектора**

Наименование оборудования, производитель	Технология	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати, мм/ч
Starlight, <i>Starlight 3D</i> , Россия	DLP	124×70×180	0,012	6...13
Russian DLP 3D Printer, Россия	DLP	144×81×180	от 0,02	6...12
Mch Uni, Россия	DLP	102×77×150	0,025...0,1	15...60
Perfactory Aureus, <i>EnvisionTEC</i> , Германия	DLP	60×45×100	0,025...0,035	3...7
Perfactory Xtreme 3SP, <i>EnvisionTEC</i> , Германия	DLP	254×381×330	0,05...0,1	до 10
Perfactory XEDE 3SP, <i>EnvisionTEC</i> , Германия	DLP	457×457×457	0,05...0,1	25
ULTRA 3SP, <i>EnvisionTEC</i> , Германия	DLP	266×177,8×193	0,025...0,1	до 12,7
Autodesk Ember, <i>Autodesk</i> , США	DLP	64×40×134	от 0,025	от 18
B9Creator, <i>B9Creator</i> , США	DLP	102×77×203	от 0,025	12...24
V-Flash FTI 230, <i>3D Systems</i> , США	FTI	220×170×203	0,1	5

Таблица 3.3

**Аддитивное оборудование, работающее по технологиям MJM и DoD, США**

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницирующего источника
Objet500 Connex3, <i>Stratasys</i> , США	MJM	Фотополимер	490×390×200	0,016	20 мм/ч*	УФ-лампа
Objet350 Connex, <i>Stratasys</i> , США	MJM	"	342×342×200	0,016...0,03	20 мм/ч*	УФ-лампа

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницилирующего источника
Objet1000, <i>Stratasys</i> , США	MJM	Фотополимер	1000×800××500	0,016	16000 см <sup>3</sup> /ч**	УФ-лампа
ProJet 1500, <i>3D Systems</i> , США	MJM	"	171×228××203	0,1...0,15	20,3 мм/ч*	УФ-лампа
ProJet 1000, <i>3D Systems</i> , США	MJM	"	171×203××178	0,1	12,7 мм/ч*	УФ-лампа
ProJet CPX 3000, <i>3D Systems</i> , США	MJM	Воск	298×185××203	0,016...0,033	2,5...5 мм/ч*	УФ-лампа
ProJet 3510 SD, <i>3D Systems</i> , США	MJM	Фотополимер	298×185××203	0,029...0,032	до 5 мм/ч*	УФ-лампа
ProJet 5000, <i>3D Systems</i> , США	MJM	"	298×381××300	0,025...0,05	до 5 мм/ч*	УФ-лампа
ProJet MJP 3600, <i>3D Systems</i> , США	MJP	"	298×183××203	0,016...0,032	до 5 мм/ч*	УФ-лампа
ProJet 5500x, <i>3D Systems</i> , США	MJP	4 типа фотополимера+ воск	518×381××300	0,013...0,025	10 мм/ч*	УФ-лампа
3Z Pro, <i>SolidScape, Inc.</i> , США	DoD	Воск	152×152××102	до 0,006	Не заявлена	Термоголовка

\* Скорость печати по оси Z.

\*\* Суммарный объем печати в единицу времени.

**FORM 1, FORM 2** (рис. 3.1) (*Formlabs*, США) – настольные стереолитографические 3D-принтеры. Устройства идеально соответствуют needs дизайнеров, требующим ювелирной точности. Лазерная стереолитографическая печать позволяет добиваться разрешения, недостижимого для абсолютного большинства принтеров, используя

щих метод послойного наплавления: толщина слоя составляет всего лишь 25 мкм. Область построения FORM 1 составляет 125×125×165 мм, FORM 2 – 145×145×175 мм. Устройство FORM 2 оснащено системой подачи фотополимерной смолы через картриджи.



Рис. 3.1. 3D-принтер FORM 2

**Pegasus Touch** (*Full Spectrum Laser LLC*, США) – полупрофессиональный стереолитографический 3D-принтер. Технология позволяет достигать высокой точности печати – минимальная толщина наносимого слоя 25 мкм. Максимальный размер прототипов 177×177×228 мм. Устройство оснащено полным комплектом контрольных опций, включая сенсорный дисплей, встроенную память для работы в автономном режиме, USB порт, а также беспроводной (Wi-Fi) и Ethernet интерфейс.

**SLA-250** (*3D Systems*, США) – первая модель SLA-принтера (1987 г.) с размерами зоны построения 250×250×250 мм, позволяет создавать сложные концептуальные изделия, действующие образцы и мастер-модели для быстрого изготовления оснастки. Благодаря высокой точности и скорости построения изделий, их отличному качеству эти установки с успехом применяются при разработке новых изделий на сотнях предприятий автомобильной и аэрокосмической промышленности, на предприятиях, изготавливающих компьютеры, потребительские товары и медицинскую технику.

В **SLA-5000** (*3D Systems*, США) использованы все новейшие достижения в области стереолитографии, значительно повышающие скорость построения изделия и обеспечивающие простоту эксплуатации. Скорость построения изделия на SLA-5000 на 35% выше, чем на SLA-500. Установка обеспечивает высокие темпы разработки новых изделий. Максимальные размеры изделия на SLA-5000 составляют 508×508×584 мм, можно изготавливать крупногабаритные конструкции или одновременно несколько одинаковых (различных) изделий. Рабочая камера имеет две двери, что существенно облегчает операцию извлечения готовых изделий. SLA-5000 оснащена твердотельным ультрафиолетовым лазером повышенной мощности.

**SLA-7000** (*3D Systems*, США) в среднем на 400% быстрее, чем предыдущая система быстрого моделирования SLA-5000. Кроме того,

толщина слоя в 0,0254 мм создает гладкую поверхность, что скажется на уменьшении времени последующей обработки. Высокоточная конструкция пятого поколения, включающая оптическую систему с низкой вибрацией и революционную технологию лазера с двойным диаметром пятна, уменьшает простои и ошибки.

**ProJet 6000 HD** (3D Systems, США) предлагает быструю и качественную SLA печать и исключительную простоту использования. Устройство имеет три варианта разрешения печати (HD, UHD, XHD), выбор из шести VisiJet SL материалов, включая VisiJet SL Flex и Jewel, и сенсорный интерфейс, легкий в управлении. ProJet 6000 HD позволяет распечатывать модели высокого качества размерами 250×250×250 мм. В режиме XHD устройство обеспечивает толщину слоя создаваемой модели всего в 50 мкм. ProJet 6000 HD применяется для создания прототипов, изготовления моделей для высокотемпературных испытаний, создания моделей с высокой детализацией, а также макетов, дизайн-моделей и пр.

**ProJet 7000 HD** (3D Systems, США) обеспечивает наивысшую точность деталей и очень высокое разрешение печати, чем любой из существующих аналогов. Устройство имеет три режима печати: HD (высокое качество), UHD (ультравысокое качество) и XHD (сверхвысокое качество), что позволяет подстраивать нужный режим под любые задачи и экономить затраты на производство. Большой объем рабочей камеры 380×380×250 мм дает возможность создавать высокие 3D-модели, а также несколько 3D-моделей одновременно. Принтер подойдет не только для создания моделей, макетов или прототипов, но и наладки небольшого мелкосерийного производства.

**iPro 9000** (3D Systems, США) (рис. 3.2), в отличие от младшей модели iPro 8000, оснащена двумя независимыми модулями для построения, поэтому имеет большую ширину. В модулях можно выращивать изделия из разных материалов. Принтер обладает высокой производительностью, ориентирован на единичное и мелкосерийное производство изделий с высокими точностью размеров и качеством поверхности. Ориентирован на широкий спектр запатентованных 3D Systems GmbH материалов Assura в автоматическом режиме с минимальной



Рис. 3.2. 3D-принтер iPro 9000

постфинишной обработкой. В рамках одного процесса возможно одновременное построение совершенно разных по габаритам, внешнему виду и сложности изделий.

**Viper si 2** (*3D Systems*, США) используются для построения особо ответственных изделий с повышенными требованиями к точности и чистоте поверхности, в первую очередь для изготовления мастер-моделей. Установка имеет наименьший шаг построения – 0,05 мм, а в режиме High resolution – 0,02 мм, но на уменьшенной до 125×125 мм площади построения. Машина может строить модели с толщиной стенки 0,1...0,2 мм.

**DigitalWax 029J +** (*DWS*, Италия) – стереолитографический трехмерный принтер для производства ювелирных прототипов размером до 110×110×100 мм. Принтер использует светодиодные проекторы (DLP) с высокой скоростью сканирования (2600 мм в секунду), что позволяет создавать до 270 моделей в день. Толщина наносимого слоя 10...100 мкм. Данных для печати передаются через Ethernet соединения.

**OWL Nano** (*OWL*, США) (рис. 3.3) – лазерный стереолитографический трехмерный принтер промышленного класса. Устройство отличается исключительно высоким разрешением: минимальная толщина слоя составляет всего лишь 0,1 мкм. В качестве материалов используются фотополимерные смолы и акрилат. Принтер позволяет создавать объекты размером до 150×150×200 мм.



Рис. 3.3.  
3D-принтер  
OWL Nano

**Freeform Pico 2** (*Asiga*, США) – принтер с оригинальной системой засветки фотополимера с помощью DLP (цифрового процессора) и светодиодов, имеющий ресурс до 50 тыс. ч. Принтер предназначен для изготовления изделий с высокой детализацией. Зона построения 40×30×75 мм, шаг построения от 1 до 50 мкм.

**СМЕТ АТОМm-4000** (*СМЕТ Inc.*, Япония) – промышленный стереолитографический принтер с рабочей зоной большого размера до 400×400×300 мм. Устройство оснащено модулем управления с LCD дисплеем и интерфейсом для обмена данными по локальной сети. Установка позволяет добиваться высокого разрешения с минимальной толщиной наносимого слоя в 25 мкм.

**Ceramaker** (*3DCeram*) (рис. 3.4) – промышленный 3D-принтер, использующий аддитивную технологию послойного отверждения керамической пасты, предназначен для опытно-конструкторского и серийного производства изделий сложной геометрии. Открытая архитектура модуля настроек позволяет использовать различные материалы, в том числе российского производства. Принтер имеет типовой размер рабочей камеры  $300 \times 350 \times 100$  мм, при этом можно выбирать длину камеры 100, 150, 200, 300 мм в целях экономии пасты при работе, для этого в комплекте поставляются модули разных размеров. Для легких материалов (например, оксида алюминия) высота может быть увеличена до 140 мм.



Рис. 3.4. 3D-принтер Ceramaker

**Starlight** (*Starlight 3D*, Россия) – принтер, позволяющий производить детали высокого качества из различных светоотверждаемых полимеров. Мощный FullHD проектор, качественные элементы жесткой системы позиционирования печатного субстрата и инновационные решения в конструкции печатных емкостей обеспечивают этому принтеру возможность работы с полимерами многих мировых производителей.

**Mch Uni** (Россия) работает с засветкой проектором снизу фоточувствительных полимеров на основе акриловых смол DLP. Конструкция принтера с многоразовым лотком подачи материала позволяет применять для 3D-печати смолы различных производителей. Смена материала предельно проста, выполняется оператором и не влечет никаких дополнительных затрат. Структура поддержки 3D-печати стержневидная, что сводит потери материала к минимуму. Шаг смещения по вертикали минимальный для устройств этого класса (до 25 мкм). Готовые модели имеют гладкую поверхность и могут использоваться в качестве макетов, прототипов будущих изделий, проверки технологических сборок на собираемость, мастер-моделей для литья в силикон и по выжигаемым формам.

**Russian DLP** (3D Printer, Россия) – один из лучших в классе любительских принтеров. Оборудование оснащено мощным FullHD проектором, он открывает уникальные возможности для таких сфер, как стоматология, ювелирное дело, машиностроение, сверхточное прото-

типирование. Конструктив принтера позволяет увеличить рабочую площадь принтера от 96×54×180 мм до 135×75×180 мм. Принтер способен печатать изделия с толщиной слоя всего 20 микрон, что является отличным показателем для SLA-системы.

**Perfactory Aureus** (*EnvisionTEC*, Германия) – настольный принтер. Высокая автономность устройства позволяет добиться круглосуточной производительности. Объем рабочей зоны 60×45×100 мм при толщине наносимого слоя от 25 мкм. Предоставлен выбор из шести специализированных материалов, удобное программное обеспечение и возможность подключения к ПК или локальной сети. Принтер обладает компактными размерами 450×780×450 мм.

**Perfactory Xtreme 3SP, Perfactory XEDE 3SP** (рис. 3.5) (*EnvisionTEC*, Германия) позиционируются как аддитивные машины для



Рис. 3.5. 3D-принтер  
Perfactory XEDE  
3SP

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 Xtreme имеет один цифровой прожектор с разрешением 1400×1050 пикселей, XEDE – два прожектора. Эффективная рабочая зона и толщина слоя построения регулируются сменой линз оптической системы. Особенностью машин серий Xtreme и XEDE является то, что, в отличие от других технологий, здесь используется не дискретное, пошаговое, а непрерывное движение

платформы вниз с малой скоростью. Поэтому на моделях нет ярко выраженных ступенек, характерных для других способов построения. Модели требуют постобработки – удаления поддержек и в ряде случаев, как и стереолитография, – дополимеризации.

**ULTRA 3SP** (*EnvisionTEC*, Германия) имеет 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 °С), а также для концептуального моделирования делает эти машины особенно привлекательными в тех случаях, когда требуется изготовли-

вать большое количество и широкую номенклатуру моделей в разнообразном спектре назначения.

**Autodesk Ember** (*Autodesk*, США). Светогенератор данной модели обладает точностью самой передовой оптики и мощностью в 1 миллион вокселей на слой, благодаря чему Ember обладает высочайшим качеством и точностью до 25 микрон печати. Еще одним преимуществом этого принтера является увеличенная в 24 раза скорость печати. Разрешение по оси XY составляет 50 микрон, а по оси Z – 10 микрон, поэтому можно печатать самые маленькие детали. Программное обеспечение Autodesk Print Studio позволяет полностью контролировать весь процесс работы от проектирования до печати.

**B9Creator** (*B9Creator*, США) разработан специально для трехмерной печати фотополимерной смолой. Главным достоинством устройства является высокое разрешение с возможностью нанесения слоя толщиной менее 10мкм. Размер печатаемых объектов зависит от разрешения в горизонтальной плоскости: 102,4×76,8×203,2 мм при размере исходного пикселя 100 мкм, 51,2×38,4×203,2 мм при 50 мкм. Высокая точность принтера делает его пригодным для ювелирного производства.

**V-Flash FTI 230** (*3D Systems*, США) (рис. 3.6) работает по технологии FTI, позволяет получать прочные и точные детали с гладкими поверхностями. Характерная особенность принтера – возможность моделировать сразу несколько моделей без снижения скорости их создания, что значительно повышает производительность и эффективность использования аппарата. Размер рабочей камеры устройства вполне достаточен для прототипирования большого ассортимента моделей, а благодаря использованию платформы минимальных размеров материал для моделирования расходуется практически полностью, без остатков или излишков. Кроме того в V-Flash FTI 230 имеется возможность дозаправки картриджа материалом без прерывания рабочего процесса.



Рис. 3.6. 3D-принтер V-Flash FTI 230

**Objet500 Connex3** (*Stratasys*, США) (рис. 3.7) осуществляет цветную печать с использованием композитных материалов на основе Digital ABS – фотополимера, имитирующего свойства ABS-пластика. Различные наполнители позволяют придавать слоям одной модели разные физические свойства, создавая прототипы, сочетающие мяг-

кие и жесткие компоненты. Кроме того, применяемая технология может печатать разноцветные модели (до 46 цветов). Размер готовых изделий 490×390×200 мм при минимальной толщине наносимого слоя 16 мкм.

**Objet350 Connex** (*Stratasys*, США) обеспечивает возможность создания прототипов сложных сборных изделий размерами 350×350×200 мм, формирует слои высокой точности толщиной 16 мкм для придания сложных геометрических форм, гладких поверхностей и тонких стенок. Objet 350Connex может печатать из 14 материалов одновременно в одной детали, что позволяет уменьшить количество времени, потраченного на сборку.

**Objet1000** (*Stratasys*, США) (рис. 3.8) – 3D-принтер, в котором сочетается сложность и большой размер получаемых изделий; имеет самую высокую производительность среди принтеров на платформе Connex, огромную камеру печати и возможность использования более 100 различных материалов. Благодаря очень большому модельному лотку размером 1000×800×500 мм, он позволяет дизайнерам, инженерам и производителям быстро создавать прототип какого-либо проекта 3D CAD, независимо от его сложности или степени детализации.



Рис. 3.7. 3D-принтер  
Objet500 Connex3



Рис. 3.8. 3D-принтер  
Objet1000

**ProJet 1000** (*3D Systems*, США) распечатывает модели размерами до 171×228×203 мм. Устройство позволяет создавать прочные пластиковые модели с достаточно высоким разрешением.

**ProJet 1500** (*3D Systems*, США) характеризуется высокой скоростью печати, которая составляет 20,32 мм/ч. Для печати доступно

шесть различных цветов. Распечатываемые модели размерами до 171×203×178 мм отличаются прекрасной детализацией, высоким разрешением и гладкой поверхностью, что позволяет не подвергать их дополнительной обработке после печати.

**ProJet CPX 3000** (*3D Systems*, США) специально разработан для выращивания восковых моделей для точного литья металлов в гипсо-керамические и оболочковые формы. Принтер имеет два режима построения модели – «стандартный» с разрешением (xyz) 328×328×700 точек на дюйм и размерами зоны построения 298×185×203 мм и «высокоточный» (XHD – Xtreme High Definition) с разрешением 656×656×1600 точек на дюйм на уменьшенной до 127×178×152 мм зоне построения. 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.

**ProJet 3510 SD** (*3D Systems*, США) – профессиональный 3D-принтер, использует технологию печати MJM для создания 3D-моделей из твёрдого пластика. Область построения 298×185×203 мм. С достаточно высокой точностью печати 0,025...0,05 мм принтер идеально подходит для решения задач дизайна и инженерии. При построении 3D-модели ProJet 3510 SD использует два материала: пластик для прототипирования и материал поддержки VisiJet S300 (на основе воска), который при окончательной обработке удаляется с помощью системы финишной обработки.

**ProJet 5000** (*3D Systems*, США) – профессиональный принтер может обеспечить наивысшую производительность и высококачественное изготовление 3D-моделей различных размеров (область печати: 550×393×300 мм). Устройство может работать самостоятельно более 80 ч. Принтер использует три различных разрешения печати: высокое качество (HD), ультравысокое (UHD) и сверхвысокое (XHD) и дополнительный материал поддержки VisiJet S300.

**ProJet MJP 3600** (*3D Systems*, США) – профессиональный 3D-принтер, позволяющий производить 3D-модели максимально большого размера с наилучшим качеством и детализацией. Устройство использует три разрешения печати: высокое (HD), ультравысокое (UHD) и сверхвысокое (XHD), что расширяет возможности прототипирования. В XHD разрешении слой построения составляет всего 16 микрон, и это позволяет распечатывать модели с высокой детализацией и качеством поверхности. При выборе режима пользователь

может оптимизировать время создания 3D-модели с различной детализацией.

**ProJet 5500x** (*3D Systems*, США) (рис. 3.9) – промышленный 3D-принтер, позволяет создавать высокоточные изделия сразу из нескольких материалов с разными физическими свойствами по технологии MJP, различного качества (гибкие, прочные, износостойкие, прозрачные). Новые материалы VisiJet смешиваются в процессе печати в нужных пропорциях, печатая модели с заданными свойствами.

**3Z Pro** (*SolidScape, Inc.*, США) (рис. 3.10) печатает литьевым воском. Основным предназначением принтера является печать сверхточных моделей для литья. Данная модель отличается высокой производительностью. Размер рабочей зоны 152,4×152,4×101,6 мм. Толщина слоя печати зависит от пользовательских настроек. Устройство оснащено Ethernet интерфейсом, Wi-Fi и USB-портом и имеет функцию возобновления печати в случае непредвиденного сбоя. Автономность принтера достигает 72 ч.



Рис. 3.9. 3D-принтер ProJet 5500x



Рис. 3.10. 3D-принтер 3Z Pro

### ***3.1.2. Аддитивное оборудование на основе инжекционных технологий***

К технологиям, использующим принципы инъекции жидких (расплавленных) полимерных компонентов, относятся технологии Ink-Jet и FDM. В рамках технологии Ink-Jet жидкий связующий состав впрыскивается через многосопловую головку и связывает (склеивает) основной модельный материал, а в FDM происходит послойное наложение расплавляемых нитевидных полимеров. В табл. 3.4 и 3.5 приведены некоторые технические характеристики аддитивного обо-

рудования по технологиям Ink-Jet и FDM соответственно, а также их разновидностей.

Т а б л и ц а 3.4

**Аддитивное оборудование, работающее по технологиям Ink-Jet и CJP**

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати
VX200, <i>VoxelJet</i> , Германия	Ink-Jet	Кварцевый, циркониевый песок, гипс, ПММА, ПС	300×200×150	0,15	10,8 мм/ч*
VX800, <i>VoxelJet</i> , Германия	Ink-Jet		850×500×1500	0,3	35 мм/ч*
VX2000, <i>VoxelJet</i> , Германия	Ink-Jet		2000×1000×1000	0,25... ...0,4	до 21,6 мм/ч (47·10 <sup>3</sup> см <sup>3</sup> /ч**)
VX4000, <i>VoxelJet</i> , Германия	Ink-Jet		4000×2000×1000	0,3	15,4 мм/ч*
M-Flex, <i>Ex-One Company, LLC</i> , США	Ink-Jet	Керамические порошки (SiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , WC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и др.), порошки металлов, пластик	400×250×250	0,15	30...60 с/слой***
Exerial, <i>Ex-One Company, LLC</i> , США	Ink-Jet	То же	2200×1200×700	0,28... ...0,5	(30... ...40)·10 <sup>4</sup> см <sup>3</sup> /ч**
M-Print, <i>Ex-One Company, LLC</i> , США	Ink-Jet	"	750×380×400	0,28... ...0,5	(16... ...86)·10 <sup>3</sup> см <sup>3</sup> /ч**
S-Max, <i>ExOne Company, LLC</i> , США	Ink-Jet	"	1800×1000×700	0,28... ...0,5	(59... ...165)·10 <sup>3</sup> см <sup>3</sup> /ч**
ProJet 860Pro, <i>3D Systems</i> , США	CJP	Гипс	508×381×229	0,15	5...15 мм/ч*
ProJet 660Pro, <i>3D Systems</i> , США	CJP		254×381×203	0,1	28 мм/ч*
ProJet 460Pro, <i>3D Systems</i> , США	CJP		203×254×203	0,1	23 мм/ч*

ПММА – полиметилметакрилат, ПС – полистирол.

\* Скорость печати по оси Z.

\*\* Суммарный объем печати в единицу времени.

\*\*\* Скорость перемещения лазерного луча.

Т а б л и ц а 3.5

**Аддитивное оборудование, работающее  
по технологии FDM термоголовки иницирующего источника**

Наименование оборудования, производитель	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати
FDM Quantum, <i>Stratasys</i> , США	АБС	600×500×600	0,18...0,25	Не заявлена
Dimension 1200es, <i>Stratasys</i> , США		254×254×305	0,25...0,33	12 см <sup>3</sup> /ч**
Fortus 250mc, <i>Stratasys</i> , США		254×254×305	0,178	15 см <sup>3</sup> /ч**
Fortus 450mc, <i>Stratasys</i> , США	АБС, ПК, НЛ, ПЛА, ПЭИ	406×355×406	0,127...0,33	Не заявлена
Fortus 900mc, <i>Stratasys</i> , США	АБС, ПК, НЛ, ПФС, ПЭИ	914×610×914	0,178	
Witbox, <i>BQ</i> , Испания	АБС, НЛ, ПЛА, ПВА	297×210×200	0,1...0,3	80 мм/с*
Zortax M200, <i>Zortrax</i> , Польша	АБС, НЛ, ПЛА, ПК	200×200×185	0,025...0,09	30...300 мм/с*
PRISM Pro, <i>3DQuality</i> , Россия	АБС, ПВА, ПЛА, ПС и др.	D 400×800 (высота)	0,05...1	300 мм/с*
PICASO Designer PRO 250, Россия	АБС, ПЛА, ПЕТ, НЛ, ПС	200×200×210	0,05	до 30 см <sup>3</sup> /ч**
Leapfrog HS XL, <i>Leapfrog</i> , Голландия	АБС, ПЛА, ПЕТ	270×270×590	0,02...0,35	до 100 мм/с*
Leapfrog HEED, <i>Leapfrog</i> , Голландия	АБС, ПЛА, НЛ, Laybrick	350×270×220	0,05	107 см <sup>3</sup> /ч**
Ultimaker 2+, <i>Ultimaker</i> , Голландия		203×203×305	0,02	30...300 мм/с*
MakerBot Replicator Z18, <i>MakerBot Industries</i> , США	ПЛА	305×305×457	0,1	30...150 мм/с*

Наименование оборудования, производитель	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати
CubePro Duo, 3D Systems, США	АБС, ПЛА	243×270×230	0,07...0,2	15 см <sup>3</sup> /ч**
FlashForge Dreamer, Jinhua Flashforge Technology, Китай		230×150×50	0,1...0,5	30...200 мм/с*

АБС – акрилонитрилбутадиенстирол, ПК – поликарбонат, НЛ – нейлон, ПЛА – полилактид, ПЭИ – полиэфиримид, ПВА – поливинилацетат, ПС – полистирол, ПФС – полифенилсульфон, ПЕТ – полиэтилентерефталат, Laybrick – полимер с добавкой мела (имитатор песчаного материала).

\* Скорость печати по оси Z.

\*\* Суммарный объем печати в единицу времени.

**VX200** (*VoxelJet*, Германия) наименьший в линейке производственной программы Voxeljet. Машина очень компактна, проста в использовании и позволяет экономически эффективно осуществлять 3D печать. Рабочее пространство: 300×200×150 мм. Разрешение печати 300 точек на дюйм. Толщина слоя 150 мкм. Печать полностью автоматизирована.

**VX800** (*VoxelJet*, Германия) (рис. 3.11) оснащен 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 dpi и возможность уменьшения шага построения до 80 мкм. Предусмотрена также опция быстрой смены контейнера, на установку которого требуется ~30 с.



Рис. 3.11.  
3D-принтер VX800

**VX2000** (*VoxelJet*, Германия) – флагманская модель в линейке производителя, оборудован большой камерой построения 2060×1060×1000 мм и обладает высокой производительностью ~47 дм<sup>3</sup>/ч. Производственно-технологический комплекс предназначен для работы в цикле серийного про-

изводства металлических отливок. Оборудование позволяет создавать крупногабаритные выжигаемые модели, существенно расширяющие горизонты литейного производства предприятия. Установка легко интегрируется в налаженный производственный процесс благодаря использованию традиционных материалов и процессов изготовления литейных форм по инъекционной технологии. Основным материал – порошок модифицированного полиметилметакрилата.

**VX4000** (*VoxelJet*, Германия) (рис. 3.12) – один из крупнейших в мире 3D-принтеров (рабочее пространство 4000×2000×1000 мм), предназначен для производства любых объектов из сыпучего материала методом 3D-печати. Чтобы повысить производительность, используется особо широкая печатающая головка, которая печатает слой только с двух проходов.



Рис. 3.12. 3D-принтер VX4000

Машины *VoxelJet* позиционируются как более производительные и дешевые альтернативы машинам 3D Systems и EOS.



Рис. 3.13.  
3D-принтер M-Flex

**M-Flex** (*ExOne Company, LLC*, США) (рис. 3.13) – промышленное устройство для трехмерной печати. Принтер позволяет создавать модели из широкого ассортимента материалов, включая металлы, стекло, песочные смеси и др. Напечатанные модели обжигают для спекания частиц расходного материала и удаления связующего полимера, а затем, при необходимости, пропитывают новым связующим материалом высо-

кой прочности и долговечности. Все перечисленные операции включены в производственный цикл устройства. Размер изготавливаемых моделей достигает 400×250×250 мм с минимальной толщиной слоя в 100 мкм. Скорость построения деталей в 10 раз выше, чем на оборудовании предыдущего поколения.

**Exerial** (*ExOne Company, LLC, США*) – промышленная система прямой печати высококачественных песчано-полимерных литейных форм. Это самая большая 3D-машина в линейке ExOne, способная изготавливать большое количество форм для серийного производства. Exerial оснащается сразу двумя камерами печати (общий рабочий объем 3696 л), которые могут работать как независимо друг от друга, так и совместно, создавая один большой проект. При этом система обеспечивает детализацию до 100 микрон.

**M-Print** (*ExOne Company, LLC, США*) используют для серийного производства зубчатых колес и рабочих органов насосов. Эти машины строят грин-модели из металлических и керамических порошковых материалов со скоростью до 6 мм/ч по высоте при размерах рабочей зоны 780×400 мм. Это равнозначно производительности 1780 см<sup>3</sup>/ч, что на порядок выше, чем при использовании лазерных технологий с последующим окончательным спеканием.

**S-Max** (*ExOne Company, LLC, США*) – промышленная установка для трехмерной печати песочных литейных форм. Формы создаются за счет избирательного нанесения капель связующего материала на тонкие слои песка. Готовые изделия могут быть немедленно использованы для заливки. Размер рабочей зоны 1800×1000×700 мм. Толщина наносимого слоя ~280 мкм.

**ProJet 460Pro** (*3D Systems, США*) поддерживает до 390 000 оттенков палитры CMYK. Скорость печати – от 5 до 15 мм/ч и варьируется в зависимости от объема выполняемой детали. Изделия производятся из ZP150 – порошкообразного композитного материала на основе гипса. Из него можно изготовить прочные модели с минимальной толщиной стенок 1 мм. После завершения работы неиспользованный порошок нужно просеять и переместить обратно в рабочую камеру для повторного использования. Для увеличения прочности и яркости готовых прототипов их можно обработать специальными закрепителями. Например, закрепители Z-Bond, Z-Max и соляной раствор позволят увеличить прочность модели от 2 до 5 раз. Отметим, что принтер оснащен пятью печатающими головками, полностью автоматизирован

**ProJet 660Pro** (*3D Systems*, США) обеспечивает реалистичность изготавливаемых 3D-моделей благодаря полноцветной печати, наличию пяти печатающих головок и высокому разрешению печати: 600×540 dpi. Устройство способно одновременно создавать несколько 3D-моделей при максимальном размере построения до 254×381××203 мм. Высокая цветопередача и скорость печати 28 мм/ч позволяют использовать этот принтер в промышленном дизайне, архитектуре, проектировании и даже небольшом производстве.

**ProJet 860Pro** (*3D Systems*, США) (рис. 3.14) является топовым в серии ProJet. Рабочая камера позволяет изготавливать полноцветные



Рис. 3.14. 3D-принтер ProJet 860Pro

3D-модели размерами 508×381×229 мм за короткое время (вертикальная скорость построения 5...15 мм/ч). Устройство обладает полностью автоматизированной настройкой и мониторингом, высочайшим качеством печати и возможностью использовать при печати более 390000 уникальных цветов не считая сотни тысяч возможных их комбинаций.

**FDM Quantum** (*Stratasys*, США) быстро и точно создает функциональные образцы больших размеров и их элементы из ABS-пластика. Скорость построения и простота эксплуатации установки FDM Quantum позволяют изготавливать в течение нескольких часов (в зависимости от размера изделия). Изделия, изготовленные на установке FDM Quantum из ABS-пластика, прочны и долговечны из них можно собирать конструкции для проверки функциональности. Эти изделия сохраняют свои геометрические параметры неограниченное время независимо от влажности, наличия или отсутствия ультрафиолетового или магнитного излучения и выдерживают нагрев до 150 С. Точность изготовления изделий ±0,127 мм. Применение новой технологии WaterWorks, использующий вымываемый материал поддержки, дает неограниченные возможности построения изделий со сложной внешней и внутренней геометрией.

**Dimension 1200es** (*Stratasys*, США) (рис. 3.15) имеет самую большую камеру печати из всех трехмерных принтеров серии Stratasys Design. Работая по технологии FDM, он печатает из термопластмассы ABSplus в девяти цветах. Этот 3D-принтер позволяет выбрать высокое

разрешение или более быструю печать с толщиной слоя в 0,254 мм или 0,33 мм.

**Fortus 250mc** (*Stratasys*, США) – ранняя модель в серии промышленных установок Fortus. Он позволяет создавать точные прототипы, а также конечные детали из термопластика ABS plus P-430. Модели этой серии используют не только для создания прототипов, но и в реальном производстве готовых, конечных изделий. Данный 3D-принтер имеет рабочую камеру размером 254×254×305 мм, высота построения слоя варьируется в следующих значениях: 0,330, 0,254 и 0,178 мм.



Рис. 3.15. 3D-принтер  
Dimension 1200es



Рис. 3.16. 3D-принтер  
Fortus 900mc

**Fortus 450mc** (*Stratasys*, США) – трехмерная производственная система, позволяющая создавать точные воспроизводимые детали: монтажные элементы, крепления, заводские инструменты и конечные детали, а также функциональные прототипы, которые выдерживают жесткое тестирование. Fortus 450mc формирует сложные детали быстрее, чем его предшественники, что позволяет максимально сэкономить время.

**Fortus 900mc** (*Stratasys*, США) (рис. 3.16) – наиболее мощная система, работающая по технологии FDM, характеризуется высокой гибкостью, точностью и экономической эффективностью, имеет два значительных преимущества: все варианты материалов линейки трехмерных производственных систем Fortus и объемную камеру пе-

чати. Производственная система трехмерного прототипирования Fortus 900mc позволяет создавать надежные и точные детали с высокой повторяемостью размером до 914×610×914 мм. Благодаря девяти различным материалам подходит для создания креплений, заводских инструментов и конечных деталей, а также самых сложных трехмерных прототипов. Принтер оснащен двумя отсеками для расходных материалов, чтобы обеспечить максимально непрерывное производство.

**Witbox** (*BQ*, Испания) – настольный полупрофессиональный 3D-принтер, предназначенный для быстрого прототипирования по технологии послойного наплавления (FDM). Основной расходный материал – экологичный, биоразлагаемый полилактид (PLA). Максимальный размер области построения составляет 297×210×200 мм. Толщина наносимого слоя регулируется в пределах 100...300 мкм. Наличие считывающего устройства для карт памяти позволяет осуществлять печать в автономном режиме.

**Zortax M200** (*Zortrax*, Польша) – настольный полупрофессиональный принтер, оснащён корпусом открытого типа, одним экструдером и подогреваемой платформой. В качестве расходных материалов используются полилактид, ABS-пластик, поликарбонаты и нейлон. Минимальная толщина наносимого слоя – 100 мкм. Благодаря автокалибровке платформы, экструдеру с тремя нагревающими элементами и оптимизированной программной архитектуре устройство имеет высокие показатели по качеству печати. Принтер оснащён беспроводным соединением (Wi-Fi) и считывающим устройством для карт памяти SD.

**PRISM Pro** (*3DQuality*, Россия) – FDM-принтер профессионального уровня, выполненный по схеме «дельта-робот». Оснащён закрытым корпусом и подогреваемым рабочим столиком, что позволяет использовать для печати широкий ассортимент расходных материалов, включая PLA, PVA, ABS, HIPS и др. Область построения достигает Ø400×950 мм с минимальной толщиной наносимого слоя всего в 30 микрон.



Рис. 3.17. 3D-принтер Picaso Designer PRO 250

**PICASO Designer PRO 250** (*Picaso 3D*, Россия) (рис. 3.17) оснащён новым экструдером с двойной подачей материала и двумя соплами, что позволяет переключаться между материалами в считанные доли секунды. Объём области построения 200×200×210 мм. Устройство может печатать комбинациями из ABS-пластика, растворимого в ацетоне, и полистирола, растворимого в

лимонене, либо PLA и водорастворимого PVA. В числе возможных материалов для печати – имитатор резины Elastic, нейлон, сополимер ABS и поликарбоната и ПЭТФ.

**Leapfrog HS XL** (*Leapfrog*, Голландия) имеет два экструдера, нагреваемую платформу и рабочее поле, позволяющее печатать объекты до 600 мм. Данный 3D-принтер дает возможность одновременно использовать два различных вида пластика.

**Leapfrog HEED** (*Leapfrog*, Голландия) – автономный принтер со встроенным компьютером, удобным интерфейсом и сетевым соединением через Wi-Fi. Leapfrog Heed обеспечивает печать профессионального качества за счет использования тонкого 0,35 мм сопла и позиционирования с точностью до 0,012 мм. Наличие двух экструдеров позволяет создавать двухцветные модели из пластиков ABS, PLA и PVA либо применять PVA для создания растворимых поддержек.

**Ultimaker 2+** (*Ultimaker*, Голландия) (рис. 3.18) – 3D-принтер для габаритной печати с областью построения 223×223×305 мм. Толщина слоя может составлять от 0,04 до 0,2 мм, скорость печати 30...300 мм/с. Ultimaker 2+ оснащен подогреваемой платформой и использует для печати PLA/ABS/СРЕ-пластики диаметром 2,85 мм. Рабочая температура экструдера от 180 до 260 °С, рабочая температура подогреваемой платформы от 50 до 100 °С.

**MakerBot Replicator Z18** (*MakerBot Industries*, США) – 3D-принтер для крупногабаритной печати (305×305×457 мм). Точность позиционирования печатной головки – 11 мкм по осям X и Y, а по оси Z – 2,5 мкм.

**CubePro Duo** (*3D Systems*, США) – профессиональная версия популярного настольного трехмерного принтера Cube от 3D Systems. CubePro Duo оснащен двумя экструдерами, что создает возможность многоцветной печати. В качестве расходных материалов используются пластики ABS и PLA 23 цветов. Размер печатаемых объектов достигает 242,9×270,4×230 мм. Устройство отличается достаточно высокой скоростью печати, простотой эксплуатации и имеет интерфейс для беспроводного соединения (Wi-Fi).

**FlashForge Dreamer** (*Jinhua Flashforge Technology*, Китай) – 3D-принтер с высоким качеством печати. Принтер оснащён двойным экструдером, что позволяет распечатывать многоцветные модели,



Рис. 3.18. 3D-принтер Ultimaker 2+

ЖК-дисплеем и закрытой камерой. FlashForge Dreamer поддерживает интерфейс USB 2.0, WiFi, а также позволяет печатать с SD-карт. Платформа принтера не нуждается в калибровке.

### 3.1.3. Оборудование с применением порошковых строительных материалов

К способам создания прототипа путем избирательного спекания (плавления) порошков лучом лазера SLS, SLM, LMD, LENS или электронного луча относят CLAD-технологии (EBM-технологии). В рамках технологий Bed Deposition (SLS, SLM, EBM-технологии) на поверхность подвижного стола при помощи ролика подачи наносится тонкий слой порошка. Лазерный (электронный) луч, направляемый сканирующим зеркалом, расплавляет или спекает частицы порошка на нужных участках поверхности. Одновременно они «привариваются» к нижележащему слою. Далее стол опускается на высоту слоя, и цикл повторяется до полного формирования детали. В рамках технологий Direct Deposition (LMD, LENS, CLAD-технологии) порошковый материал непосредственно подается в заданную точку и спекается (плавится) под действием энергии луча. Некоторые технические характеристики аддитивного оборудования по технологиям SLS, SLM, LMD, LENS, CLAD, EBM, DMLS, SHS приведены в табл. 3.6–3.8.

Т а б л и ц а 3.6

#### Аддитивное оборудование, работающее по технологиям SLS и SHS

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницирующего источника
FORMIGA P 110, <i>Electro Optical Systems</i> , Германия	SLS	ПС, ПА	200×250××330	0,06	20 мм/ч*	CO <sub>2</sub> -лазер 30 Вт
EOSINT P 760, <i>Electro Optical Systems</i> , Германия	SLS	ПС, ПА	700×380××580	0,06	32 мм/ч*	CO <sub>2</sub> -лазер 2×50 Вт
EOSINT P 800, <i>Electro Optical Sys-</i>	SLS	ПЭЭК	700×380××560	0,12	35 мм/ч*	CO <sub>2</sub> -лазер 2×50 Вт

<i>tems</i> , Германия						
Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницирующего источника
ProX 500 Plus, 3D Systems, США	SLS	ПС, ПА, фотополимер	381×330××457	0,08... ...0,13	Не заявлена	CO <sub>2</sub> -лазер 100 Вт
DSM1200HI, 3Geometry Manufacturing Systems, Индия	SLS	Силикатный песок	1200×1200×420	0,15	10000 см <sup>3</sup> /ч**	CO <sub>2</sub> -лазер
EOS M 400, Electro Optical Systems, Германия	SLS	Al, бронза, н/сталь, Ni, Ti и др.	400×400××400	0,09	2500 см <sup>3</sup> /ч**	Уб-волоконный лазер 1 кВт
EOS S 750, Electro Optical Systems, Германия	SLS	Силикатный песок	720×380××380	0,2	2500 см <sup>3</sup> /ч**	CO <sub>2</sub> -лазер 2×100 Вт
EOSINT M 280, Electro Optical Systems, Германия	SLS	Al, бронза, н/сталь, Ni, Ti и др.	250×250××325	0,1... ...0,5	Не заявлена	Уб-волоконный лазер 0,4 кВт
HRPS-VI, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd., Китай	SLS	Песок, ПС	1200×1200×600	0,08... ...0,3	600... ...1100 см <sup>3</sup> /ч**	CO <sub>2</sub> -лазер 100 Вт
HRPS-IV, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd., Китай	SLS	Песок, керамика, ПА, ПП, ПС	500×500××400	0,08... ...0,3	80... ...120 см <sup>3</sup> /ч**	CO <sub>2</sub> -лазер 55 Вт
Sinterstation HiQ+HS, 3D Systems, США	SLS	ТП, ЭМ, металлы, КМ	381×330××457	0,07... ...0,2	10 м/с***	CO <sub>2</sub> -лазер 100 Вт
Farsoon SS402, Hunan Farsoon High-tech Co., Китай	SLS	ПА	350×350××430	0,08... ...0,3	3000 см <sup>3</sup> /ч**	

sPro 230 HS, 3D Systems, США	SLS	8 типов ТП, н/сталь	550×550× ×750	0,08... ...0,15	5000 см <sup>3</sup> /ч**	СО <sub>2</sub> - лазер 200 Вт
<i>Окончание табл. 3.6</i>						
Наименование оборудования, производитель	Тех- ноло- гия	Тип мате- риала	Область построения, X×Y×Z, мм	Тол- щина слоя, мм	Ско- рость печати	Тип ини- цирующе- го источника
sPro 60 HD HS, 3D Sys- tems, США	SLS	8 типов ТП, н/сталь + бронза	381×330× ×437	0,08... ...0,15	1800 см <sup>3</sup> /ч**	СО <sub>2</sub> - лазер 70 Вт
SLM 500 HL, SLM Solutions Group AG, Германия	SLS	н/сталь, Al, Ni, инстр/ сталь, Co, Cr	500×280× ×325	0,02... ...0,1	105 см <sup>3</sup> /ч**	Ув- волокон- ный ла- зер 2×0,4 кВт
Blueprinter SHS, Blue- printer ApS, Дания	SHS	ТП порошки	200×160× ×140	0,1	2...3 мм/ч*	Нагрева- ющая ИК- лампа

ПС – полистирол, ПА – полиамид, ПЭЭК – полиэфирэфиркетон, ПП – полипропилен, ТП – термопластик, ЭМ – эластомер, КМ – композиционные материалы

\* Скорость печати по оси Z.

\*\* Суммарный объем печати в единицу времени.

\*\*\* Скорость сканирования лазерного луча.

Т а б л и ц а 3.7

**Аддитивное оборудование, работающее по технологиям SLM и DMLS**

Наименование оборудования, производитель	Тех- ноло- логия	Тип мате- риала	Область построения, X×Y×Z, мм	Тол- щина слоя, мм	Ско- рость печати	Тип ини- цирующе- го источника
M2 cusing, Concept Laser GmbH, Германия	SLM	н/сталь, Ti, Al, Mo, Ni,	250×250× ×280	0,02... ...0,08	2...20 см <sup>3</sup> /ч*	Ув- волоконный лазер 0,4 кВт
X line 1000R, Con- cept Laser GmbH, Гер- мания	SLM	Ag, Co- Cr, Cu и др.	630×400× ×500	0,02... ...0,08	10...100 см <sup>3</sup> /ч*	Ув- волоконный лазер 1 кВт

SLM 280, <i>SLM Solutions GmbH</i> , Германия	SLM		280×280× ×350	0,02... ...0,2	20...45 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-во- локонный лазер 0,4+ +1 кВт
---	-----	--	------------------	-------------------	--------------------------------	--

Окончание табл. 3.7

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницилирующего источника
SLM 500, <i>SLM Solutions GmbH</i> , Германия	SLM	н/сталь, Ti, Al, Mo, Ni, Co-Cr и др.	500×280× ×325	0,02... ...0,2	60...80 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-во- локонный лазер 0,4+ +1 кВт
SLM 100, <i>ReaLizer GmbH</i> , Гер- мания	SLM		125×125× ×100	0,02... ...0,1	10...15 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-во- локонный лазер 0,2 кВт
SLM 250, <i>ReaLizer GmbH</i> , Гер- мания	SLM		250×250× ×300	0,02... ...0,1	10...15 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-во- локонный лазер 0,6 кВт
AM250, <i>Renishaw</i> , Великобри- тания	SLM	н/сталь, Ti, Al, Ni, Co- Cr и др.	250×250× ×360	0,02... ...0,1	5...20 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-во- локонный лазер 0,4 кВт
AM125, <i>Renishaw</i> , Великобри- тания	SLM		125×125× ×125	0,02... ...0,1	5...10 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-во- локонный лазер 0,2 кВт
Farsoon FS271M, <i>Hunan Far- soon Hightech Co.</i> , Китай	SLM	Любые метал- лические порошки	275×275× ×320	0,02... ...0,1	5...20 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-во- локонный лазер 0,5 кВт
PXL, <i>Phenix Systems</i> , Франция	SLM	Металл, керами- ка	250×250× ×300	0,01... ...0,06	10...15 см <sup>3</sup> /ч*	
Lumex Avance-25,	DMLS	н/сталь, ин-	250×250× ×185	0,02	Не заяв- лена	Yb-во- локонный

<i>Matsuura</i> , Япония		стр/стал ь				лазер 0,4 кВт
-----------------------------	--	---------------	--	--	--	---------------

\* Суммарный объем печати в единицу времени.

Т а б л и ц а 3.8

**Аддитивное оборудование, работающее  
по технологиям CLAD, LMD, LENS, EBM**

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницилирующего источника
CLAD Unit, <i>VeAM</i> , Франция	CLAD	Металлические порошки	1000×700×700	0,2...0,8	До 50 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-лазер 0,75...4 кВт
<i>VeAM Magic</i> , <i>VeAM</i> , Франция			1500×800×800	0,2...0,8	28...180 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-лазер 1...4 кВт
<i>VeAM VH</i> , <i>VeAM</i> , Франция			650×700×500	0,1...0,3	0,5...4 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-лазер 0,3...0,5 кВт
<i>MX-1000</i> , <i>InssTek</i> , Южная Корея	LMD		1000×800×650	Не заявлена		Yb-лазер 1...2 кВт
<i>DMD 105D</i> , <i>POM</i> , США	LMD (DMD)	Металл, металлокерамика	750×500×400	0,25...0,7	20...160 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-лазер 1...5 кВт
<i>DMD 505D</i> , <i>POM</i> , США			673×749×474	0,2...1,2	20...150 см <sup>3</sup> /ч*	CO <sub>2</sub> -лазер 1...5 кВт
<i>DMD 5000</i> , <i>POM</i> , США			1400×600×450	0,1...1,4	20...150 см <sup>3</sup> /ч*	CO <sub>2</sub> -лазер 5 кВт
<i>LENS 850-R</i> , <i>Optomec</i> , Италия	LENS	Инструменталь Ti и др.	1000×1500×1000	0,3...1,0	30...150 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-лазер 1...4 кВт
<i>LENS 750</i> , <i>Optomec</i> , Италия			300×300×300	0,3...1,0	30...100 см <sup>3</sup> /ч*	Yb-лазер 0,5...2 кВт
<i>Arcam A2X</i> , <i>Arcam</i> , Швеция	EBM	Металлопорошки, Ti, Co-Cr и др.	200×200×380		55...80 см <sup>3</sup> /ч*	Электронно-лучевой нагрев
<i>Arcam Q20</i> , <i>Arcam</i> , Швеция			350×350×380			

\* Суммарный объем печати в единицу времени.

**FORMIGA P 110** (*Electro Optical Systems*, Германия) – относительно небольшой профессиональный 3D-принтер для 3D-печати методом лазерного спекания. Расходные материалы для Formiga P110 – термопластики, такие как полиамид и полистирол. Изделия, полученные на данном принтере, как правило, используются в виде готовых продуктов, мастер-моделей или форм для литья гипсом. Размеры изготавливаемых изделий могут достигать 200×250×330 мм.

**EOSINT P 760** (*Electro Optical Systems*, Германия) – модель промышленных устройств компании EOS для аддитивного производства из термопластиков. Устройство использует технологию лазерного спекания для печати крупногабаритных моделей размером до 700×380×580 мм. Возможно одновременное изготовление нескольких деталей меньшего размера. Толщина наносимого слоя варьируется от 60 до 180 мкм. Плавка производится двумя лазерами с высокой скоростью сканирования.

**EOSINT P 800** (*Electro Optical Systems*, Германия) (рис. 3.19) – промышленная установка для аддитивного производства термопластиков, адаптированная для печати высокотемпературными пластиками, включая полиэфирэфиркетон, с использованием технологии лазерного спекания при температуре до 385 °С. Большая рабочая зона позволяет создать крупногабаритные модели размером до 700×380×560 мм. Минимальная толщина наносимого слоя 120 мкм. Устройство использует лазер регулируемой мощности.



Рис. 3.19. 3D-принтер EOSINT P 800

**ProX 500 Plus** (*3D Systems*, США) – система для аддитивного производства методом SLS, обеспечивает превосходное качество производимых деталей и высокую точность построения, разработана для промышленного использования. Производит как высококачественные прототипы, так и готовые изделия для автомобильной, медицинской, аэрокосмической отраслей, электроники, строительства и т.п.

**DSM1200HI** (*3Geometry Manufacturing Systems*, Индия) служит для аддитивного производства методом лазерного спекания с повышенной производительностью (до 10 дм<sup>3</sup>/ч). Предназначено для производства силикатных литейных форм, используемых в производстве металлических деталей. Размер рабочей камеры составляет 1200×1200×420 мм. Толщина наносимого слоя варьируется от 150 до 250 мкм.

**EOS M 400** (*Electro Optical Systems*, Германия) – промышленная установка для аддитивного производства методом лазерного спекания, предназначена для создания металлических деталей размером до 400×400×400 мм. В качестве материалов используются алюминий и никель, однако в планы компании входит расширение ассортимента: титан и сталь. Также планируется создание варианта повышенной производительности с четырьмя лазерами.

**EOS S 750** (*Electro Optical Systems*, Германия) позволяет строить филигранные фрагменты песчаных форм размерами до 1 мм. Рабочая зона построения 720×380×380 мм, шаг построения – 0,2 мм, точность построения – 0,3 мм (на длине 720 мм). На машине изготавливают формы и стержни, недоступные по сложности другим технологиям. Она применяется там, где существуют повышенные требования к точности литья и чистоте поверхности отливок. Для работы машины необходим лакированный песок, который нужно закупать у фирмы-изготовителя машины или создать на месте производственные мощности для его изготовления.

**EOSINT M 280** (*Electro Optical Systems*, Германия) – промышленная установка для аддитивного производства металлических деталей методом прямой лазерной плавки. Предназначена для работы с широким ассортиментом материалов – алюминий, титан, инструментальная и нержавеющая сталь, никелевые и кобальт-хромовые сплавы. Размер рабочей зоны 250×250×325 мм с толщиной наносимого слоя от 100 до 500 мкм.

**HRPS-IV** (*Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.*, Китай) – промышленный 3D-принтер, использующий технологию выборочного лазерного спекания для высокоточного производства прототипов,

готовых продуктов и литейных форм. Расходные материалы – термопластики и песчаные смеси. Максимальный размер создаваемых моделей может достигать 500×500×400 мм. Толщина наносимого слоя регулируется во время печати в пределах 80...300 мкм.

**HRPS-VI** (*Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.*, Китай) (рис. 3.20) – промышленная установка для аддитивного производства методом лазерного спекания. Предназначена для создания прототипов, готовых изделий и литейных форм из термопластиков и песчаных смесей, позволяет производить крупногабаритные объекты размером до 1200×1200×600 мм. Толщина наносимого слоя может регулироваться в процессе печати от 80 до 300 мкм. Спекание производится одним лазером мощностью 100 Вт и скоростью сканирования 8000 мм/с.



Рис. 3.20. 3D-принтер HRPS-VI

**Sinterstation HiQ+HS** (*3D Systems*, США) – промышленная система трехмерной печати, основанная на технологии SLS. В отличие от базовой модели, HiQ+HS использует более мощный лазер (100 Вт вместо 30 Вт) с повышенной скоростью сканирования (10 м/с против 5 м/с). В остальном же, версия повышенной мощности сохраняет достоинства предыдущей модели, богатый выбор материалов (эластомеры, металлы, термопластики и композиты), большой размер готовых изделий (до 381×330×457 мм), высокую скорость печати и терморегулирование в течение всего процесса.

**Farsoon SS 402** (*Hunan Farsoon High-tech Co.*, Китай) отличается самой высокой скоростью сканирования (12,7 м/с) в своем классе. Скорость печати достигает 17 мм/ч, т.е. в на 60% выше, чем у FARSOON 401.

**sPro 230 HS** (*3D Systems*, США) (рис. 3. 21) – промышленная система 3D-печати, способная изготавливать высокоточные изделия из инженерного пластика по технологии SLS. sPro 230 – старшая модель в линейке sPro, обладающая максимальным размером рабочей камеры – до 750 мм. Работает с восемью материалами, что позволяет получать изделия с различными физическими характеристиками (термостойкие, ударопрочные, гибкие, выжигаемые и др.). Автоматизированная система подачи и контроля расхода материалов обеспечивает

максимальную эффективность при серийном производстве, имеет две модификации: Base и HS.

**sPro 60 HD HS** (*3D Systems, США*) использует технологию SLS, что позволяет производить детали с высокой прочностью и качеством поверхности без материала поддержки. Устройство оснащено системой сканирования ProScan DX Dual Mode High Speed (digital), которая способна сканировать со скоростью от 6 до 12 м/с. Благодаря рабочей камере объемом 381×330×437 мм можно создавать детали длиной до 437 мм. Принтер ориентирован на единичное и мелкосерийное производство изделий.



Рис. 3.21. 3D-принтер sPro 230 HS



Рис. 3.22. 3D-принтер Blueprinter SHS

**SLM 500 HL** (*SLM Solutions Group AG, Германия*) – промышленная установка для аддитивного производства металлических изделий методом SLM. Принтер обладает камерой большого размера, позволяющей создавать крупногабаритные модели размером 500×280×325 мм. Плавка осуществляется двумя лазерами мощностью 400 или 1000 Вт каждый, минимальная толщина наносимого слоя 20 мкм. В качестве расходных материалов используются порошки из титана, алюминия, стали и других металлов и сплавов.

**Blueprinter SHS** (*Blueprinter ApS, Дания*) (рис. 3.22) – профессиональный настольный трехмерный принтер, использующий технологию выборочного теплового спекания (SHS) для производства высокоточных прототипов из пластиковых порошков. В данном методе для спекания частицы вместо лазера применяется тепловой излучатель, что позволяет снизить стоимость устройства за счет ограничения ассортимента расходных материалов. Размер области построения

прототипов 200×160×140 мм, минимальная толщина наносимого слоя 100 мкм.

**M2 cusing** (*Concept Laser GmbH*, Германия) – промышленная установка для аддитивного производства методом послойного лазерного наплавления по технологии LaserCUSING. Система предусматривает работу с разнообразными металлами, включая реактивные (за счет использования вакуумной рабочей камеры): титан, алюминий, молибден и пр. Готовый продукт практически идентичен литым деталям. Размер готовых изделий достигает 250×250×250 мм. Минимальная толщина наносимого слоя 20 мкм.

**X line 1000R** (*Concept Laser GmbH*, Германия) (рис. 3.23) – промышленная установка для аддитивного производства методом выборочного лазерного наплавления по технологии LaserCUSING. Устройство предназначено для печати деталей из различных металлов и сплавов. Благодаря вакуумной рабочей камере можно работать с реактивными материалами, в том числе титаном. Технология лазерной плавки позволяет достичь высокой точности печати с толщиной слоя всего в 20 мкм. Установка оснащена двумя рабочими столами для обеспечения непрерывного производства. Максимальный размер печатаемых деталей 630×400×500 мм.



Рис. 3.23. 3D-принтер X line 1000R

**SLM 280** (*SLM Solutions GmbH*, Германия) – машина с двумя лазерами: первый 400 Вт для спекания внешней поверхности и тонкостенных элементов детали, второй 1000 Вт – для спекания основного массива детали. На этой машине можно строить детали с толщиной отдельных фрагментов до 0,3 мм, что имеет существенные преимущества: значительно (до 5 раз) увеличивается скорость построения детали,

улучшается структура материала и чистота внешней поверхности ( $Ra = 5-10$ ).

**SLM 500** (*SLM Solutions GmbH*, Германия) (рис. 3.24) – улучшенный принтер серии SLM с увеличенными размерами зоны построения (500×280×335 мм) и базовой двухлазерной системой.



Рис. 3.24. 3D-принтер SLM 500

**SLM 100** (*ReaLizer GmbH*, Германия) предназначена для изготовления малых серий деталей относительно небольшого размера с высокой точностью. Размеры зоны построения 125×125×100 мм, оригинальная оптическая система фокусирует пятно лазерного луча до 20 мкм, что позволяет строить фрагменты детали с толщиной стенки до 60 мкм.

**SLM 250** (*ReaLizer GmbH*, Германия). В машине SLM 250 опционально предусмотрена дополнительная оптическая система, позволяющая уменьшить диаметр пятна лазера с 40 до 20 мкм, а новая система подачи материала формирует слой для построения всего за 4 с.

**AM125, AM250** (*Renishaw*, Великобритания) во многом аналогичны по конструкции машинам SLM Solutions. Достоинство этих машин – высокая степень герметизации рабочей камеры, что позволяет производить глубокую откачку воздуха перед началом построения и после заполнения камеры аргоном (или азотом для неактивных металлов), обеспечивать рабочий процесс при концентрации кислоро-

да в камере ниже 50 ppm с весьма умеренным расходом инертного газа.

**Farsoon FS271M** (*Hunan Farsoon Hightech Co.*, Китай) – промышленный принтер, работающий по технологии лазерного плавления металлов. Благодаря лазеру 500 Вт на стекловолкне Yb, индивидуализированным алгоритмам сканирования, высокой точности и объему построения 275×275×320 мм, FS271M – отличный выбор для пользователей в аэрокосмической, машиностроительной промышленности и в медицине. Установка FS271M способна работать практически с любым металлическим порошком, оснащена новейшими системами безопасности, включая системы подачи инертного газа, и расширенной системой фильтрации газов.

**PXL** (*Phenix Systems*, Франция) – крупнейший в линейке принтеров, использующих технологию прямого спекания металла. Объем рабочей камеры устройства 250×250×300 мм. Принтер оснащен системой автоматизированной загрузки материала и системой переработки, обладает высокой производительностью, высоким качеством изделий, большими скоростями производства и возможностью создавать сложные детали в уже собранном виде. Область использования достаточно широкая: аэрокосмическая и оборонная, производство двигателей и их компонентов, системы охлаждения и др.

**Lumex Avance-25** (*Matsuura*, Япония) сочетает в себе SLM-технологию и механообработку. В рабочей камере Lumex Avance-25 построение детали, как и в других АМ-машинах послойное. Через каждые 10 слоев производится чистовое фрезерование выращенной части детали (шпиндель 43000 мин<sup>-1</sup>). Размеры зоны построения (обработки) 250×250×100 мм.

**CLAD Unit, BeAM Magic, BeAM VH** (*BeAM*, Франция) – машины с возможностью выбора размеров рабочей зоны, мощности лазера и системы подвода порошкового материала в зону расплава, одноили двухсопловую. 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<sub>2</sub> < 40 ppm и H<sub>2</sub>O < 50 ppm. Машины разработаны в рамках национального проекта по созданию технологий для производства деталей аэрокосмического назначения, ремонта деталей авиационных двигателей и технологической оснастки. В качестве строительного материала применяют металлопорошковые композиции дисперсностью от 45 до 75 мкм и от 50 до 150 мкм. Система подачи материала коаксиальная. Последняя модель – MAGIC LF6000 (рис. 3.25), рабочая зона построения

1500×800×800 мм – оснащена двумя соплами для подачи строительного материала.

**MX-1000** (*InssTek*, Южная Корея) имеет CO<sub>2</sub>-лазер от Trumpf, пять осей управления и оснащена многоканальной системой подачи материала.

**DMD 105D, DMD 505D, DMD 5000** (*POM*, США) предназначены для ремонта инструментальной оснастки (штампы, матрицы, кокилы 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. Машины DMD 105D и 505D (рис. 3.26) выполнены в традиционной компоновке на базе пятиосевых обрабатывающих центров. Мощные лазеры (по выбору – от 1 до 5 кВт) обеспечивают высокую производительность – скорость синтеза 24...160 см<sup>3</sup>/ч. Оригинальная система управления позволяет регулировать размер пятна расплава в зависимости от конфигурации элементов строящейся детали: уменьшать размер пятна и соответственно подачу материала в зону расплава при проработке тонкостенных элементов и увеличивать при построении массивных элементов. Рабочие камеры машины DMD 105D герметичны для работы с реактивными материалами. Материалы – инструментальные сплавы, стеллиты, инконели и титановые сплавы.



Рис. 3.25. 3D-принтер BeAM MAGIC



Рис. 3.26. 3D-принтер DMD 505D

**LENS 750** (*Optomec, Inc.*, США) предназначена в основном для научно-исследовательских целей. Машина может быть оборудована двумя или более бункерами для подачи разных материалов в зону расплава. Процесс построения деталей протекает в среде аргона. Преимуществом машин Optomec является быстрая смена материалов – практически за минуты. Высокая скорость охлаждения позволяет регулировать и управлять микроструктурой строящейся детали. Модель LENS 750 в базовой версии имеет три оси управления, в качестве дополнительной опции может быть установлен поворотный стол, обеспечивающий четвертую и пятую оси управления. Точность позиционирования 0,25 мм, производительность до 100 г/ч.

**LENS 850-R** (*Optomec, Inc.*, США) (рис. 3.27) предназначена для промышленного использования, зона построения 1000×1500×1000 мм. Модель LENS 850-R в базовой версии имеет пять осей управления и оснащена двумя бункерами по 14 кг. В машинах Optomec используются порошки с фракционным составом 36...150 мкм.



Рис. 3.27. 3D-принтер LENS 850-R

**Arcam Q20** (*Arcam*, Швеция) – промышленная установка, предназначенная для производства широкого спектра компонентов аэрокосмической отрасли, таких как турбинные лопатки и структурные элементы планера. Благодаря большой области печати ( $\text{Ø}350 \times 380$  мм), установка позволяет производить большие детали и оптимально компоновать в камере мелкие. Оснащена системой контроля качества в процессе печати и системой сбора неиспользованного материала. Печать объектов размером до  $350 \times 350 \times 380$  мм производится методом электронно-лучевой плавки. Технология позволяет одновременную

печать нескольких объектов в пределах габаритов рабочей камеры. С помощью новейшей электронной пушки можно добиться повышенной производительности и точности печати.

**Arcam A2X** (Arcam, Швеция) (рис. 3.28) предназначен для обработки титановых сплавов, а также материалов, которые требуют повышенных температур при плавке. Размеры камеры 3D-принтера 200×200×380 мм. Arcam A2X используют в аэрокосмической отрасли. Процесс построения детали происходит в рабочей камере, предварительно откакумированной до  $<1 \times 10^{-4}$  мбар, точность построения –  $\pm 0,2$  мм на длине 100 мм.



Рис. 3.28. 3D-принтер Arcam A2X

### ***3.1.4. Оборудование с применением листовых и прутковых строительных материалов***

К технологиям, использующим в качестве строительных материалов листовые полуфабрикаты, относятся UAM, LOM, PSL-техно-

логии. К прутковым наплавочным – EBDM и IFF- технологии. Некоторые технические характеристики аддитивного оборудования по технологиям UAM, LOM, PSL, EBDM, IFF приведены в табл. 3.9.

Т а б л и ц а 3.9

**Аддитивное оборудование, работающее по технологиям  
UAM, LOM, PSL, EBDM, IFF**

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницирующего источника
SonicLayer 4000, <i>Fabrisonic LLC</i> , США	UAM	Н/сталь, Ti, Al, Cu и др.	1016×610××610	–	200... ...500 см <sup>3</sup> /ч*	Сварочный аппарат 9 кВт, вертикальное усилие 10 кН
SonicLayer 7200, <i>Fabrisonic LLC</i> , США	UAM	Н/сталь, Ti, инстр. сталь Al, Cu и др.	1829×1829××914	–	до 983 см <sup>3</sup> /ч*	–
SonicLayer R200, <i>Fabrisonic LLC</i> , США	UAM		508×508××152	–	Не заявлена	Сварочный аппарат 4,5 (9) кВт, вертикальное усилие 10 кН
Mcor IRIS, <i>Mcor Technologies Ltd.</i> , Ирландия	LOM	IRIS/Matrix 300+(бумага) цвет	256×169××150	0,1... 0,19	5...60 см <sup>3</sup> /ч*	–
Matrix 300+, <i>Mcor Technologies Ltd.</i> , Ирландия	LOM	IRIS/Matrix 300+(бумага) монохром	256×169××150		5...60 см <sup>3</sup> /ч*	–
HRP-IIIА, <i>Wuhan Binhu Mechanical &amp; Electrical Co., Ltd.</i> , Китай	LOM	Бумага	600×400××500		Не заявлена	–
Solido SD300Pro,	PSL	ПВХ-пленка	160×210××135	0,168	Не заяв-	–

<i>Solido Ltd.,</i> США					лена	
----------------------------	--	--	--	--	------	--

Окончание табл. 3.9

Наименование оборудования, производитель	Технология	Тип материала	Область построения, X×Y×Z, мм	Толщина слоя, мм	Скорость печати	Тип иницирующего источника
ЕВАМ 68, <i>Sciaky Inc,</i> США	EBDM	Н/сталь, Ti, Co, Cr, Ni,Cu	711×635× ×1600	–	3...9 кг/ч*	Электронно-лучевой нагрев
ЕВАМ 150, <i>Sciaky Inc,</i> США	EBDM		2794×1575 ×1575	–	3...9 кг/ч*	
ЕВАМ 300, <i>Sciaky Inc,</i> США	EBDM		5791×1219× ×1219	–	до 18 кг/ч*	
<i>Honeywell Aerospace,</i> США	IFF	Н/сталь, Ti, Al, Inconel	1200×1200× ×1800	–	–	Плазма

\* Суммарный весовой объем печати в единицу времени.

**SonicLayer R200, SonicLayer 7200, SonicLayer 4000** (*Fabrisonic LLC*, США). SonicLayer R200 с рабочей зоной 508×305×524 мм специально разработан для научных целей и малого бизнеса; а машины SonicLayer 4000 и SonicLayer 7200 (рис. 3.29) с рабочей зоной соответственно 1016×1016×610 мм и 1829×1829×914 мм для промышленного применения. В промышленные машины интегрирован трехкоординатный обрабатывающий центр.



Рис. 3.29. 3D-принтер SonicLayer 7200

**Mcor IRIS** (*Mcor Technologies Ltd.*, Ирландия) – полупрофессиональный 3D-принтер для аддитивного производства методом выборочного ламинирования. В качестве расходного материала используется обычная офисная бумага формата А4. Отличительная особенность технологии – возможность воспроизведения моделей в полной цветовой палитре, превышающей миллион цветовых оттенков (True Color). Минимальная толщина слоя составляет 100 мкм при максимальном размере моделей до 256×169×150 мм.

**Matrix 300+** (*Mcor Technologies Ltd.*, Ирландия) (рис. 3.30) – устройство для аддитивного производства методом выборочного ламинирования (SDL) – разновидности технологии LOM, с упрощенной процедурой формирования готовых моделей благодаря нанесению более тонких слоев клея в местах, подлежащих удалению. Расходный материал – обычная бумага формата А4. Объем рабочей зоны 256×169×150 мм. Минимальная толщина слоя 100 мкм.



Рис. 3.30. 3D-принтер Matrix 300+

**HRP-IIIА** (*Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.*, Китай) – вариант промышленной установки HRP-IIВ с рабочей камерой увеличенного размера, позволяющей создавать объекты размером до 600×400×500 мм. Принтер использует технологию аддитивного производства методом ламинирования листовых материалов (LOM).

**Solido SD300Pro** (*Solido Ltd.*, США) (рис. 3.31) – настольное устройство для аддитивного производства методом пластикового ламинирования (PSL). Создает высокопрочные, долговечные прототипы из листового поливинилхлорида (ПВХ). Максимальный размер изделий 160×210×135 мм при вертикальном разрешении в 168 мкм и точности позиционирования в горизонтальной плоскости 10 мкм.



Рис. 3.31. 3D-принтер



Рис. 3.32. 3D-принтер

**ЕВАМ 68, ЕВАМ 150, ЕВАМ 300** (рис. 3.32) (*Sciaky Inc*, США) позволяют выращивать детали, размеры которых исчисляются метрами, что невозможно или чрезмерно дорого при использовании других аддитивных технологий. Электронно-лучевая пушка наносит слои металла со скоростью до 9 кг в час. Модельный материал в данной технологии – фидсток в виде металлического прутка или проволоки, что также является преимуществом технологии, поскольку в таком виде доступны материалы весьма широкого спектра: титан и его сплавы, тантал, инконель, вольфрам, ниобий, алюминий, 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 ЕВАМ 300 с размерами зоны построения 5700×1200×1200 мм, все модификации создаются непосредственно под требования заказчика; давление вакуумной камеры  $1 \times 10^{-4}$  торр; потребляемая мощность – до 42 кВт при напряжении 60 кВ. Машина позволяет в автоматическом режиме последовательно строить до 10 различных деталей в течение одного цикла вакуумизации рабочей камеры.

### 3.2. Расходные материалы для аддитивных процессов

#### 3.2.1. Фотополимеры

Фотополимерные материалы для 3D-печати – это жидкая смола на основе мономеров и фотоинициаторов, которые активируются под действием УФ-излучения. В основном в качестве материала построения используется фотополимерная смола на основе эпоксидных и акриловых мономеров. На текущий момент времени практически все фирмы, производящие 3D-принтеры, работающие по SLA и DLP-технологиям, выпускают собственные марки материалов.

##### *Фотополимерные смолы Stratasys*

**Высокотемпературный фотополимер RGD525** выдерживает нагревание до 75...80 °С после термической обработки готовых моделей. Высокая термоустойчивость позволяет использовать этот материал для прототипирования функциональных патрубков и кранов. За

счет комбинирования материала с имитаторами резины можно создавать композиты с различной твердостью по Шору. Чистый материал имеет белый цвет.

**RGD720** – универсальный фотополимер для имитации стандартных прозрачных термопластиков, обладает высокой прочностью и позволяет создавать модели с гладкими поверхностями.

**VeroClear-RGD-810** – прочный, почти прозрачный материал для имитации органического стекла (PMMA).

**Endur RGD450** – имитатор полипропилена, отличающийся высокой износостойкостью и возможностью создания красивых поверхностей. Материал ориентирован на безопасность, может применяться в офисных условиях и для создания функциональных прототипов или готовых изделий, имеет яркий белый цвет.

**Durus RGD430** – имитатор полипропилена, отличающийся прекрасной ударостойкостью и высокой прочностью на разрыв: удлинение при разрыве достигает 44%.

Семейство фотополимеров **Tango** предназначено для имитации эластомеров с различными показателями прочности по Шору, удлинения при разрыве и прочности на изгиб. В линейку входят четыре материала: **TangoGray FLX950** (серый), **TangoBlack FLX973** (черный), **TangoPlus FLX930** (прозрачный) и **TangoBlackPlus FLX980** (черный).

**MED610** применяется в медицинской отрасли.

**VeroDent MED670**, **VeroDentPlus MED690** позволяет строить модели с вертикальным разрешением до 16 микрон, поэтому модели могут быть с высоким уровнем детализации. Отличается высокой прочностью и износостойкостью.

Цифровой имитатор ABS-пластика производится смешиванием фотополимерных смол **RGD515** и **RGD535** во время печати. Готовый материал имеет высокие показатели теплоустойчивости и прочности, сравнимые с настоящим ABS-пластиком.

### *Фотополимерные смолы 3D Ink*

**UV Resin** – универсальный материал, затвердевающий под воздействием белого, синего и ультрафиолетового света, хотя и предназначен, в первую очередь, для работы с УФ-излучателями. Возможно использование относительно маломощных источников света, включая большинство цифровых проекторов, применяемых в DLP-стереолитографии. Состоит из мономера на основе акрила, инициатора разработки компании Spot-A и ингибитора, предотвращающего слишком

глубокую засветку. Время засветки слоя толщиной в 0,1 мм с помощью DLP-проектора со световым потоком в 2700 лм составляет от 2 до 4 с. Смола пригодна для изготовления мастер-моделей литейных форм, так как не оставляет золу при сжигании.

**UV Resin Clear** практически аналогичен оригиналу, но без ингибитора.

#### *Фотополимерные смолы Asiga*

Asiga предлагает несколько фотополимеров линейки **Plas Range** для быстрого прототипирования. SuperCAST не оставляет продуктов сгорания, что делает этот материал идеальным выбором для производства выжигаемых литейных мастер-моделей.

#### *Фотополимерные смолы Digital Wax Systems*

Серия **DC** предназначена для создания высокоточных выжигаемых мастер-моделей, применяемых для производства ювелирных и стоматологических литейных форм. Материалы ориентированы на производство высокоточных изделий с ровными поверхностями, не требующими дополнительной обработки.

Серия **DM/DL** предназначена для создания высокоточных мастер-моделей, на основе которых формируются резиновые ювелирные литейные формы, включая низкотемпературные материалы, силикон и вулканизированную резину. Данные материалы, содержащие керамический наполнитель, хорошо подходят для создания тонкостенных структур и служат заменой традиционным серебряным мастер-моделям.

Серия **IRIX** – материал, имитирующий натуральный камень, нетоксичный, доступный в ассортименте цветов, включая белый, черный, красный, зеленый и слоновую кость.

#### *Фотополимерные смолы RapidShape*

**GP 101** служит для создания визуальных моделей, моделей для силиконовых литейных форм, моделей для промышленного производства благодаря высокой жесткости и стойкости к температурам до 180 °С.

**CP 200** используют для создания выжигаемых литейных мастер-моделей в ювелирном деле. Обладает высокой механической прочностью при создании дизайнов с микроскопической детализацией.

**CP 201** применяют для создания выжигаемых литейных мастер-моделей в ювелирном деле и стоматологии. Имеет достаточно высокую механическую прочность даже для массивных моделей.

**MP 300** – материал для производства литейных мастер-моделей и промышленного прототипирования. Отличается высокой прочностью, основан на использовании наночастиц.

#### *Фотополимерные смолы MadeSolid*

**MS Resin** – материал общего назначения, пригодный для прототипирования или создания готовых моделей, поставляется в четырех цветах: черном, белом, красном и синем. Готовые изделия имеют приятную матовую поверхность. Низкая вязкость смолы облегчает чистку готовых моделей и принтера. Материал предназначен для применения в большинстве доступных SLA- и DLP-принтеров, включая FormLabs Form 1, B9Creator, Little SLA и Deep Imager 5.

**FireCast Resin** – специальная смола для производства выжигаемых мастер-моделей, используемых для создания литейных форм, так как материал обладает низкой степенью усадки и не оставляет золы после сжигания. Низкая вязкость смолы способствует простоте ухода за принтером и очистке готовых моделей от лишнего материала. Фотополимерная смола FireCast была разработана с учетом совместимости с широким ассортиментом SLA- и DLP-принтеров, включая B9 Creator, Deep Imager 5, Asiga и Formlabs Form 1.

**Tough Resin** – материал для изготовления функциональных прототипов и конечных изделий. Готовые модели отличаются хорошей гибкостью и высокой износостойчивостью. Материал прекрасно подходит для производства защитных корпусов для гаджетов, прототипирования ювелирных изделий и бижутерии.

Фотополимерные смолы **3D Systems** – олигомеры уретана акрилата или изоборнила акрилата.

#### *Фотополимерные смолы на акриловой основе для SLA-технологии*

**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 и функциональных испытаний.

**VisiJet Clear** – поликарбонат-подобный для прототипирования прозрачных изделий.

**VisiJet HiTemp** – с повышенной термостойкостью (до 130 °C).

**VisiJet FTX Cast** – уникальный материал светло-зеленого цвета, созданный специально для 3D-принтера ProJet 1200. Он обладает улучшенными литейными качествами для более широкого диапазона

металлов и других материалов, из которых впоследствии можно выполнить изделия с мелкими деталями, требующими особой точности. Материал также хорошо выгорает, позволяя создавать качественные литейные формы.

#### *Фотополимерные смолы на акриловой основе для MJM-технологии*

Серия материалов **VisiJet® SR200, EX200, HR200** предоставляет безграничные возможности для решения самых разных задач. Технология многоструйной печати (MJM), реализованная в 3D-принтерах 3D Systems, позволяет изготавливать из материалов VisiJet® точные пластиковые модели для экспериментов, функционального тестирования, мастер-моделей, проверки изделий на эргономичность, а также для литья по выжигаемым моделям для различных отраслей. Основные достоинства: прочность, высокая термостойкость, долговечность, стабильность, водонепроницаемость, биологическая совместимость, высокие литейные качества

**VisiJet Crystal** – полупрозрачный жёсткий гипсополимер, УФ-отверждаемый акриловый пластик.

**VisiJet Techplast** – серый пластиковый материал, обеспечивающий экономичную 3D-печать моделей для самых разных сфер. Кроме того, он может применяться для создания выжигаемых мастер-моделей.

Фотополимерные смолы **Fun To Do** производятся одноименной голландской компанией. На данный момент компания предлагает выбор из трех основных материалов на основе акрила, предназначенных для разных целей.

**SB** – стандартная версия, относительно недорога и предназначена для повседневной печати. Эта смола совместима практически со всеми возможными разновидностями стереолитографических 3D-принтеров. Стандартная версия обладает высокой скоростью полимеризации и хорошо подходит для печати слоев от 20 до 50 микрон. Смола поставляется в упаковках объемом 1 или 0,3 л. Доступные цвета включают красный и черный.

**IB** – промышленная версия, обладает повышенной прочностью и стойкостью в широком диапазоне эксплуатационных температур: от –45 °С до 225 °С. Высокая термоустойчивость делает промышленную версию пригодной для использования в процессе вулканизации. Максимальная прочность достигает 75 по шкале Шора «D». Фотополимер доступен в красном и черном цветах.

**СВ** – литьевая версия, предназначена для 3D-печати выжигаемых мастер-моделей, используемых при создании литейных форм для металлических изделий из бронзы, меди, олова, серебра, железа и пр. Твердость литьевой версии достигает 73 по Шору «D».

### ***3.2.2. Полимерные порошковые и прутковые материалы***

Полимерные материалы для аддитивных технологий могут применяться в виде порошков, прутков (технология FDM) (рис. 3.33), пленок (технология PSL). Наиболее распространены порошковые и прутковые полимерные полуфабрикаты для аддитивных технологий.



Рис. 3.33. Полимерные прутковые материалы для FDM-технологий

**ABS** (акрилонитрилбутадиенстирол, АБС) – это ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Этот пластик непрозрачен, легко окрашивается в разные цвета.

Достоинства ABS: долговечность, ударопрочность и относительная эластичность, нетоксичность, влаго- и маслостойкость, стойкость к щелочам и кислотам, широкий диапазон эксплуатационных температур: от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у модифицированных марок до  $103\dots 113\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

К достоинствам следует отнести и невысокую стоимость, растворимость в ацетоне, что позволяет не только склеивать детали из ABS, но также сглаживать с помощью ацетона неровную поверхность. По механической прочности, жёсткости, ударной вязкости и теплостойкости ABS-пластик превосходит другие сополимеры стирола, а также ударопрочный полистирол. Характеризуется хорошей износостойкостью, высокой размерной стабильностью. Он хорошо поддаётся свар-

ке. Поверхности из ABS-пластика пригодны для вакуумной металлизации и напыления гальванического покрытия.

Недостатки ABS: несовместимость с пищевыми продуктами, особенно горячими, поскольку при определенных условиях (высокой температуре) может выделять циановодород; неустойчивость к ультрафиолетовому излучению (не рекомендуется оставлять под прямыми солнечными лучами).

Рабочая температура выше, чем у PLA, и находится в диапазоне 210...270 °С. Термоусадка заметно выше, чем у PLA. Более хрупкий, чем PLA. При работе с нитью ABS ощущается слабый запах. Кроме того, для лучшего прилипания первого слоя модели к рабочему столу требуется подогревать стол примерно до 110 °С.

**PLA** (полилактид, ПЛА) – биоразлагаемый, биосовместимый полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат возобновляемые ресурсы – например, кукуруза или сахарный тростник, поэтому материал нетоксичный и может применяться для производства экологически чистой упаковки и одноразовой посуды, а также в медицине и в средствах личной гигиены. Стоит он немного дороже по сравнению с ABS.

Достоинства: низкий коэффициент трения, делающий его пригодным для изготовления подшипников скольжения; малая термоусадка, особенно в сравнении с ABS; менее хрупкий и более вязкий, чем ABS: при одинаковых нагрузках скорее согнется, чем сломается.

Рабочая температура ниже, чем у ABS, около 180...190 °С. Подогрев рабочего стола не обязателен, но желательно все же нагревать стол до 50...60 °С.

Недостаток – меньшая, чем у ABS, долговечность. Кроме того, PLA более гигроскопичен, поэтому даже при хранении требует соблюдения режима влажности, иначе может начаться расслоение материала и появление в нем пузырьков, что приведет к дефектам при изготовлении модели.

Ацетон практически не оказывает воздействия на PLA, его приходится клеивать и обрабатывать дихлорэтаном, хлороформом или другими хлорированными углеводородами, что требует повышенных мер безопасности при работе.

**HIPS** (High-impact Polystyrene, ударопрочный полистирол) – материал непрозрачный, жесткий, твердый, стойкий к ударным воздействиям, морозу и перепадам температур. При 3D-печати полистирол демонстрирует физические свойства, весьма схожие с популярным ABS-пластиком. Но в отличие от него, полистирол достаточно легко

поддается органическому растворителю лимонену. Так как на ABS-пластик лимонен не влияет, то можно использовать полистирол в качестве материала для построения растворимых поддерживающих структур, особенно сложных, переплетенных моделей с внутренними опорами. В сравнении с удобным, водорастворимым поливиниловым спиртом (PVA-пластиком), полистирол выгодно отличается относительно низкой стоимостью и устойчивостью к влажному климату, затрудняющему работу с PVA. Рабочая температура ~230 °С, цена на 30...50% выше, чем у ABS.

**Нейлон** – легкий, гибкий, устойчивый к химическому воздействию. Детали из него обладают очень низким поверхностным трением. Существует несколько видов нейлона, производимых разными методами и имеющих несколько различных характеристик. Наиболее известен нейлон-66, созданный американской компанией DuPont. Вторым наиболее популярным вариантом – нейлон-6, разработанный компанией BASF в обход патента DuPont. Эти два варианта очень схожи. С точки зрения 3D-печати основное различие – температура плавления: нейлон-6 плавится при температуре 220 °С, а нейлон-66 при 265 °С. В последнее время предпринимаются попытки коммерческой разработки печатных материалов на основе нейлона специально для FDM/FFF устройств, в том числе Nylon-PA6 и Taulman 680. Указанные марки подлежат экструзии при температуре 230...260 °С. При печати нейлоном не рекомендуется полиимидное покрытие рабочего стола, так как эти два материала сплавляются друг с другом. В качестве покрытия можно использовать липкую ленту с восковой пропиткой (masking tape). Подогревание платформы поможет снизить возможность деформации модели, аналогично печати ABS-пластиком. В связи с низким коэффициентом трения нейлона, следует применять экструдеры с шипованными протягивающими механизмами. Слои нейлона прекрасно схватываются, что минимизирует вероятность расслоения моделей. Нейлон плохо поддается склеиванию, поэтому печать крупных моделей из составных частей затруднена, но возможна сплавка частей.

**PC** (Polycarbonate, поликарбонат) привлекателен за счет своей высокой прочности и ударной вязкости, а также устойчивости к высоким и низким температурам, сохраняет свои свойства в диапазоне температур от –40 °С до +120 °С. Обладает высоким светопропусканием и часто заменяет стекло. Температура печати 260...300 °С. Температура экструзии зависит от скорости печати во избежание растрескивания, но минимальной температурой на скорости 30 мм/с можно

считать 265 °С. При печати рекомендуется использование полиимидной пленки для лучшего схватывания с поверхностью рабочего стола. Высокая склонность поликарбоната к деформации требует подогреваемой платформы и, при возможности, закрытого корпуса с подогревом рабочей камеры. Поликарбонат обладает высокой гигроскопичностью (легко поглощает влагу), поэтому материал хранят в сухих условиях во избежание образования пузырьков в наносимых слоях. В случае длительной печати во влажном климате может потребоваться хранить даже рабочую катушку во влагозащитном контейнере.

**PET** (Polyethylene terephthalate, полиэтилентерефталат). Печать с использованием ПЭТ несколько проблематична из-за сравнительно высокой температуры плавления, достигающей 260 °С, и значительной усадки при остывании, составляющей до 2%. Применение ПЭТ в качестве расходного материала требует примерно тех же условий, что и печать ABS-пластиком. Для достижения прозрачности модели необходимо быстро охлаждать при прохождении порога стеклования, составляющего 70...80 °С. Стол подогревается до 50...80 °С. При выполнении всех условий модели из него получаются очень прочными, поскольку слои расплавленного материала отлично склеиваются.

Под аббревиатурой **PVA** (ПВА) продают два материала: поливинилацетат (Polyvinyl Acetate, PVAc) и поливиниловый спирт (Polyvinyl Alcohol, PVAI). По химической формуле они близки, но в поливиниловом спирте отсутствуют ацетатные группы, свойства их совпадают во многом, но не во всем. Поливиниловый спирт PVAI требует рабочей температуры около 180...200 °С, дальнейшее ее повышение нежелательно, так как может начаться пиролиз (термическое разложение). Кроме того, материал очень гигроскопичен, активно поглощает влагу из воздуха, что создает проблемы при хранении и при печати, особенно если диаметр нити 1,75 мм. С другой стороны, это же свойство очень полезно, так как поддержки, сделанные из PVAI, растворяются в холодной воде.

Поливинилацетат PVAc всем хорошо известен как составная часть клея ПВА, представляющего собой водную эмульсию этого вещества. Для него требуется немного более низкая рабочая температура 160...170 °С. Он хорошо растворяется в воде.

**PP** (полипропилен) – широко распространенный пластик, применяемый в производстве упаковочных материалов, посуды, шприцев, труб и пр. Материал имеет низкий удельный вес, нетоксичен, облада-

ет хорошей химической стойкостью, устойчив к влаге и износу и достаточно дешев. Среди недостатков полипропилена можно отметить уязвимость к температурам ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и к воздействию прямого солнечного света.

Главной трудностью при печати полипропиленом является высокая усадка материала при охлаждении – до 2,4%. Для сравнения, усадка популярного, но уже достаточно проблематичного ABS-пластика 0,8%. Несмотря на то, что полипропилен хорошо прилипает к холодным поверхностям, рекомендуется производить печать на подогреваемой платформе во избежание деформации моделей. Минимальная рекомендуемая температура экструзии  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Полипропиленовые нити для печати предлагают на продажу компании Orbi-Tech, German RepRap, Qingdao TSD Plastic. Компания Stratasys разработала имитатор полипропилена, оптимизированный для 3D-печати, под названием Endur.

**HDPE** (полиэтилен высокой плотности) относительно редок среди 3D-печатных материалов. Причиной тому служат сложности при послойном изготовлении моделей. Полиэтилен легко плавится ( $130\text{...}145\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и быстро застывает ( $100\text{...}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), вследствие чего наносимые слои зачастую не успевают схватываться. Кроме того, полиэтилен отличается высокой усадкой, что провоцирует закрутку первых слоев и деформацию моделей в целом при неравномерном застывании. Для печати полиэтиленом необходима подогреваемая платформа и рабочая камера с аккуратной регулировкой температурного режима для замедления остывания нанесенных слоев. Кроме того, потребуется производить печать на высокой скорости.

**PCL** (поликапролактон) – биоразлагаемый полиэстер, отличающийся чрезвычайно низкой температурой плавления  $\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На практике это свойство создает определенные проблемы при 3D-печати, так как далеко не все 3D-принтеры можно настроить для работы при столь низких температурах. Нагревание поликапролактона до привычных экструзионных температур ( $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) вызывает потерю механических свойств и может привести к поломке экструдера. PCL нетоксичен, что обуславливает его применение в медицинской отрасли, и биоразлагаем. Высокая пластичность материала делает возможным многократное использование. Поликапролактон малоприспособен для создания функциональных механических моделей ввиду вязкости (температура стеклования составляет  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и низкой теплостойкости (температура плавления составляет  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). С другой стороны, этот материал прекрасно подходит для производства макетов и пищевых контейнеров. Материал

легко слипается с поверхностью даже холодного рабочего стола и легко поддается окраске.

**PPSU** (полифенилсульфон) – высокопрочный термопластик, активно применяемый в авиационной промышленности. Материал имеет прекрасную химическую и тепловую устойчивость и практически не горит. Полифенилсульфон биологически инертен, что позволяет использовать этот материал для производства посуды и пищевых контейнеров. Диапазон эксплуатационных температур составляет  $-50...+180$  °С. Пластик устойчив к воздействию растворителей и горюче-смазочных материалов. При всех своих достоинствах полифенилсульфон редко применяют в 3D-печати ввиду высокой температуры плавления, достигающей 370 °С. Такие температуры экструзии не под силу большинству настольных принтеров, хотя теоретически печать возможна при использовании керамических сопел. В настоящее время единственным активным пользователем материала является компания Stratasy, предлагающая промышленные установки Fortus.

**PMMA** (полиметилметакрилат) – это всем известное органическое стекло. Материал прочен, влагоустойчив, экологичен, легко поддается склеиванию, достаточно пластичен и устойчив к воздействию прямого солнечного света. К сожалению, акрил плохо подходит для FDM/FFF печати в силу ряда причин. Он плохо хранится в виде катушек с нитью, так как постоянное механическое напряжение приводит к постепенному разрушению материала. Во избежание образования пузырьков разрешение печати должно быть высоким, т.е. с точностью, практически недоступной для домашних принтеров. Быстрое застывание акрила требует жесткого климатического контроля рабочей камеры и высокой скорости печати. Опять-таки показатели скорости печати FDM/FFF принтеров обратно пропорциональны разрешению печати, что усугубляет проблему.

Тем не менее, попытки печати акрилом предпринимаются, а некоторые из них дают относительно положительные результаты. Однако при создании достаточно прочных моделей избежать образования пузырьков и достигнуть привычной прозрачности материала пока не удастся. На данный момент наилучшие результаты с акрилом показывает другая технология печати – многоструйное моделирование (MJM) от компании 3D Systems, в котором используется фотополимерный вариант акрила. Значительных успехов достигла и компания Stratasy, разработавшая собственный фотополимерный имитатор акрила VeroClear для принтеров марки Objet Eden. Остается надеяться, что высокий спрос на акрил приведет к появлению композитных материалов на ос-

нове полиметилметакрилата, предназначенных специально для FDM/FFF печати.

**PEI** (полиэфиримид) – это аморфный термопластический материал, характеризующийся высокой прочностью и термостойкостью. Сохраняет свои свойства при температурах до 170 °С. Наиболее известен под торговой маркой **ULTEM**, имеющей несколько промышленных модификаций (рис. 3.34).



Рис. 3.34. Классификация полиэфиримида марки ULTEM

Наиболее известны две разновидности ULTEM – 9085 и 1010. Эти термопластики, схожие по своим общим эксплуатационным свойствам, имеют некоторые отличия, включая сферы их преимущественного применения. Так как изделия из ULTEM 9085 обладают высокой температурной, механической и химической стойкостью, что в совокупности с надежностью делает их незаменимыми во многих сферах, а в транспортном машиностроении – полноценной заменой металлам. Благодаря высокой прочности (включая нагрузки на разрыв), устойчивости к химическим и температурным воздействиям, низкому коэффициенту теплового расширения ULTEM 1010 – идеальный материал для создания оснастки и прототипов в автомобильной, авиационной, космической промышленности, где к деталям предъявляются особо жесткие требования. Преимущества применения ULTEM в авиакосмической отрасли становятся особенно ценными, если рассматривать удельный вес пластиков этой марки, который в два раза меньше, чем у алюминия.

Эластомер **NinjaFlex** позволяет создавать эластичные изделия. Рабочая температура 210...225 °С, температура стола может быть комнатной или слегка повышенной до 35...40 °С.

Материал **Laywoo-D3** на основе PLA интересен прежде всего тем, что изделия из него по фактуре напоминают дерево и даже пахнут, как деревянные. Дело в том, что его и делают на основе мелких частиц дерева и связующего полимера. Рабочие температуры могут быть в диапазоне 175...250 °С, подогрев стола не требуется. Цвет после застывания будет зависеть от выбранной температуры: чем она выше, тем темнее материал. Меняя температуру во время печати, можно даже получить подобие годовых колец, как на натуральном дереве.

Материал **Laybrick** на основе PLA содержит минеральные наполнители и позволяет имитировать изделия из песчаника. Рабочая температура колеблется в пределах 165...210 °С. С повышением температуры можно получить более грубую поверхность для усиления эффекта имитации. Он также не требует подогрева стола, но по окончании печати следует выждать несколько часов, чтобы модель окончательно затвердела, и лишь потом снимать ее.

### *3.2.3. Металлические порошковые и прутковые материалы*

Металлические 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.

В настоящее время не существует общих требований к металлопорошковым композициям, применяемым в аддитивных технологиях. Разные компании-производители рекомендуют работу с материалом, поставляемым самой компанией.

В разных машинах используются порошки различного фракционного состава. Одним из параметров, характеризующим 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.

Существенный недостаток в производстве порошков – отсутствие стандартов на материалы для аддитивных технологий, а методы оценки свойств материалов, полученных традиционными технологиями, не могут быть применены в полной мере 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). Некоторые стандарты ЕС и США, применяемые для металлических порошков в аддитивных технологиях, приведены в табл. 3.10.

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 для удаления «бракованной» части с дальнейшим перемешиванием «отработавшего» порошка со свежим. Поскольку пропорции смешения устанавливает каждая компания, то идентичность образцов, построенных на одной машине и из одного и того же порошка, не гарантирована.

Т а б л и ц а 3.10

**Марки, составы и нормативные документы на промышленные порошки для аддитивных технологий**

Наименование	Обозначение	Стандарты ЕС	Стандарты США
Коррозионно-стойкая сталь	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L, UNS S 31603
	X5CrNiCuNb16.4	1.4542	Grade 630, UNS S17400
	X4CrNiCuNb164	1.4540	UNS S15500
Жаропрочная сталь	4Cr5MoSiV1	1.2344	AISI H13
Мартенситостареющая сталь	X3NiCoMoTi18-9-5	1.2709	18% Ni Maraging 300 AISI H13
Инконель 625	NiCr22Mo9Nb		UNS N06625
Инконель 718	NiCr19Fe19NbMo3	ISO 6208	AMS 5662, AMS 5664
Коммерчески чистый титан	CP Ti	ISO 5832-2	UNS R50400
Титановый сплав Ti6Al4V	Ti6Al4V	ISO 5832-3	ASTM F136 ASTM F1472
Титановый сплав TiAl6Nb7	TiAl6Nb7	ISO 5832-11	ASTM F1295
Сплав кобальт-хром	CoCrMo	ISO 5832-4 ISO 5832-12	ASTM F75 ASTM F1537
Алюминиевые сплавы	AlSi12		ASTM AA 4047, ASTM A04130
	AlSi10Mg		A03600
	AlSi7Mg		ASTM A13560
	AlSi9Cu3		
	AlMg4.5Mn0.4		

Общим требованием к порошкам для аддитивного оборудования 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.

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. Ес-

ли 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. Поэтому при работе с мелкодисперсными порошками с  $d_{50} < 10$  применяют маломощные лазеры, следовательно, малопроизводительные. Такие порошки (с соответствующими настройками машины) нужны 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 аддитивного оборудования.

Металлопорошковые композиции находят применение в таких высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетика, военная и космическая техника, судостроение, приборостроение.

#### **Области применения металлических порошковых материалов различного состава**

Al-Ni-Co, Fe-Nd-B .....	производство магнитов
Алюминиевая бронза .....	судовые винты
Al-Si-Mg .....	сплавы с термостабильной структурой
Al-Sn-Cu .....	подшипники скольжения
Al-переходные лантаноиды .....	сплавы с повышенной термочувствительностью
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%С .....	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 .....	MIM-технология
Сталь Т42 .....	инструментальная оснастка
Tb-Fe .....	оптико-электронные устройства

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 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 в аддитивных технологиях.

Диспергирование расплава – наиболее производительный, экономичный и эффективный способ получения мелких и средних порошков металлов. 60...70% объема всех промышленных порошков изготавливают именно этим методом. Распыление (атомизация) широко распространена 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 методом диспергирования расплавов, имеют форму частиц, близкую к сферической.

Более 90% всех порошков для аддитивных технологий, получают методами диспергирования расплава, основными из которых являются газовая, вакуумная и центробежная атомизация.

Согласно **газовой атомизации** 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 инерт-

ного газа под давлением. Для мелких порошков ( $d = 10\text{--}40$  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.

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» (рис. 3.35). Применяют как поворотные тиглы, так и тиглы с донным сливом. Для плавки можно использовать керамические или графитовые тиглы. 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).

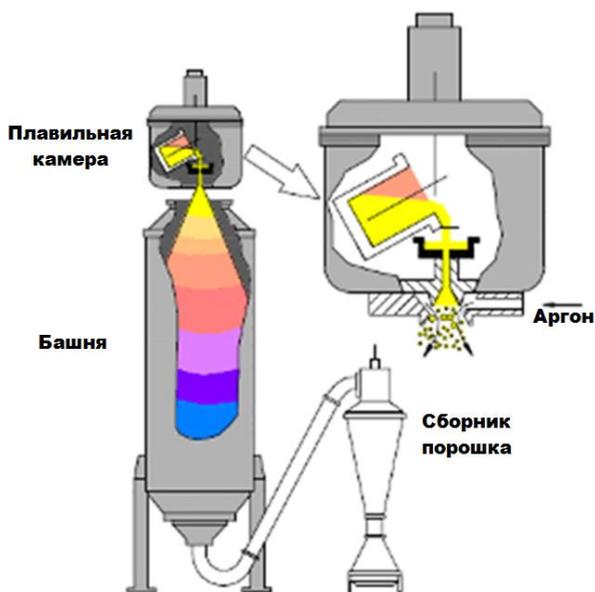


Рис. 3.35. Схема атомайзера VIGA

Технология EIGA (Electrode induction guide inert gas atomization – индукционная плавка электрода с распылением газом) является одним из видов газовой атомизации. Она разработана для получения порошков реактивных металлов (Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo и т.д.), поскольку

плавка в керамических тиглях затруднена даже в условиях вакуума. В EIGA-атомайзерах применяют метод распыления в струе аргона. В конструкции атомайзера может быть предусмотрена возможность слива металла в изложницы, т.е. он может быть и плавильной установкой.

Согласно технологии EIGA, предварительно выплавленные в форме электродов прутки (feed stock – сырье, исходный материал) подвергаются индукционной плавке. Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в кольцевой индуктор. 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 применяться 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.

Разновидность газовой атомизации – 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 металл плавится с помощью плазмы. Например, атомайзер компании Raymot (Канада) содержит три плазматрона – генератора потока ионизированного газа, сфокусированных в точку подвода металла в виде прутка. Недостаток технологии – необходимость специального производства фидстока (прутка диаметром 1...5 мм).

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 состоит в том, что исходный «неправильный» порошок дообрабатывают в струе плазмы, в результате чего частицы порошка приобретают правильную сферическую форму (рис. 3.36). Данная технология может быть применена как для металлических, так и керамических порошков.

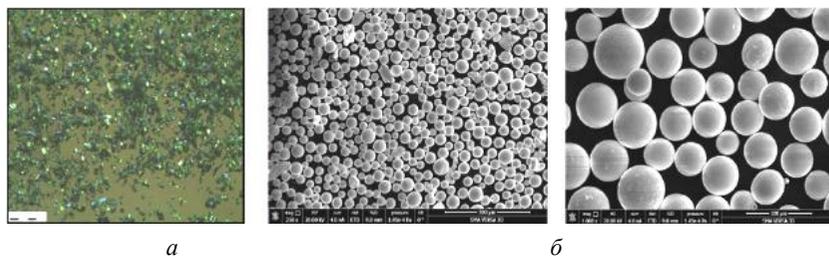


Рис. 3.36. Порошки титана крупностью  $\sim 20 \dots 40$  мкм для 3D-печати: *a* – до плазменной сфероизации; *б* – после плазменной сфероизации

Процесс **вакуумной атомизации** в зарубежной литературе часто называют *soluble gas atomization*, т.е. атомизация за счет растворенного в расплаве газа. Его суть в следующем: атомайзер 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 и далее в распылительную камеру, где создают вакуум. Возникающий перепад давлений побуждает растворенный газ к выходу на поверхность капле расплава и «взрывает» капли изнутри, обеспечивая при этом сферическую форму и мелкодисперсную структуру порошка.

Технологии **центробежной атомизации** весьма разнообразны. Наибольший интерес представляют технологии, которые позволяют получать порошки реактивных и тугоплавких металлов, наиболее ценных для аддитивных технологий. Технология REP – Rotating Electrode Process – предполагает распыливание расплава, создаваемого электрической дугой между прутком (обычно  $\varnothing 15 \dots 75$  мм) материала и вольфрамовым электродом. Главное достоинство технологии – полное исключение контакта расплава с тиглем и разливочными устройствами, как в технологии VIM или при центробежном распылении на вращающемся диске.

Вариантом этой технологии является процесс PREP – Plasma Rotating Electrode Process, в соответствии с которым металлический пруток плавится высокоскоростным потоком ионизированного инертного газа. Технологии REP и PREP применяют для получения особо чистых мелкодисперсных порошков сферической формы.

## 4. ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### 4.1. Характеристика рынка аддитивных технологий

Аддитивные технологии – наиболее динамично развивающаяся отрасль материального производства. В своем ежегодном докладе в Wohlers Report (2013) Terry Wohlers – основатель одноименной консалтинго-аналитической компании, отмечал, что АФ-рынок в 2012 г. вырос на 28,6% по отношению к предыдущему году и общий объем достиг отметки \$2,2 млрд. В 2013 г. рост составил 34,9%, а общий объем – \$3,07 млрд. Ожидается, что до 2021 г. рынок увеличится не менее чем в 4 раза (рис. 4.1). В среднем за 26 лет анализа рынка наблюдается ежегодный устойчивый рост объема продаж мирового рынка АФ-технологий на уровне 27%.

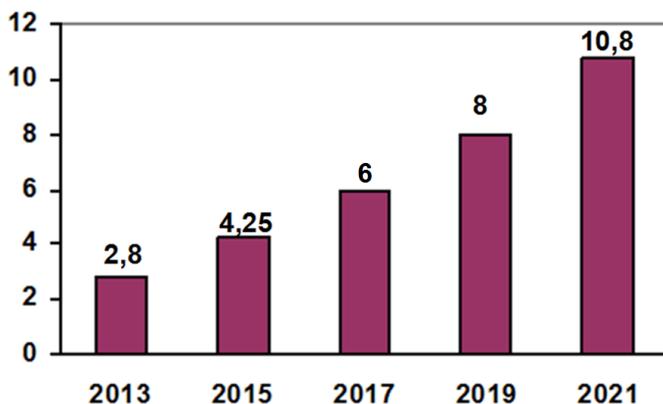


Рис. 4.1. Диаграмма роста объема аддитивного производства в мире в млрд долл. США

Однако в очередном ежегодном докладе в Wohlers Report (2015) прогнозные показатели были еще резко изменены в сторону увеличения. Так в 2016 г. ожидался рост продаж уже до 7,3 млрд долларов США, в 2018 г. – 12,7 млрд, в 2020 г. рынок достигнет 21,2 млрд долларов.

Тем не менее, эта оценка выглядит достаточно консервативно по отношению к аналитическим оценкам других компаний. Так по прогнозам аналитической компании Canalys, объем мирового рынка 3D-печати в 2014 г. вырос на 50% по сравнению с 2013 г. – до

\$ 3,8 млрд, а в 2018 г. достигнет \$ 16,2 млрд, а по оценке компании IDC к 2019 г. составит 26,7 млрд долларов США по сравнению с 11 млрд в 2015 г.

Рост объема будет обусловлен расширением использования аддитивных технологий в области архитектуры, медицины, авиационно-космической, оборонной и ядерной отраслей.

Исследования McKinsey Global Institute свидетельствуют о том, что влияние АФ на мировой ВВП может к 2025 г. достичь \$550 млрд в год.

Согласно отчету Wohlers Report 2015, с 1988 по 2014 г. в мире было установлено 79 602 промышленных 3D-принтера. При этом 38% устройств стоимостью более 5 тыс. долларов США приходится на США; 9,7 % – на Японию; 9,4 % – на Германию и 8,7 % – на Китай. Остальные страны мира значительно отстают от лидеров. Доля России составляет порядка 1,4 % (рис. 4.2).

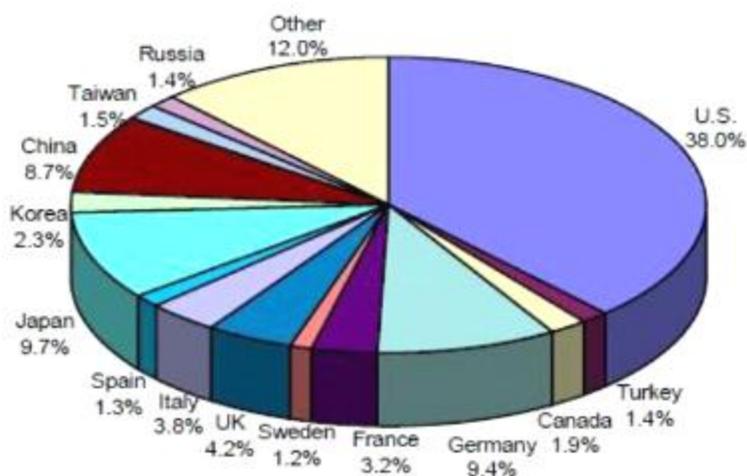


Рис. 4.2. Диаграмма распределения АФ-машин по странам

С 2007 по 2014 гг. годовой объем продаж настольных принтеров вырос с 66 до 139 584 устройств (рис. 4.3). Но в ближайшие годы прогнозируется еще более взрывной эффект производства (главным образом любительских АФ-принтеров) и потребления всех типов АФ-машин (рис. 4.4).

### Технология FDM/FFF (Fused Filament Fabrication)

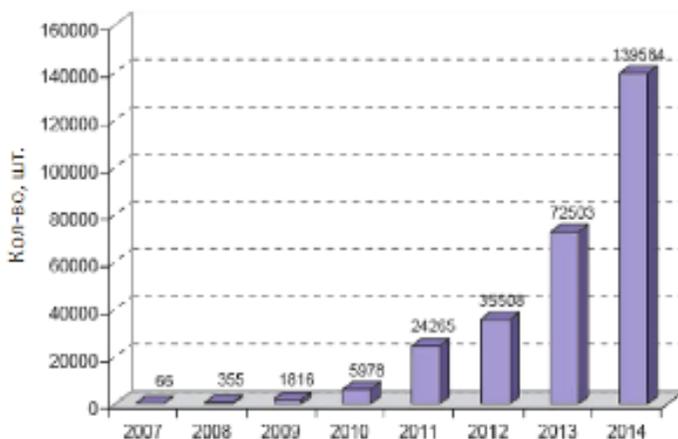


Рис. 4.3. Годовой объём продаж настольных принтеров с 2007 по 2014 гг.



Рис. 4.4. Прогнозные исследования годовых объёмов продаж АФ-машин с 2015 по 2019 гг.

Рынок АF-установок делится на три сегмента. Самые высокие темпы, как отмечалось выше, отмечаются для дешевых 3D-принтеров, ориентированных на создание концептуальных макетов и пригодных для эксплуатации в офисной среде. Второй, занимающий промежуточное положение по стоимости, предназначен для создания прототипов деталей с различной степенью точности и/или функциональности. Дешевые и средние по стоимости установки обычно ориентированы на полимерные материалы (рис. 4.5).

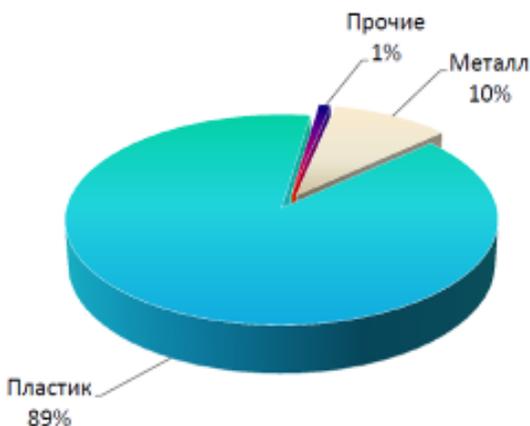


Рис. 4.5. Диаграмма распределения строительных материалов для всех типов АF-установок

Установки высокого класса, составляющие третий сегмент, позволяют производить полимерные, металлические и керамические детали; их цены варьируются от \$200 000 до \$2 000 000.

В 2014 г. 91,6% продаж приходился на настольные 3D-принтеры и 8,4% – на промышленные установки аддитивного производства, прибыль от которых, однако, составила 86,6% от общего объема или 1,12 млрд долларов США в абсолютном выражении. Настольные машины довольствовались 173,2 млн долларов США и 13,4% (рис. 4.6).

Диаграмма применения АF-технологий по отраслям экономики приведена на рис. 4.7. Следует отметить необычно высокую долю здравоохранения – 16,4 %, где в последние годы наблюдается буквально взрывной рост производства индивидуальных протезов и имплантатов по аддитивным технологиям.

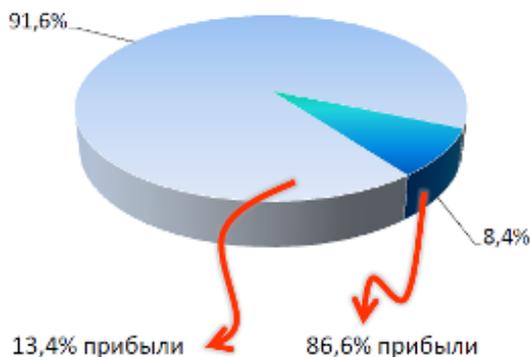


Рис. 4.6. Диаграмма распределения доли производства любительских и профессиональных AF-принтеров и прибыли от их продажи: □ – любительские и полупрофессиональные; ■ – профессиональные и промышленные

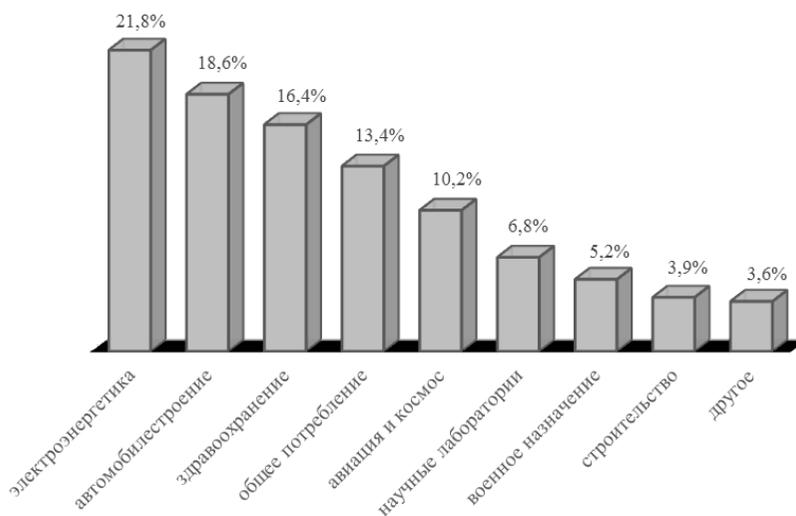


Рис. 4.7. Диаграмма применения AF-технологий по отраслям экономики

Основные области применения технологий быстрого изготовления можно оценить по следующим данным. Из общего объема изделий, производимых с использованием технологий быстрого прототи-

пирования по данным на 2013 г., доли работ, выполненных с помощью АФ-технологий, распределены так:

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

С ростом производства АФ-установок наметилась тенденция к снижению их стоимости. Так за период с 2001 по 2012 гг. средняя цена профессиональных установок снизилась на 37% (рис. 4.8). И эта тенденция будет усиливаться. Так по прогнозам в ближайшие 10 лет стоимость печати на АФ-установках снизится примерно на 92 % (рис. 4.9).

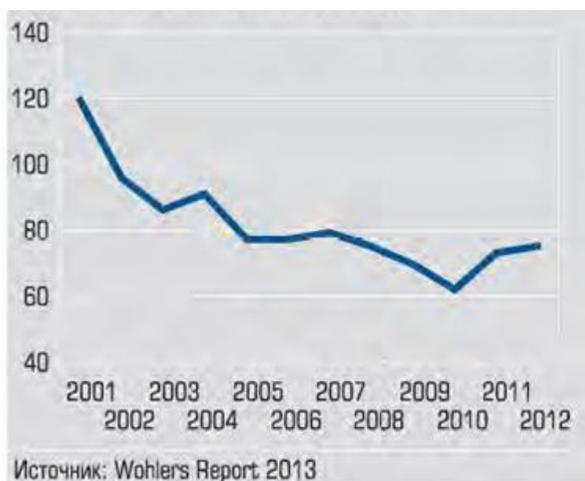


Рис. 4.8. Диаграмма изменения средней цены профессиональных АФ-установок с 2001 по 2012 гг. (\$ США)



Рис. 4.9. Диаграмма прогноза по изменению стоимости печати на АФ-установках в период с 2013 по 2023 гг.

Среди объективных причин снижения стоимости 3D-печати на текущий момент времени можно отметить следующие.

Цена титанового порошка, которая обусловлена единственным пока способом его изготовления – дорогостоящим процессом Кролла, – колеблется от \$ 200 до \$ 400 за килограмм. Однако компания Metalysis (Великобритания) разработала новую, менее затратную технологию производства титанового порошка из рутила (оксида титана) с помощью электролиза. Новый метод позволяет получать порошок разных фракций, разной чистоты, морфологии и на основе разных легирующих элементов. Размеры гранул порошка могут варьироваться от 1...2 мм до 100 мкм. По мнению авторов технологии, себестоимость производства порошка может снизиться на 75%.

Вторым мощным импульсом развития промышленной 3D-печати стало окончание в мае 2014 г. срока действия патентов на технологию селективного лазерного спекания, принадлежащих Техасскому университету в Остине. Эксперты прогнозируют удешевление 3D-принтеров, печатающих по этой технологии, а вслед за этим – и расходных материалов. Такие ожидания основаны на событиях, имевших место в прошлом: несколько лет назад закончилось действие патентов на технологию моделирования методом наплавления, что сопровождалось резким падением цен на принтеры: с нескольких тысяч долларов до \$ 200.

АФ-технологии в настоящий момент удобны для изготовления малых партий изделий, для которых более высокая стоимость специального сырья компенсируется снижением постоянных затрат, связанных с традиционным производством. Это особенно явно проявля-

ется в авиационной и ракетно-космической техниках, для которых характерно малосерийное производство сложных по конфигурации деталей.

Зависимости изменения себестоимости изготовления деталей соответственно методами штамповки и литья под давлением по сравнению изготовлением аналогичных деталей по технологиям SLS от количества изготавливаемых деталей приведены на рис. 4.10, 4.11.



Рис. 4.10. Зависимости изменения себестоимости изготовления деталей методами штамповки и SLS от количества изготавливаемых деталей

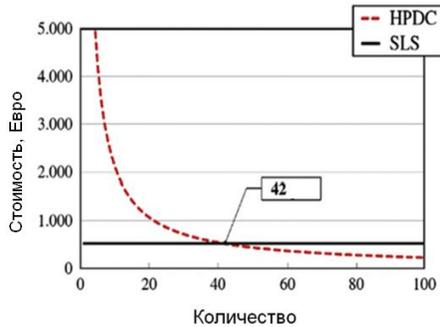


Рис. 4.11. Зависимости изменения себестоимости изготовления деталей литьем под давлением (HPDC) и SLS от количества изготавливаемых деталей

## 4.2. Аддитивные технологии в промышленности

Основные направления применения аддитивных технологий в промышленности в целом и в авиа- и ракетостроении в частности:

- получение готовых рабочих деталей с заданным комплексом эксплуатационных характеристик;
- получение формообразующей оснастки и инструмента для проведения литьевых, штамповочных, гибочных и других типов формообразующих процессов;
- проведение ремонтных и восстановительных работ на деталях и оснастке;
- изготовление экспериментальных и исследовательских макетов для отработки технологии изготовления, оптимизации геометрических и массово-инерционных показателей изделий.

#### 4.2.1. АF-установки в литейных технологиях

При создании новой продукции, особенно на этапе ОКР в опытном производстве, для которого характерны варианты исследования, необходимость частых изменений конструкции и, как следствие, постоянной коррекции технологической оснастки для изготовления опытных образцов, проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой. В опытном производстве преимущественными остаются традиционные методы изготовления литейной оснастки (в основном деревянные модели) вручную или с использованием механообрабатывающего оборудования, реже ЧПУ. Это связано с тем, что на этапе ОКР в условиях неопределенности результата, когда конструкция изделия еще не отработана, не утверждена, для изготовления образцов не целесообразно создавать «нормальную» технологическую оснастку под серийное производство. В этих условиях весьма дорогостоящая продукция – литейная оснастка, оказывается по сути разовой и в дальнейшей работе над изделием не используется в связи с естественными и существенными изменениями конструкции изделия в ходе ОКР. Поэтому каждая итерация, каждое приближение конструкции детали к окончательной версии требует зачастую и новой технологической оснастки, поскольку переделка старой оказывается чрезмерно трудоемкой или вообще не возможной. И в этой связи традиционные методы не только дороги в плане материальных потерь, но и чрезвычайно затратны по времени.

АF-машины используются для получения литейных моделей, мастер-моделей; литейных форм и литейной оснастки.

Литейные модели могут быть выращены из порошкового полистирола (для последующего литья по выжигаемым моделям); фотополимерных композиций, в частности, по технологии Quick-cast для последующего литья по выжигаемым моделям или по технологии МЖМ для литья восками по выплавляемым моделям.

*Получение литейных моделей.* Литье по выжигаемым моделям в керамические формы относится к категории точного литья и применяется для получения сложных по форме отливок с высоким классом чистоты поверхности и размерной точности. Данная технология используется при производстве ответственных деталей в авиа- и ракетостроении.

Полистирол служит модельным материалом для традиционного литья по выжигаемым моделям. Однако в связи с бурным развитием технологий послойного синтеза он приобрел особую популярность в области прототипирования, а также в промышленном изготовлении

штучной и малосерийной продукции. Полистирольные модели изготавливаются на AF-машинах, работающих по технологии SLS – послойного спекания порошковых материалов. Эту технологию часто применяют, когда необходимо быстро сделать одну или несколько отливок сложной формы относительно больших размеров с умеренными требованиями по точности.

Преимущества создания выжигаемых полистирольных моделей на AF-установках:

1. Расширение конструктивных возможностей – создание выжигаемых моделей любой геометрической формы. Габариты деталей могут не ограничиваться размерами рабочей зоны. Модели из полистирола могут разбиваться на составные части с предварительным программированием пазов и стыков и склеиваться с помощью воска или парафина.

2. Оптимизация подготовки производства – сокращение цикла конструкторской и технологической подготовки производства металлических отливок до двух-пяти раз благодаря отсутствию этапов, связанных с разработкой, изготовлением и доработкой конструкции матриц и пресс-форм. 3D-модель создается непосредственно с назначенными припусками на механическую обработку, заложенными литниково-питающими и газоотводными каналами и рассчитанным коэффициентом усадки металла.

3. Финансовая выгода – снижение стоимости производства деталей за счет уменьшения съема металла при механической обработке полученных отливок, максимально близких по габаритам к конечным изделиям.

4. Основное преимущество создания выжигаемых моделей из полистирола по технологии SLS перед другими технологиями 3D печати – низкая вероятность образования золы. Даже при выжигании моделей со сложной геометрией уровень зольности – менее 0,1%. Для уплотнения и упрочнения полистирольных моделей может применяться их инфильтрация модельным воском. Напечатанная на 3D-принтере полистирольная модель имеет пористую структуру, поэтому расплавленный воск легко заполняет все микропустоты в изделии. Во время процесса выжигания восковый инфильтрат плавится раньше полистирола при температуре ~400 °C и, когда последний приобретает текучесть, способствует его облегченному удалению из формы, уменьшая массу «выжигаемой части» модели (рис. 4.12).



Рис. 4.12. Схема получения отливок с использованием полистирольных выжигаемых моделей

Другим более традиционным вариантом получения литевых моделей является установление прототипа этой детали из парафина, литевого воска или другого легкоплавкого материала по аддитивным технологиям. После ее формования на 3D-принтерах по МЖМ-технологиям на восковую модель наносится керамическая оболочка. Далее восковая модель выплавляется и удаляется из литевой формы, либо в эту оболочку заливается расплавленный металл, при этом восковая модель выгорает и формируется готовая литая деталь.

В литейном производстве применяют Quick-Cast-модели, т.е. модели для «быстрого литья». Так называют модели, по которым по аналогии с восковыми моделями могут быть быстро получены металлические отливки по тем же технологиям, что и с помощью восковых и полистирольных моделей. Главное отличие моделей Quick-Cast в том, что они имеют сотовую структуру массива стенок: внешние и внутренние поверхности стенок сплошные, а само тело стенки имеет вид сот. При такой структуре существенно, на 70%, снижается общая масса модели, а следовательно, меньше материала нужно будет 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 разрушиться. Сотовая же структура позволяет модели при расширении «складываться» внутрь, не напрягая и не деформируя стенки формы. Это важнейшее преимущество Quick-Cast-технологии.

*Тиражирование литейных моделей с помощью мастер-моделей.* Если методом литья по выплавляемым моделям необходимо изготовить небольшую партию деталей, то сначала выполняется прототип (мастер-модель) из любого материала (АБС, полистирол, воск, фото-

полимеры и др.). Мастер-модели используют для получения так называемых «быстрых форм», в частности, силиконовых, в которые затем заливают полиуретановые смолы или воск для последующего создания форм для литья металлов. Технологии литья в эластичные формы получили широкое распространение в мировой практике. Материалом для форм служат различные силиконы, так как материал обладает малым коэффициентом усадки и относительно высокой прочностью и стойкостью.

Прототип заливается силиконом. После застывания образуется эластичная форма (так называемая soft tooling), которая разрезается на две половинки. В получившуюся разъемную форму заливают литейный воск. Форму можно использовать многократно. Обычно такой способ применяют для получения 20...50 образцов для литья по выплавляемой модели. Силиконовые формы оказываются чрезвычайно эффективны при штучном и малосерийном производстве высококачественных восковок (рис. 4.13–4.15).

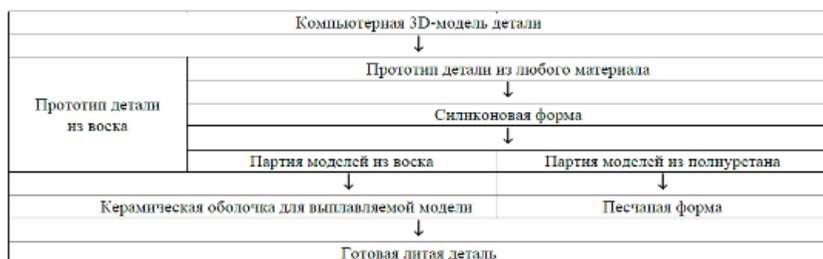


Рис. 4.13. Схемы технологий непрямого изготовления литых деталей из металла



Рис. 4.14. Схема подготовки партии восковых моделей с использованием силиконовых форм



Рис. 4.15. Мастер-модель и полученная с ее помощью силиконовая форма

Аналогичным образом создают эластичную форму для литья в нее более износостойких материалов, например полиуретана. Получившуюся прочную мастер-деталь можно многократно использовать как модель для литья в песок.

Многоразовые модели для литья в песчано-земляные формы могут быть также изготовлены непосредственно на АF-установках прочных и жестких пластиков, таких как АБС, полиамид и др.

*Получение литейных форм и литейной оснастки.* Расширение возможностей литья – создание песчано-полимерных форм и стержней любой сложности конфигурации с поднутрениями, без уклонов с помощью АF-технологий непосредственно по САD-данным. Чтобы управлять кристаллизацией структуры металла, в форме могут быть спроектированы полости для установки металлических пластин или холодильников. 3D-модель создается непосредственно с назначенными допусками на механическую обработку, заложенными литниково-питающими и газоотводными каналами и рассчитанным коэффициентом усадки металла

Для производства песчаных литейных форм (рис. 4.16) используют, как правило, две АF-технологии: послойное спекание плакированного песка лазерным лучом (SLS-технология) и послойное нанесение на песчаную основу связующего состава (Ink-Jet-технология).



Рис. 4.16. Песчаная литейная форма

По первой технологии литейная форма образуется либо непосредственным спеканием керамических порошковых материалов, либо с использованием литейного (силикатного или циркониевого) предварительно плакированного полимером песка. В рамках второго варианта после спекания получается так называемая «грин-модель», которая требует весьма аккуратного обращения при очистке. Для облегчения этого процесса, очищенные места сразу же обрабатывают пламенем газовой горелки. После очистки фрагменты формы помещают в прокалочную печь и окончательно (при температуре 300...350 °С) отверждают массив формы.

Вторая технология похожа на MJM, но на рабочую платформу впрыскивается не строительный материал, а связующий состав. Строительный же материал (литейный песок) подается и разравнивается на рабочей платформе послойно с шагом 0,2...0,4 мм аналогично SLS-системам. В этом случае дополнительная термообработка формы не нужна.

Габариты песчаной формы могут не ограничиваться размерами рабочей зоны. Песчаные формы разбиваются на составные части в САД-редакторе, печатаются, а затем соединяются с помощью эпоксидного клея. Для экономии материала можно создавать тонкостенные формы, которые затем помещаются в опоку. В песчаные формы, произведенные на АF-установках, успешно проводится литье алюминия, магния, стали и чугуна.

«Грин-модели», изготовленные по второму варианту первой технологии и по второй технологии, для упрочнения и повышения жаростойкости иногда пропитывают (инфильтруют) расплавленной бронзой.

В качестве материала формы можно также использовать подходящий металлический порошок. В этом случае получается металлическая форма, которую для прочности и снижения пористости так же пропитывают расплавом бронзы (рис. 4.17).

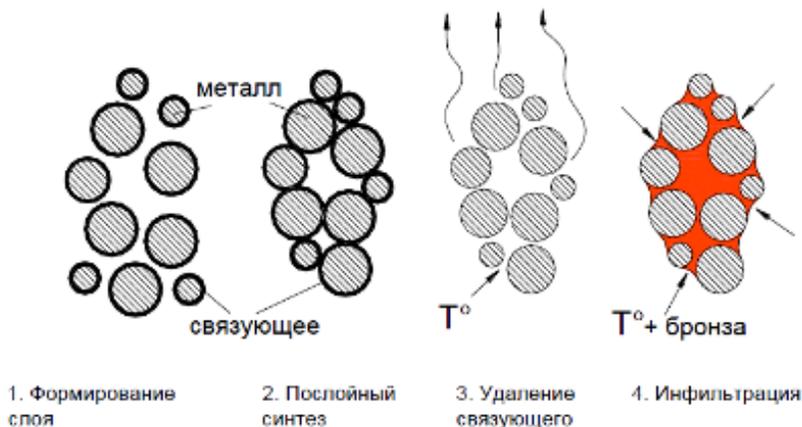


Рис. 4.17. Схема процесса получения изделий из композиций стали и бронзы

Не всегда удастся подобрать смесь порошков, пригодную для изготовления высокопрочной формы. В этом случае поступают таким образом: создают прототип формы по любой технологии быстрого прототипирования и, используя его как образец, делают форму из силикона. Силиконовая форма заполняется смесью порошков стали, карбида вольфрама и полимера. Полимер выступает в роли связующего компонента смеси порошков. Затем полученный «сырец» спекается или помещается в расплав бронзы. Благодаря капиллярным силам расплавленная бронза проникает в поры порошковой формы, попутно выжигая полимер. В результате образуется монолитная матрица для литья. Одна пресс-форма, выполненная по описанной технологии, позволяет выпустить до 1 000 000 литых деталей (рис. 4.18). Нетрудно заметить, что по приведенной выше технологии можно изготовить партию деталей методами порошковой металлургии.



Рис. 4.18. Схемы технологий быстрого прототипирования при изготовлении форм для литья деталей из металла

С помощью АF-установок можно оптимизировать процесс литья в кокиль за счет создания внутренних песчаных стержней высокой сложности, позволяющих получать высокоточные внутренние полости и без трудоемкого этапа механической обработки (рис. 4.19).

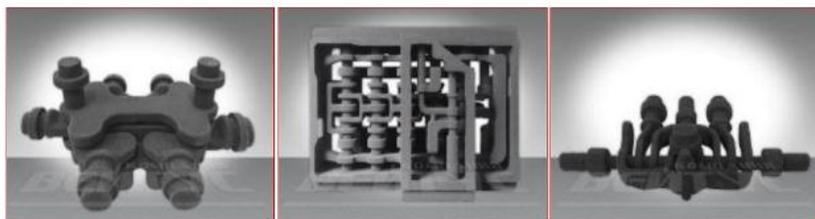


Рис. 4.19. Варианты песчаных стержневых элементов литейной оснастки

Еще одним способом получения форм для литья пластмасс является использование метода электродугового напыления. С помощью специального пистолета на прототип напыляют тонкий (1...2 мм) слой специального сплава. Затем эту достаточно прочную металлическую оболочку помещают в разъемную форму и для повышения жесткости заливают эпоксидной смолой с наполнителем. Получившаяся металлическая форма пригодна для литья под давлением, раздува, вакуумной формовки и т.д. Такая технология позволяет изготавливать уже до 50 000 деталей с одной формы.

#### 4.2.2. АF-установки для получения пресс-форм

Технологии быстрого прототипирования можно использовать для быстрого изготовления пресс-форм (рис. 4.20). На первом шаге создается мастер-модель изготавливаемой детали одним из методов быстрого прототипирования. Затем модель заливается специальным сплавом (например, МСР 137) с температурой плавления 145 °С или отверждающейся композицией на основе эпоксидной смолы и стекловолокна или алюминиевого порошка (рис. 4.20, а). Для прочности в отливку могут быть установлены стальные вставки (на рис. 4.20 показаны как Т-образные контуры). На полученную отливку наносится листовой воск, толщина которого равна толщине штампуемого листового материала (рис. 4.20, б). После этого отливаются ответная часть (пуансон) и прижимы листа (рис. 4.20, в). Готовые матрицу и пуансон собирают вместе, чтобы образовался штамп в сборе (рис. 4.20, г). Время изготовления такого штампа – менее 48 ч. Несмотря на внешнюю легковесность, подобный легкоплавкий штамп в состоянии произвести до 2000 деталей из алюминиевого или стального листа. Фотография матрицы пресс-формы, полученной с помощью аддитивных технологий, приведена на рис. 4.21.

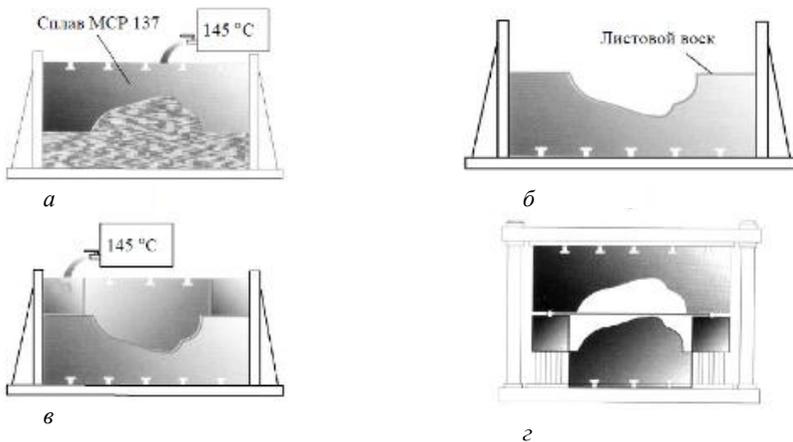


Рис. 4.20. Основные этапы быстрого изготовления пресс-форм с помощью аддитивных технологий



Рис. 4.21. Матрица пресс-формы, полученной с помощью аддитивных технологий: *а* – оснастка и листовой полуфабрикат; *б* – готовое изделие

Для многократного использования пресс-формы могут быть выращены из полимерных или металлических порошков вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки (рис. 4.22). В качестве строительных материалов применяют высокопрочные термопласты, такие как АБС (выдерживает давление 21 МПа), поликарбонат (41 МПа), Ultem (69 МПа). Полученные с помощью АF-установок (например, по технологии FDM) пресс-формы могут применяться для реализации процессов гидроформования (рис. 4.23).

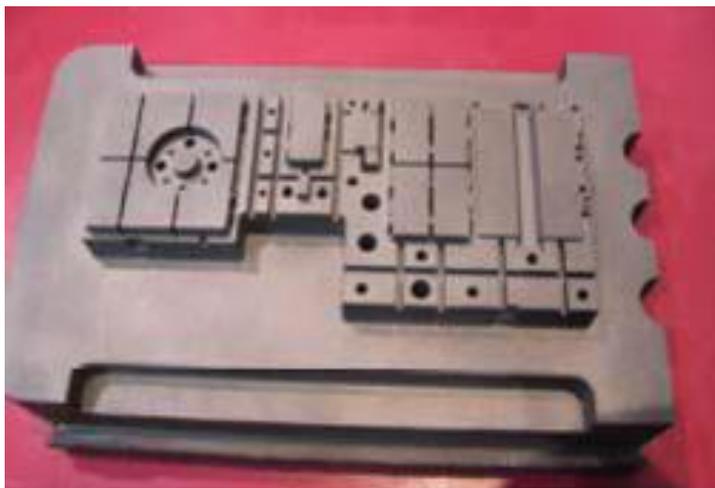


Рис. 4.22. Выращенная пресс-форма для литья термопластов

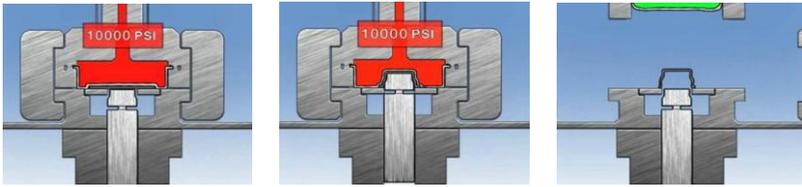


Рис. 4.23. Технология изготовления деталей методом гидроформования с помощью пресс-форм, полученных на АФ-установках

#### ***4.2.3. Типы технологической оснастки, полученные с помощью АФ-установок***

Частный случай использования методов быстрого прототипирования в изготовлении инструмента – послойное выращивание электродов для электроэрозионной обработки пресс-форм или штампов. Такой электрод выполняется из электропроводящего материала (например, из меди или графита) и может иметь достаточно сложную форму.

Эффективность аддитивных технологий высока и при создании и использовании специальных приспособлений для механической обработки в условиях мелкосерийного производства, например, кондукторов для сверления отверстий в изделиях авиационной техники (рис. 4.24).



Рис. 4.24. Кондуктор для сверления отверстий в изделиях авиационной техники

Аддитивные технологии могут применяться при изготовлении оснастки для гибки с вытяжкой. В качестве строительного материала оснастки могут рассматриваться Ultem и поликарбонат. На такой оснастке могут формироваться алюминиевые и магниевые сплавы толщиной до 2,5 мм (рис. 4.25).



Рис. 4.25. Метод гибки с вытяжкой на оснастке, полученной на АФ-установках:  
*а* – оснастка и листовой полуфабрикат; *б* – готовое изделие

По данной технологии и из тех же материалов может быть изготовлена оснастка для гидроформования стальных труб (рис. 4.26).

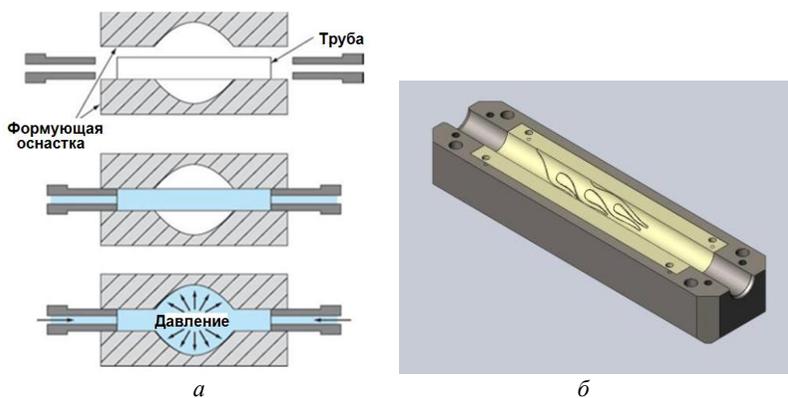


Рис. 4.26. Получение оснастки на АФ-установках для гидроформования труб:  
*а* – схема гидроформования труб; *б* – макет пресс-формы

Полимерные материалы могут быть использованы для изготовления оснастки для вакуумного термоформования (рис. 4.27). Эта

оснастка также может быть получена с помощью аддитивных технологий.



Рис. 4.27. Оснастка для вакуумного термоформования (а); процесс вакуумного термоформования (б)

Все большую популярность при производстве из композитных материалов приобретают эффективные и менее затратные технологии выкладки угле-, стекло- и органического волокна. И здесь у технологии FDM есть решения, включающие автоматизацию процесса создания



Рис. 4.28. Технологическая оснастка, полученная по технологии FDM, для выкладки композиционных материалов

формообразующих поверхностей, а также легко удаляемых сердечников сложных форм. Для этого можно применять растворимые материалы поддержки SR30 и SR100, используемые вместе с ABS-M30 и поликарбонатом. Однако температура в автоклаве при работе с ними не должна превышать 80 °С и 120 °С соответственно. Сердечник же из ULTEM S1 в качестве основного (модельного) материала может работать при температуре 170...180 °С. Впоследствии он легко удаляется либо механическим

способом, либо после термообработки в термоусадочной камере и воздействия ацетоном, в результате чего он становится рыхлым. Растворимые и разрушаемые сердечники широко применяются в качестве оснастки для изготовления каналов, коллекторов, лонжеронов для авиационной и космической промышленности, для гоночных автомобилей, в производстве спортивных товаров и т.п. (рис. 4.28).

#### **4.2.4. Ремонт и восстановление деталей с помощью AF-установок**

Технологии CLAD, DMD, LENS применяют не только для 3D-печати, но и для 3D-ремонта деталей машин. Подобные устройства используют для ремонта крупногабаритных изделий, например, авиационных двигателей и других сложных, ответственных изделий машиностроения. Кроме того, с помощью этих технологий наносят защитные и износостойкие покрытия, например для восстановления геометрии крайних гребешков рабочих лопаток турбины высокого и низкого давления (ТВД и ТНД) (рис. 4.29). Материал рабочих лопаток – никелевый сплав ЖС32-ВИ, ЧС70У-ВИ, присадок – порошок сплава ЭП648-ВИ. Время ремонта сократилось на 90%.

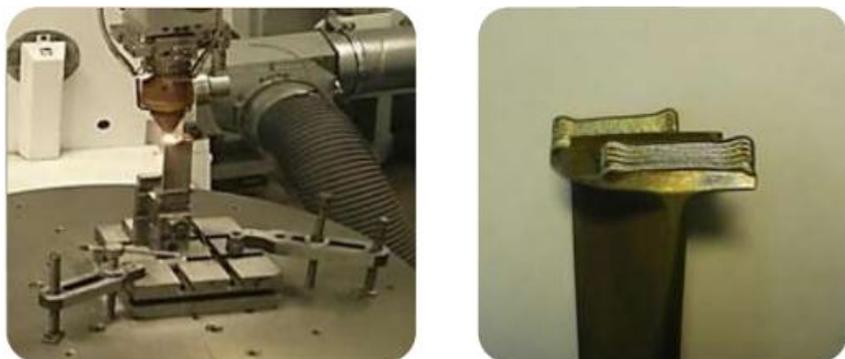


Рис. 4.29. Восстановление геометрии крайних гребешков рабочих лопаток ТВД и ТНД с помощью AF-установок

Экономическая эффективность применения AF-технологий в ремонтных работах авиационных двигателей высокая. Так, использование процесса LENS для восстановления турбинных лопаток на военном складе в Аннистоне (США) привел к экономии \$6297 на каждой детали, что дало годовую экономию \$1 444 416. Аналогично этому, восстановление торцов лопаток в двигателе AV-8B, изготовленных из титанового сплава Ti-6Al-4V, позволяет сэкономить \$715 000 в год. Компания BeAM, производитель оборудования по технологии CLAD, занимается также восстановлением пяти видов деталей для газотурбинных двигателей Pratt & Whitney, увеличивая их срок службы с 10000 до 60000 ч. Экономия достигает десятикратной величины от стоимости первоначальной детали.

В последние годы аэрокосмические компании находятся в поисках более дешевых и быстрых способов производства технологически

важных частей для летательных аппаратов, таких как защитные крышки и решетки для оборудования, поддерживающие стойки внешних элементов корпуса, лонжероны, защитные покрытия кабин и многое другое, на местах эксплуатации, что особо необходимо в чрезвычайных ситуациях. Так, в мае 2014 г. понадобилась незамедлительная замена элементов передней стойки шасси штурмовика AV-8B Harrier ВВС США, совершившего экстренную посадку на палубу авианосца Bataan. В короткие сроки совместными усилиями инженеров базы морской пехоты в Северной Каролине и техников корабля были произведены и заменены все необходимые детали самолета, что стало возможным благодаря использованию АF-технологий.

### **4.3. Аддитивные технологии при изготовлении деталей и узлов авиационной и ракетно-космической техники**

Авиационно-космическая промышленность проявляет повышенный интерес к АF-технологиям с момента их появления; возможность устранить множество ограничений на пути от проекта к производству позволяет реализовать решения, повышающие эффективность и снижающие массу деталей. Более того, по самой своей природе этот рынок требует мелкосерийного производства высококачественных деталей, поэтому избавление от инструментальной, в том числе уникальной специальной оснастки, предлагаемое АF-технологиями, приносит существенные выгоды. Альтернативой аддитивным технологиям является использование ручного труда рабочих высокой квалификации, подготовка которых и их удержание на конкретном производстве – сложные организационно-экономические задачи общегосударственного уровня.

Однако главная проблема внедрения этих технологий в производственный процесс изготовления изделий авиационной и ракетно-космической техники – их сертификация, так как к физико-механическим характеристикам, стабильности этих характеристик, качеству поверхности деталей, изготавливаемых по аддитивным технологиям, предъявляют жесткие требования, которые не всегда возможно выполнить.

Тем не менее, эта проблема крупными мировыми производителями авиационной и ракетно-космической техники постепенно решается, и детали, создаваемые по аддитивным технологиям, уже используются в серийных изделиях летательных аппаратов.

Анализ рынка АF-технологий в авиакосмическом секторе показывает, что они наиболее широко применяются в авиационном двигателестроении. Специалисты General Electric (GE) считают, что в ближайшем будущем половина всех деталей современных авиадвигателей будет изготавливаться при помощи современного оборудования 3D-печати. Потенциальная номенклатура деталей двигательной установки, разработка которой возможна с применением аддитивных технологий, приведена на рис. 4.30.

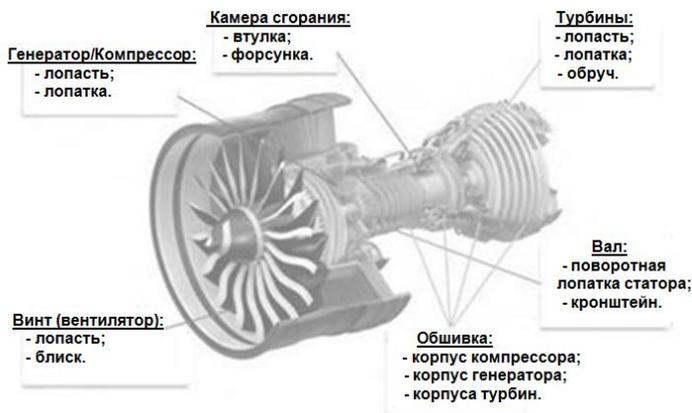


Рис. 4.30. Конструкция ДУ с применением АF-технологий

В 2012 г. рынок аддитивного производства достиг \$ 2,2 млрд, в 2013 вырос до \$ 3,2 млрд, а в 2014 – до \$ 3,8...4,0 млрд. В 22 странах уже созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс GARPA.

Компания P&W (США) использует аддитивные технологии для производства более 100 000 деталей (включая концептуальные модели, модели для литья, оснастку, детали для стендовых испытаний и рабочие детали двигателей). Более 2000 деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий, использовались для поддержки исследовательских программ. Серия двигателей GTF будет первой, в которой детали, получены по аддитивным технологиям. Уже сертифицированы 25 компонентов, сделанных по технологии аддитивного производства, для двигателей PurePower PW1500G и PW1200G, которые планируют устанавливать на самолеты Bombardier Cseries.

Компания General Electric (GE) заявила о готовности к относительно массовому производству топливных форсунок из кобальт-хромового порошка для своего нового



Рис. 4.31. Топливная форсунка для двигателя LEAP

турбовинтового двигателя LEAP-1A, разрабатываемого совместно с фирмой Snecma (Франция), с применением процесса DMLS (рис. 4.31). GE отметила, что сможет производить по меньшей мере 25000 форсунок в год (на один двигатель требуется 19 форсунок). Количество деталей этого узла сократили с 25 всего до 5 элементов. Таким образом, удалось повысить надежность элемента и добиться снижения массы. Масса форсунки на 25% меньше, и она в 5 раз долговечнее. Расчетная экономия топлива – 15%. Кроме того, инженеры GE придумали использовать технологию лазерного спекания для

изготовления кромки лопасти двигателя из титанового порошка. Переход на аддитивные технологии экономит компании порядка \$ 25 тыс. на каждом двигателе.

Напечатанные на принтере комплектующие части получают настолько легкими и обтекаемыми, что, как следствие, приводит к более экономному расходу топлива (на 15%) и снижению уровня загрязнения окружающей среды (на 3%). Исследования ученых Института физики атмосферы космического агентства Германии (IAP DLR) показали, что подобное сокращение выбросов в атмосферу экономит авиакомпаниям до 1 млн долл. ежегодно. Помимо этого, при печати деталей планируется использовать новый керамический композиционный материал, который позволит не тратить энергию на охлаждение двигателя и будет способствовать работе при более высоких температурах.

К 2020 г. фирма GE планирует изготавливать до 100 000 деталей методами AF, при этом рассчитывает на уменьшение массы до 1 000 фунтов на каждый авиационный двигатель. Количество машин для 3D-печати, используемое фирмой, – более 300.

Компания Boeing произвела по AF-технологиям более 22000 деталей 300 наименований для 10 типов военных и гражданских самолетов, производимых компанией. В частности, Boeing установила компоненты, изготовленные из термопластика по процессу SLS, на

гражданских самолетах серий 737, 747 и 777 и использовала несколько сотен таких деталей на самолетах 787-й серии, например патрубков сложной формы для борьбы с загазованностью (Boeing 787 Dreamliner и Airbus A350 XWB), выращенных по AF-технологии (материал



ULTEM 1010) (рис. 4.32).

Рис. 4.32. Патрубок авиадвигателя, полученный по AF-технологии

Множество SLS-деталей установлено на нескольких версиях военных самолетов, таких как самолеты дальнего воздушного радиолокационного обнаружения и управления моделей С-40, AWACS и Р-8. Еще одним примером может служить трубопровод охлаждения (система контроля состояния среды) на истребителе F/A-18E/F Super Hornet, разработанной компанией Boeing для ВМС США. Технология SLS позволила инженерам объединить различные каналы в единые детали, встроить в них механизмы крепления и сократить общее число компонентов. Это стало возможным благодаря сложной геометрии деталей, реализуемой AF-технологией. В итоге процесс сборки упростился и сократился по времени, а масса самолета снизилась.

Поставщики комплектующих для Airbus также применяют технологии аддитивного производства, в частности, при создании нового мощного реактивного двигателя Trent XWB-97 от Rolls-Royce, предназначенного для установки на одну из моделей A350 XWB – A350-1000. С помощью AF-технологий был получен и крупногабаритный титановый корпус передней опоры двигателя. На данный момент проводятся летные испытания двигателя.

Для самолета A320 была оптимизирована и изготовлена по технологии DMLS «облегченная» петля мотогондолы из титанового сплава – Ti6-4 (рис. 4.33). Компания отмечает значительный прогресс в характеристиках произведённых таким способом деталей по сравнению с традиционными методами. Оказалось, что кронштейн, который был рассчитан на 2,3 т нагрузки, в действительности может выдерживать нагрузку до 14 т при снижении его массы на 60% за счет оптимизации топологии при значительном сокращении стоимости.



Рис. 4.33. Оптимизированная петля мотогондолы самолета A320: базовый вариант (справа), оптимизированный (слева)

Компания Airbus к 2018 г. планирует печатать до 30 т деталей ежемесячно. Кроме того, компания печатает детали из алюминиевого листа и топливные коннекторы. В самолётах Airbus насчитывается 60 тыс. частей, напечатанных на 3D-принтерах Fortus компании Stratasys. Другие компании авиакосмической индустрии также используют технологии аддитивного производства. Среди них Bell Helicopter, BAE Systems, Bombardier, Embraer, Honeywell Aerospace, General Dynamics, Northrop Grumman, Lockheed Martin, Raytheon, Rolls-Royce и SpaceX.

В России AF-технологии применяются в авиационной промышленности на предприятиях «Салют», «Сухой», УМПО, «Рыбинские моторы», ОАО «НПО Сатурн», ОАО «НИАТ НТК», ФГУП «ВИАМ» и др.

В оптимизируемых конструкциях авиационных двигателей есть конструктивные особенности, которые просто невозможно сделать традиционными способами. Например, с точки зрения газодинамической эффективности выходные кромки лопаток должны быть очень тонкими. Применение AF-технологий позволяет получить кромки

толщиной порядка 0,15 мм. Литьем этого добиться невозможно. А тонкие кромки – это в итоге более высокий КПД. В Центральном институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова спроектированы и изготовлены по аддитивной технологии дефлекторные рабочие лопатки турбины авиадвигателя (рис. 4.34).

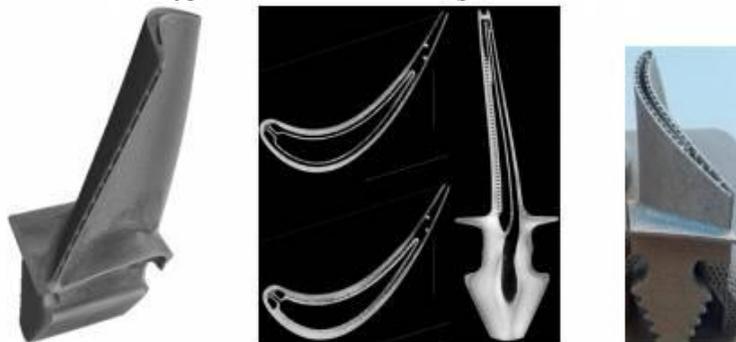


Рис. 4.34. Лопатка дефлекторного типа рабочего колеса турбины высокого давления

В лопатках дефлекторного типа, с точки зрения конвективного охлаждения, реализуется наиболее эффективная структура системы охлаждающих каналов. При такой системе охлаждения избыточное внутреннее пространство может быть окружено тонкостенным дефлектором. Это позволяет значительно уменьшить массу профильной части лопатки и, как следствие, замка и диска рабочего колеса. Дополнительное преимущество использования такой системы охлаждения – возможность уменьшения расхода охлаждающего воздуха.

Такой способ охлаждения (с дефлектором) успешно применяется в сопловых лопатках. Особенности современных рабочих лопаток турбин – их закрутка и искривленность в направлении хорды, что не позволяет использовать дефлекторную систему охлаждения. Попытки изготовить аналогичные конструкции несколько десятков лет назад с помощью пайки не привели к успеху. Места пайки при наработке «раскрывались».

С внедрением АФ-технологий появилась возможность вернуться к дефлекторной системе охлаждения для рабочих лопаток. При этом дефлекторы, являющиеся неотъемлемой частью этих схем, выращиваются одновременно с телом лопатки. Выигрыш в массе при этом может достигать 30 %.

Для деталей авиационных двигателей одна из важнейших задач – минимизация массы конструкции при удовлетворении требований по прочности в заданных условиях эксплуатации. Одним из наиболее важных моментов при проектировании рабочих лопаток турбин, в особенности удлиненных лопаток турбины низкого давления (ТНД), является необходимость отстройки от резонансных частот.

Были спроектированы и изготовлены по аддитивной технологии удлиненные лопатки авиационной турбины низкого давления (рис. 4.35).

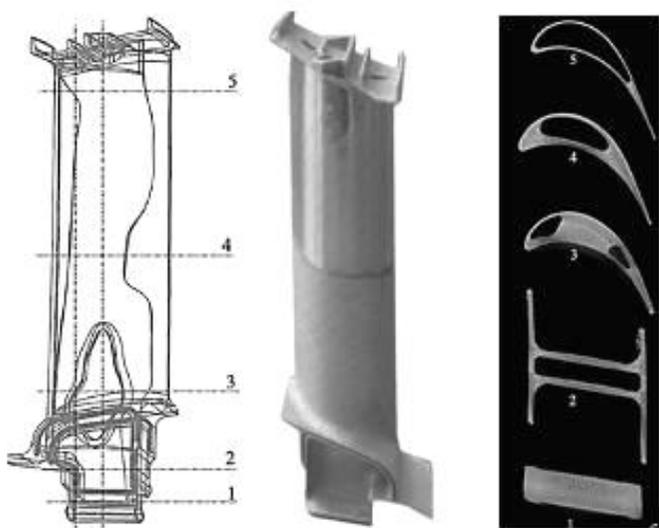


Рис. 4.35. Полая рабочая лопатка турбины низкого давления:  
1–5 – номера сечений

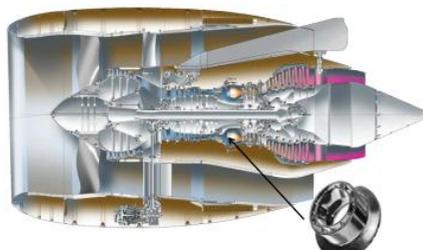
В ОАО «НПО Сатурн» также спроектированы и изготавливают турбинные лопатки из титанового сплава Ti6-4 (рис. 4.36) размером 142×79×86 мм. Расход материала – 530 г. Время аддитивного лазерного спекания – 27 ч 44 мин.

В ОАО «Авиадвигатель» для двигателей ПД-14, предназначенных для среднемагистрального пассажирского авиалайнера МС-21,

были изготовлены завихрители фронтального устройства камеры сгорания методом послойного лазерного сплавления из материала РН1 (рис. 4.37 и 4.38). Аналогичные завихрители для двигателей 100-07, 100-08, 100-09 производят в ФГУП «ВИАМ» методом послойного лазерного сплавления на установке M2 Cusing фирмы «Concept Laser» из порошка ЭП648-ВИ (ВХ4Л).



Рис. 4.36. Турбинные лопатки авиадвигателя



завихрители

Рис. 4.37. Завихритель фронтального устройства камеры сгорания авиадвигателя



**Выращенная заготовка**



**Готовая деталь**



Рис. 4.38. Получение заготовок завихрителя камеры сгорания

В российской компании ОАО «НИАТ НТК» проведены работы по замене сварных топливных форсунок авиационного двигателя на «выращенные» из никелевого сплава CL 100NB (рис. 4.39). В результате значительно снижен процент брака, масса изделия уменьшена на 17%.

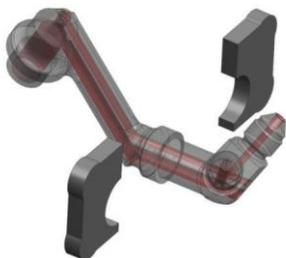


Рис. 4.39. Сварная и «выращенная» топливная форсунка

В ФГУП КМ «Прометей» для ОАО «Климов» с помощью LENS-технологии была изготовлена партия створок вертолетного двигателя (рис. 4.40).



Рис. 4.40. Створка вертолетного двигателя

Ответственные детали аэрокосмического назначения из специальных сплавов изготавливаются также по технологии Spray forming, в основу которой положены аддитивные методы получения заготовок (рис. 4.41).



Рис. 4.41. Детали авиадвигателя, полученные по технологии Sprayforming

По AF-технологиям (FDM, DMLS, SLS) для ОПК боевых изготавливают беспилотные летательные аппараты (БЛА) и учебные «дроны» для подготовки персонала ВВС и всех подразделений Министерства обороны.

Большое количество зарубежных компаний, среди которых Boeing, Draganfly, Leptron, Embry-Riddle, Swiss UAV, Aurora Flight Sciences и многие другие, используют возможности трехмерной печати для создания беспилотных летательных аппаратов. Среди зарубежных БЛА интерес представляет аппарат Aurora Flight Sciences (AFS), на 80% собранный из деталей, выращенных по аддитивным технологиям (рис. 4.42). Конструктивные элементы этого аппарата изготовлены по FDM, DMLS, SLS-технологиям; сопло из сплава Inconel 718 – по технологии DMLS, топливный бачок с узлами крепления к корпусу – по SLS-технологии, элементы корпуса из различных термопластичных полимеров – по FDM-технологии (рис. 4.43). На рис. 4.44 приведены фотографии корпусных элементов БЛА, полученные по FDM-технологии.



Рис. 4.42. БЛА Aurora Flight Sciences

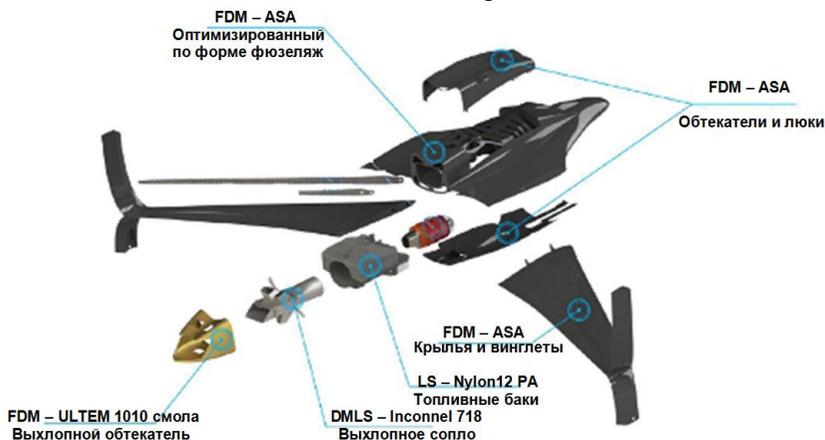


Рис. 4.43. Конструктивные элементы БЛА Aurora Flight Sciences, изготовленные по AF-технологиям

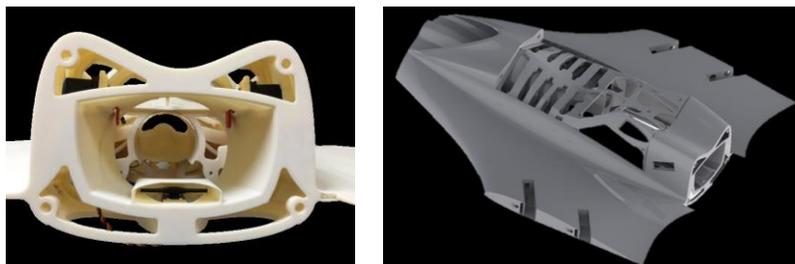


Рис. 4.44. Корпусные детали БЛА Aurora Flight Sciences, изготовленные по FDM -технологии

К другим конкретным примерам применения AF-технологий в БЛА относятся разрабатываемые кронштейны видеокамер для наступательных БЛА Taranis компании BAE Systems и «дроны» двойного назначения RDASS 4 компании Leptron и Samarai корпорации Lockheed Martin. В итоге внедрения AF-технологий по указанным военным инновационным разработкам были получены результаты, приведенные в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

**Экономический эффект внедрения AF-технологий в производство RDASS 4**

Метод	Расходы, \$	Время изготовления, мес
Литье под давлением, обработка на станках с ЧПУ	250 000	14
FDM оборудование	103 000	8
Экономический эффект	147 000 (59%)	6 (43%)

Всероссийский институт авиационных материалов (ВИАМ) и Фонд перспективных исследований (ФПИ) проводят научно-исследовательские работы по созданию первого в стране беспилотного лета-

тельного аппарата, оснащенного малоразмерным газотурбинным двигателем, полностью напечатанном на 3D-принтере (рис. 4.45). Этим двигателем планируется оснастить сразу два беспилотных летательных аппарата: самолет-мишень «Дань-М» и разведчик «Зеница».



Рис. 4.45. Газотурбинный двигатель для БЛА, изготовленный по АФ-технологиям

Двигатель полностью изготовлен на базе аддитивного производства ВИАМ по технологии послойного лазерного сплавления с использованием металлопорошковых композиций жаропрочного и алюминиевого сплавов, созданных специалистами института. Благодаря применению аддитивных технологий удалось напечатать детали двигателя с уникальными параметрами, невозможными при обычном литье. Например, толщина стенки камеры сгорания двигателя составляет 0,3 мм. Таких параметров можно достичь только с помощью 3D-печати.

Аналогичные работы проводят в компании General Electric, где по 3D-технологиям изготовили миниатюрный турбореактивный двигатель, который является уменьшенной копией одного из реальных реактивных двигателей со скоростью вращения ротора до 33 тысячи оборотов в минуту (рис. 4.46).



*а*



*б*

Рис. 4.46. Турбореактивный двигатель компании GE: *a* – детали двигателя, напечатанные на 3D-принтере; *б* – работающий двигатель

Возможности аддитивных технологий при производстве изделий РКТ открывают перед конструкторами и технологами широкие перспективы. В первую очередь эти технологии применимы при производстве ракетных двигателей (РД), антенн, крупногабаритных тонкостенных конструкций (баков, герметичных отсеков, трубопроводов) и др.

Компанией Aerojet Rocketdyne (США) совместно с Научно-исследовательским центром NASA им. Гленна (Кливленд) при помощи SLM-установки был произведен и успешно протестирован инжектор двигателя для ракеты RL-10.

Другой центр NASA, Центр космических полетов им. Джорджа Маршалла (Хантсвилл), и компания Directed Manufacturing провели огневые испытания инжектора, разработанного по государственной американской программе сверхтяжелого ракетносителя для пилотируемых полетов Space Launch System. Данное событие имело важное значение, во-первых, потому что был представлен самый большой 3D-печатный компонент РД, состоящий к тому же всего из двух частей, в то время как похожие инжекторы состояли из 115 деталей. Во-вторых, при экстремальных воздействиях были проверены свойства материала инжектора (порошковый сплав никеля и хрома). Во время испытаний через инжектор пропустили жидкий кислород и газообразный водород в камеру сгорания, таким образом, увеличив тягу двигателя в 10 раз (до 9,07 кг). После ряда положительных испытаний инжектор Directed Manufacturing рассматривается в качестве основной детали на РД J-2X или RS-25, которую планировали установить на Space Launch System. Перейдя на аддитивное производство жаропрочных инжекторов для РД (SLM-технологии) NASA планирует сократить время изготовления с шести месяцев до трех недель и снизить затраты с \$10 000 до \$5 000 за каждую деталь.

Специалистам NASA удалось создать полномасштабную медную часть ракетного двигателя при помощи 3D-печати (рис. 4.47).



Рис. 4.47. Сопловая часть РД, полученная при помощи 3D-печати

Для охлаждения стенок двигателя гильза камеры сгорания (КС) содержит более 200 мелких каналов между внутренней и внешней стенкой, где протекает холодное топливо. Медная гильза КС получена по SLS-технологии путем наложения друг на друга 8255 слоев медного порошка. Время формования – 10 дней и 18 часов.

Значительных успехов в применении аддитивных технологий достигла компания Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX), изготовившая камеру двигателя SuperDraco многоразового космического корабля Dragon. Именно особенности DMLS-технологии позволили довести тягу созданного РД до 7257,48 кг, что обеспечит космический корабль маневренностью и точностью управления на орбите и во время прохождения через атмосферу Земли.

Компания United Launch Alliance (ULA) использует трехмерную печать на оборудовании Stratasys для создания более совершенной и экономически выгодной технологической оснастки для уменьшения стоимости производства бортового оборудования ракет-носителей Atlas V и Delta IV. Новая инициатива компании – применять ULTEM 9085 в конструкции ракеты с условиями эксплуатации от  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+107\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Протестированный материал служит для производства воздуховодов системы кондиционирования воздуха усовершенствованной

конструкции (рис. 4.48) за счет уменьшения числа деталей со 140 до 16, что и сокращает издержки на 57%.



Рис. 4.48. Элемент системы кондиционирования воздуха усовершенствованной конструкции ракетносителей Atlas V и Delta IV, полученный по AF-технологиям

Технология DMSL активно используется при строительстве спутников. Инженеры Airbus Defence and Space (подразделения Airbus Group) успешно применили метод для оптимизации конструкции кронштейнов, связывающих корпус спутника с солнечными батареями и радиоантеннами. Созданные на установке EOSINT M 280 детали соответствовали требуемым техническим условиям: выдерживали сильное напряжение на конструкцию (до 20 кН) и температуру (–180 °С до +150 °С). В дополнение к техническим характеристикам, процесс использования 3D-печати на 20% сократил расходы на производство и трудоемкость изготовления кронштейнов. Основные показатели эффективности применения АП-технологий на примере производства кронштейнов компанией Airbus Defence and Space:

- 1) позволяет сократить время изготовления трех деталей до 1 месяца, а время сборки со смежными компонентами – на 5 дней;
- 2) вместо ряда традиционных операций обработки можно создавать деталь в одном технологическом действии;
- 3) масса напечатанной детали на 300 г легче базовой конструкции, что дает почти 1 кг экономии для целого спутника;

4) напечатанные из порошка титана детали с бóльшей вероятностью сохраняют находящиеся на спутнике оборудование от возможных сбоев.

Компанией RedEye были изготовлены топливные баки для спутников Lockheed Martin Space Systems. С применением 3D-технологий были напечатаны 10 частей для баков диаметром 2 м и 6 частей – диаметром 1,2 м. В результате было затрачено \$250 000, что в два раза меньше, чем при традиционном производстве аналогичных изделий.

По аддитивным технологиям из термопластичного материала ULTEM 9085 были изготовлены и установлены на космическом аппарате FORMOSAT-7 (США) 30 опор антенных решеток для метеорологических систем наблюдения (рис. 4.49). Данный материал – замена ранее применяемого астрокварца, в итоге существенно снижается масса конструкции и затраты на ее производство.

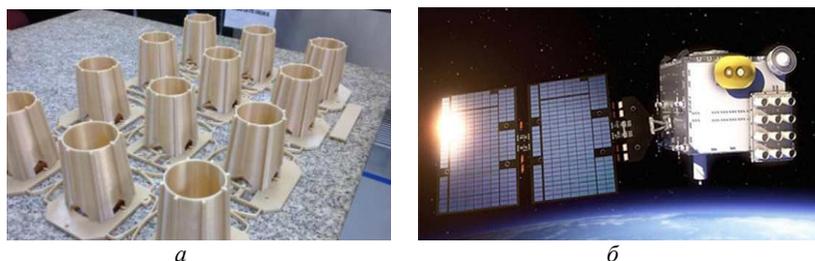


Рис. 4.49. Опоры антенных решеток:  
*а* – общий вид решеток; *б* – размещение блока решеток на космическом аппарате

В ФГУП КМ «Прометей» для ОАО «МЗ Арсенал» по технологии LENS была изготовлена тонкостенная демфирующая сотовая конструкция для опор космических летательных аппаратов (КА) из стали 316 и 17–4 с толщиной стенок 90...120 мкм (рис. 4.50).

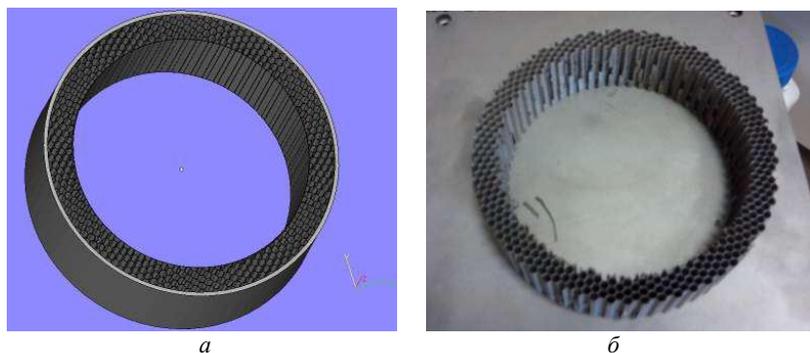


Рис. 4.50. Тонкостенная демпфирующая сотовая конструкция для опор космических летательных аппаратов: *а* – 3D-модель; *б* – изделие, созданное по 3D-технологии

Развитием аддитивных технологий интересуются не только отдельно взятые компании. Как показывает практика, интерес к 3D-печати получил статус государственного в мире, поэтому каждое космическое агентство считает стратегически необходимым использовать его в производстве космической техники. Европейское космическое агентство (ESA) объявило о запуске проекта AMAZE, цель которого – печать на 3D-принтере металлических частей для космических кораблей, двигателей самолетов и ракет. Наиболее амбициозной целью проекта является создание космического спутника, собранного полностью из распечатанных комплектующих.

В 2016 г. в Томском политехническом университете был спроектирован и изготовлен спутник «Томск-ТПУ 120» – первый космический аппарат, корпус которого полностью изготовлен на 3D-принтере.

Строительным материалом при производстве деталей для авиационной и ракетно-космической техники наиболее часто служат ABS-пластики, термопластики марки ULTEM, стальные, титановые, хромоникелевые сплавы и т.д. Но именно в этом промышленном сегменте большие перспективы имеет легкий, высокопрочный и термостойкий термопластичный полимер – полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), позволяющий использовать производственные SLS-технологии. Следует отметить, что ПЭЭК официально разрешен NASA для применения в космических аппаратах. Специально для работы с этим полимером разработана первая в мире установка лазерного спекания высокотемпературностойких полимеров EOSINT P 800 для работы с полимером марки EOS PEEK HP3.

Помимо изготовления деталей и узлов РКТ в заводских условиях, аддитивные технологии могут качественно по-новому решить ряд технических проблем дальних и длительных пилотируемых космических полётов, а именно:

- организовать на борту КА изготовление деталей КА (от элементов интерьера до узлов пневмогидросистем и РД) из запасенного на борту или утилизируемого материала;
- обеспечить космонавтов продуктами питания с высокими органолептическими и заданными биохимическими свойствами, изготавливаемыми из субстратов, вырабатываемых системами жизнеобеспечения замкнутого цикла;
- обеспечить участников дальних космических полётов необходимым биоматериалом при возникновении необходимости трансплантации органов и тканей;
- организовать на небесных телах и в космическом пространстве изготовление объектов РКТ из местного минерального сырья.

В августе-сентябре 2014 г. прорывом для США стал запуск компактного 3D-принтера компании Made In Space на Международную космическую станцию (МКС), при помощи которого планируется создание деталей в условиях невесомости. По мнению специалистов, 3D-принтер способен изготовить прямо на орбите до 30 процентов запчастей. А если учесть, что вывод на орбиту 1 кг полезного груза в среднем обходится в 12...25 тыс. долл., то устройство не только упростит пребывание экипажа на орбите, но и удешевит сами космические полеты (рис. 4.51).

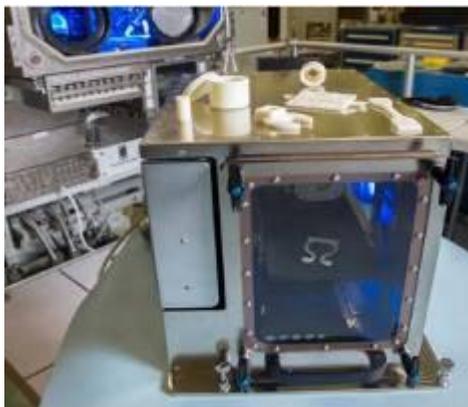


Рис. 4.51. 3D-принтер, размещенный на МКС

Компьютерное моделирование изделий авиационной и ракетно-космической техники, оставаясь виртуальным, не решает всех проблем при создании сложных технических систем и не позволяет обнаружить все ошибки и недочеты при проектировании изделий и их блоков, состоящих из агрегатов различного назначения и связанных между собой «хитрой» геометрической компоновкой (ярким примером таких систем являются ракетные двигатели и связанные с ними системы). Эти проблемы приходится решать при сборке макетов изделий в металле, что может приводить к повторному изготовлению деталей и сборочных единиц, изменивших свою геометрию в процессе увязки компоновки изделия. Поэтому отказ от макетов (конструкторских и тем более образцов макетов) на текущий момент времени преждевременен.

Технология 3D-печати в пластике во многом решает эту проблему, способствуя существенному удешевлению, упрощению и ускорению процесса изготовления конструкторских макетов новых проектируемых изделий.

Примером такого подхода с применением аддитивных технологий к проектированию ракетно-космической техники являются работы в КБхиммаш им. А.М. Исаева по созданию новейшего кислородно-водородного разгонного блока тяжелого класса (РБ КВТК) для тяжелой ракеты «Ангара». С помощью 3D-печати термопластичными материалами был изготовлен конструкторский макет бортового источника питания (БИП). БИП предназначен для питания рабочей жидкостью с заданными параметрами (расход, давление, температура) двух сервоприводов гидравлической системы электрогидравлических сервоприводов (ГС ЭГС), обеспечивающих функционирование двигателя РД0146Д ракеты «Ангара» (рис. 4.52).

Выполняя те же функции, что и обычный металлический конструкторский макет, такие как проверка собираемости, отработка технологии сборки, поиск ошибок и неточностей в конструкторской документации, прокладка электрики и другое, макет из пластика, изготовленный с помощью 3D-технологий, обходится на порядок дешевле. По предварительным оценкам его стоимость в 10...15 раз меньше, чем стоимость конструкторского макета из металла. При этом нет необходимости в привлечении большого количества смежных служб и исполнителей, выполняющих такие работы, как заказ и нарезка металла, проектирование и изготовление штампов, токарные, фрезерные и другие механические операции.



*a*



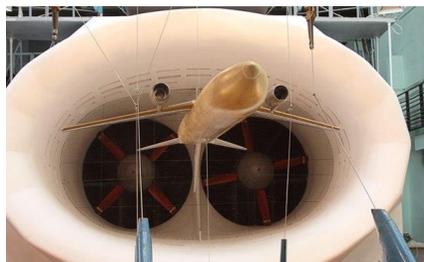
*б*

Рис. 4.52. Конструкторский макет БИП ракеты «Ангара»: *a* – комплектующие макета, изготовленные с помощью 3D-технологий; *б* – макет в сборе

Макеты летательных аппаратов, изготовленные с помощью 3D-технологий, широко применяются для определения аэродинамических характеристик проектируемого изделия и оптимизации его геометрической формы. На рис. 4.53 и 4.54 приведены фотографии макетов широкофюзеляжного среднемагистрального самолета «Фрегат Экоджет» и гиперзвукового ЛА соответственно. Макеты изготовлены с применением различных термопластичных материалов по FDM-технологии.



*a*



*б*

Рис. 4.53. Макет самолета «Фрегат Экоджет»: *a* – макет на сборочном стапеле; *б* – испытание макета в аэродинамической трубе



Рис. 4.54. Макет гиперзвукового ЛА: *а* – комплектующие макета, изготовленные с помощью 3D-технологий; *б* – макет в сборе

### ***Библиографический список***

1. *Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М.* Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
2. *Валетов В.А.* Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие / Университет ИТМО; СПб., 2015. 63 с.
3. *Шишковский И.В.* Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2015. 348 с.
4. *Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.* Технология аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М.: Техносфера, 2016. 656 с.
5. *Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии».* Сколковский институт науки и технологий, 2015. 210 с.
6. *Колесников Л.А., Манжула Г.П., Шелег В.К., Якимович А.М.* Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (часть первая) // Наука и техника, 2013. № 5. С. 3–9.
7. *Колесников Л.А., Манжула Г.П., Шелег В.К., Якимович А.М.* Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (часть вторая) // Наука и техника, 2013. № 6. С. 8–16.
8. *Волхонский А.Е., Дудков К.В.* Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий // Образовательные технологии, 2014. № 1. С. 127–143.
9. *Чумаков Д.М.* Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // Электронный журнал «Труды МАИ», 2014. Вып. № 78. 22 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .....	4
2. БАЗОВЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	13
2.1. Технологии Bed Deposition.....	13
2.1.1. Аддитивные технологии на основе жидкостных строительных материалов.....	15
2.1.2. Аддитивные технологии на основе порошковых материалов .....	29
2.1.3. Аддитивные технологии на основе листовых строительных материалов.....	37
2.2. Технологии Direct Deposition .....	40
2.2.1. Аддитивные технологии на основе жидкостных строительных материалов.....	41
2.2.2. Аддитивные технологии на основе порошковых строительных материалов.....	48
2.2.3. Аддитивные технологии на основе прутковых строительных материалов.....	50
3. МАШИНЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	55
3.1. Оборудование (принтеры) для аддитивных технологий.....	55
3.1.1. Аддитивное оборудование на основе стереолитографических технологий .....	55
3.1.2. Аддитивное оборудование на основе инъекционных технологий ....	68
3.1.3. Оборудование с применением порошковых строительных материалов ....	78
3.1.4. Оборудование с применением листовых и прутковых строительных материалов.....	92
3.2. Расходные материалы для аддитивных процессов.....	97
3.2.1. Фотополимеры.....	97
3.2.2. Полимерные порошковые и прутковые материалы .....	102
3.2.3. Металлические порошковые и прутковые материалы .....	109
4. ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	117
4.1. Характеристика рынка аддитивных технологий .....	117
4.2. Аддитивные технологии в промышленности .....	124
4.2.1. AF-установки в литейных технологиях .....	125
4.2.2. AF-установки для получения пресс-форм .....	133
4.2.3. Типы технологической оснастки, полученные с помощью AF-установок.....	135
4.2.4. Ремонт и восстановление деталей с помощью AF-установок .....	137
4.3. Аддитивные технологии при изготовлении деталей и узлов авиационной и ракетно-космической техники .....	139
Библиографический список.....	160

*Кулик Виктор Иванович, Нилов Алексей Сергеевич*

**Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной  
и ракетно-космической техники**

Редактор *Г.В. Никитина*

Корректор *Л.А. Петрова*

Компьютерная верстка: *Н.А. Андреева*

Подписано в печать 6.06.2018. Формат 60×84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л 9,3. Тираж 100 экз. Заказ № 102

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1