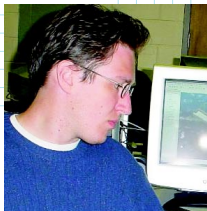


# Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения



Владимир Кузнецов, к.т.н. (МИСиС)

skyline3@narod.ru

Владимир Кузнецов в 1998 году окончил Московский государственный институт стали и сплавов (МИСиС), затем аспирантуру. С 2001 г. по 2003 г. проходил обучение в университете Северной Айовы (США). Кандидат технических наук с 2001 г., магистр (Master of Arts) – с 2003 г. В настоящее время работает в МИСиС в должности заведующего лабораторией “Металлургические технологии”, преподает.

В конце 18-го века французский инженер и математик Гаспар Монж основал новую науку – начертательную геометрию, по сути своей явившей систему отображения трехмерных фигур посредством изображения их плоских проекций. Благодаря принципам начертательной геометрии любой трехмерный объект может быть однозначно описан совокупностью двумерных проекций и сечений и отображен на плоскости, например на листе бумаги. На основе начертательной геометрии строится система инженерной графики – своего рода язык, позволяющий описывать на бумаге не только отдельные детали, но и сложные инженерные системы. Основанный на интернациональных стандартах, язык инженерной графики понятен людям технических специальностей во всем мире, и всё же «чтение» сложного чертежа может оказаться задачей нетривиальной даже для опытного инженера и вовсе непосильной для человека, не имеющего специального образования. Однако в реальном мире технологии и бизнеса постоянно существует потребность в коммуникациях между инженерами и неспециалистами – заказчиками или потенциальными клиентами. Порою объяснить неспециалисту чертеж новой детали – задача более сложная, чем разработка этой детали. Таким образом, существует потребность в альтернативном, более наглядном, способе отображения трехмерной информации. До последнего времени единственным эффективным методом подобной визуализации трехмерных данных оставалось ручное макетирование – создание из легкообрабатываемых материалов (картона, дерева, глины) более или менее точной модели обсуждаемого объекта. Недостатки такого подхода очевидны – изготовление макета требует существенных временных затрат, а точность его выполнения зависит от навыков макетировщика.

Этапным прорывом в технологии визуализации стало появление трехмерных систем компьютерного проектирования. Современная CAD-система, к примеру, позволяет в реальном времени анимировать вращение трехмерной модели, варьируя цветовые оттенки на разных её поверхностях и эмулируя тени. При достаточной вычислительной мощности генерирование фотореалистичного изображения на основе готовой трехмерной модели занимает всего несколько секунд – в отличие от часов или дней, необходимых для изготовления физической модели.

Тем не менее, эффективность такой визуализации всё же несравнимо ниже, чем

при макетировании. Фотореалистичное изображение остается плоской картинкой на экране монитора, тогда как физическую модель можно потрогать руками. То есть при оценке дизайна новой разработки к зрению оценивающего подключается осязание, что многократно увеличивает эффективность самой оценки, особенно если речь идет об оценке эргономики. Кроме того, объемная реплика (модель) вновь разработанной детали незаменима, если стоит задача оценить её сопрягаемость (как геометрическую, так и эстетическую) с уже существующим окружением.

Появившиеся в середине восьмидесятых годов системы быстрого изготовления прототипов явились логическим продолжением трехмерных систем компьютерного дизайна. Они стали адекватными устройствами вывода – своего рода *трехмерными принтерами*. Получив цифровое описание трехмерной CAD-модели на входе, устройство быстрого изготовления прототипов генерирует на выходе твердую объемную модель. Данный процесс на сто процентов автоматизирован; участие оператора обычно сводится к заправке машины расходными материалами и извлечению готовых моделей. При этом никакая настройка оборудования при переходе от одной модели к другой не требуется.

## Принцип послойного воспроизведения и основные его реализации

Англоязычный термин *Rapid Prototyping (RP)* связан с совокупностью оборудования, материалов и программного обеспечения, обеспечивающей непосредственное изготовление твердой копии компьютерной модели любого трехмерного объекта независимо от его геометрической сложности. **Все без исключения RP-технологии основаны на принципе послойного воспроизведения.** Стандартным форматом входной информации для основных RP-систем является *STL (Standard Triangular Language)* – язык, в котором все поверхности трехмерной модели заменяются совокупностями треугольных граней. Аккуратность такой замены для изогнутых поверхностей зависит от числа заменяющих их треугольников. Все современные коммерческие CAD-системы позволяют экспортировать модели в STL-формат с регулируемой точностью.

Программная часть *RP*-системы «разрезает» трехмерную *STL*-модель на слои одинаковой толщины (для большинства систем эта толщина лежит в районе 0.1 мм). Таким образом, трехмерный объект заменяется совокупностью плоских слоев. При этом единственным ограничением точности такого воспроизведения является толщина слоя, – чем она меньше, тем выше разрешение системы. При изготовлении «твердой копии» строительный процесс идет снизу вверх: к детали последовательно добавляется слой за слоем. Первый слой формируется на поверхности специальной платформы, последующие слои – на поверхностях предыдущих. Если геометрия изготавливаемой модели такова, что пятно предыдущего слоя не полностью перекрывает пятно последующего (материал как бы «повисает» в воздухе), то возникает потребность в формировании специальной поддерживающей структуры, или *суппорта*. В различных реализациях принципа послойного воспроизведения поддерживающие элементы выполняются либо из того же материала, что и сама модель (при этом они создаются в виде тонких легко удаляемых сегментов), либо из вспомогательного, менее прочного материала.

## Стереолитография

Стереолитография (*Stereolithography – SLA*) стала первой коммерческой реализацией технологии послойного воспроизведения. В устройствах данного типа строительным материалом является специальная вязкая жидкость, затвердевающая под воздействием ультрафиолетового излучения (фоточувствительная синтетическая смола). Устройство (рис. 1) представляет собой ванну, заполненную «строительным материалом», с плоской платформой, которая перемещается в вертикальном направлении. Над ванной расположен лазер, луч которого перемещается по горизонтальной плоскости.

Изготовление модели происходит в следующей последовательности. Платформа опускается в ванну на глуби-

ну, равную толщине одного слоя будущей детали. При этом слой жидкости покрывает поверхность платформы. Управляемый компьютером лазерный луч обводит контур первого слоя, а затем методично сканирует всё пространство внутри этого контура. Под воздействием лазерного излучения происходит локальное затвердевание строительной жидкости, – таким образом, появляется первый слой будущего объекта. После завершения первого слоя платформа опускается на глубину следующего слоя. При этом уже отвержденное пятно первого слоя оказывается под слоем строительной жидкости, равномерность толщины которого обеспечивается скользящим проходом специального лезвия (выравнивающей линейки). Второй и последующие слои отверждаются так же, как и первый, – с тем лишь отличием, что теперь каждый новый слой осаждается не непосредственно на строительной платформе, а на поверхности предыдущего. Так, слой за слоем, процесс продолжается до полного завершения построения объекта, после чего платформа поднимается, а избытки строительной жидкости свободно стекают в ванну. Сгенерированный таким образом объект промывают и сушат, после чего он готов к демонстрациям или испытаниям.

В настоящее время мировым лидером в производстве стереолитографических систем является американская корпорация **3D Systems** (Валенсия, штат Калифорния). Наиболее мощная *SLA*-система в их модельном ряду – **SLA 7000**. Данное устройство использует твердотельный  $Nd:YVO_4$  лазер мощностью 800 мВт с длиной волны 354.7 нм. Толщина отверждаемого слоя выбирается оператором в зависимости от требуемой точности и скорости изготовления модели и может принимать следующие значения: 0.076; 0.101; 0.127 и 0.25 мм. Скорость движения лазерного пятна при сканировании с максимальным разрешением – 2.54 м/с; при «грубом» сканировании – 9.52 м/с. Максимальные размеры генерируемых моделей – 508×508×584 мм.

Представляют интерес и российские предложения на рынке стереолитографов – установки **ЛС-120** и **ЛС-250** (Институт проблем лазерных и информационных технологий Российской Академии наук). Обе машины используют *He-Cd* лазеры с длиной волны 325 нм. Толщина слоя при выращивании объектов лежит в интервале 0.1÷0.3 мм, скорость сканирования – 2 м/с. Максимальные размеры выращиваемых объектов составляют 120×120×120 мм и 250×250×250 мм для установок ЛС-120 и ЛС-250, соответственно.

## Избирательное лазерное спекание

Процесс избирательного лазерного спекания (*Selective Laser Sintering – SLS*) во многом аналогичен стереолитографии: здесь также применяются лазерный луч и пошагово опускаемая строительная платформа. Однако в качестве строительного материала в *SLS*-технологии используются порошковые материалы (рис. 2). Порошок подается из питающего

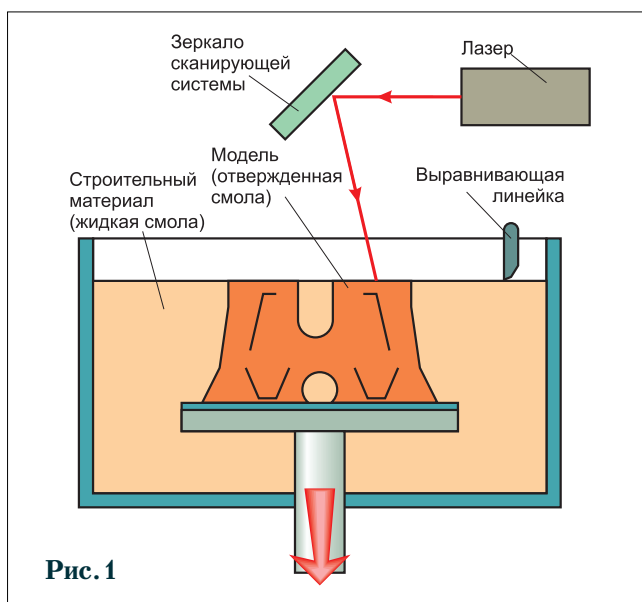


Рис. 1

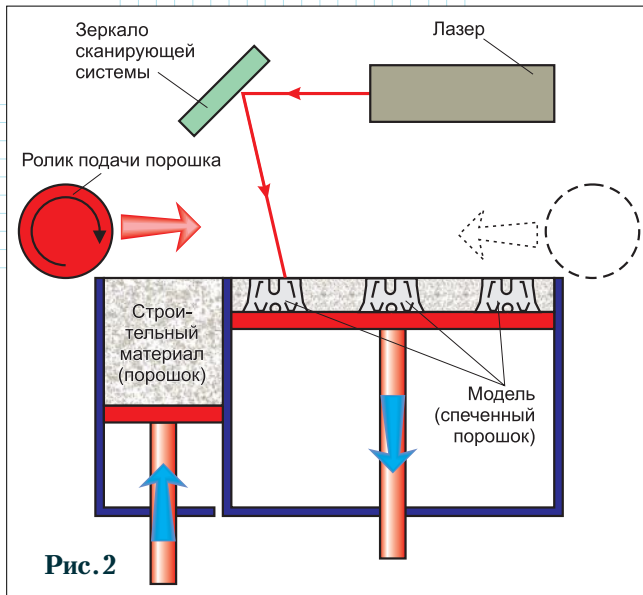


Рис. 2

контейнера и с помощью специального ролика тонким слоем распределяется по поверхности платформы. Лазерный луч, скользя по поверхности порошка, обводит контур первого слоя будущей модели, а затем сканирует всё пространство внутри него. В результате теплового воздействия лазерного излучения частицы порошка оплавляются или полностью расплавляются (в зависимости от конкретной модификации процесса и применяемого материала), а после ухода лазерного луча – затвердевают, образуя спеченную или сплавленную структуру.

Таким образом, если в стереолитографии в процессе генерации модели строительный материал претерпевает одно фазовое изменение (из жидкого состояния в твердое), то в SLS таких превращений два: из твердого – в жидкое, и снова в твердое. Процесс генерации модели продолжается слой за слоем. При этом модель погружена в ванну из неспеченного порошка, который выполняет роль естественной опоры. При этом отпадает потребность в генерации специальных поддерживающих структур, необходимых в стереолитографии. Одним из главных преимуществ данной технологии является широкий выбор строительного материала – от пластиков до металлических сплавов.

Основными производителями устройств, реализующих принцип SLS, являются уже упомянутая американская компания **3D System** и европейская **EOS (Electro Optical System, Крайлинг, Германия)**.

Единственная доступная в настоящее время на рынке SLS-модель от **3D System** выпускается в двух модификациях: *Vanguard* и *Vanguard HS*. Системы используют газовый ( $CO_2$ ) лазер мощностью 25 или 100 Вт. Максимальная скорость сканирования составляет 10 м/с, максимальный размер изготавливаемых моделей –  $370 \times 320 \times 445$  мм. В качестве строительного материала применяются как пластиковые, так и металлические порошки с полимерным покрытием. В случае использования последних, металлические частицы

склеиваются за счет расплавившегося покрытия. Синтезированная таким образом деталь подвергается дальнейшей обработке в специальных печах, в результате чего остатки полимерного покрытия выгорают, а металлические частицы спекаются. В завершение детали пропитывают металлическим расплавом, что приводит к получению однородной, плотной структуры.

Системы, предлагаемые германской компанией **EOS**, более многообразны. На рынке представлены три семейства: **EOSINT P**, **EOSINT M** и **EOSINT S**. Эти системы предназначены для спекания пластика, металла и песка, соответственно. Старшая модель в «пластиковом» семействе **EOSINT P 700** одновременно использует два газовых ( $CO_2$ ) лазера мощностью 50 Вт, что обеспечивает высокую скорость синтеза моделей, при скорости сканирования 5 м/с. Толщина спекаемого слоя для данной системы зависит от применяемого материала и обычно составляет порядка 0.15 мм. Максимальные размеры модели –  $700 \times 380 \times 580$  мм.

Машина для работы с металлическими порошками обозначена индексом **EOSINT M 250X**. Система использует газовый ( $CO_2$ ) лазер мощностью 200 Вт. Скорость сканирования достигает 3 м/с, что обеспечивает скорость спекания от 2 до 15 мм<sup>3</sup>/с (в зависимости от материала). Максимальный размер генерируемых деталей –  $250 \times 250 \times 200$  мм.

Следует отметить, что технология спекания металлических порошков от **EOS** существенно различается с той, что предлагает **3D Systems**. В машине **EOSINT M** применен значительно более мощный лазер, что позволяет непосредственно оплавливать металлические частицы и спекать их без использования полимерных покрытий. Генерируемые таким образом металлические модели значительно более прочные и плотные, и в дальнейшей обработке нужды нет.

Наконец, система **EOSINT S 750** использует в качестве строительного материала песок, частицы которого покрыты специальным составом. Назначение этого оборудования – производство форм и стержней для литья металлов. Система имеет два одновременно работающих газовых ( $CO_2$ ) лазера мощностью по 100 Вт каждый. Скорость изготовления объектов достигает 2.5 см<sup>3</sup>/час. Толщина слоя – 0.2 мм, максимальный размер песчаной формы или стержня –  $720 \times 380 \times 380$  мм.

### Создание объектов из пленок

Машины, основанные на этом технологическом принципе (*Laminated Object Manufacturing – LOM*), вырезают по контуру каждый слой модели из листового материала, а затем склеивают их вместе. В оригинале в качестве строительного материала применялась смотанная в рулон бумажная лента с нанесенным на одну из поверхностей термоактивируемым клеем, а в качестве режущего инструмента – остросфокусированный лазерный луч. Впрочем, известны различные модификации данного процесса. Так, в ряде случаев лазер заменен ножом или компактной фрезой, а в качестве строи-

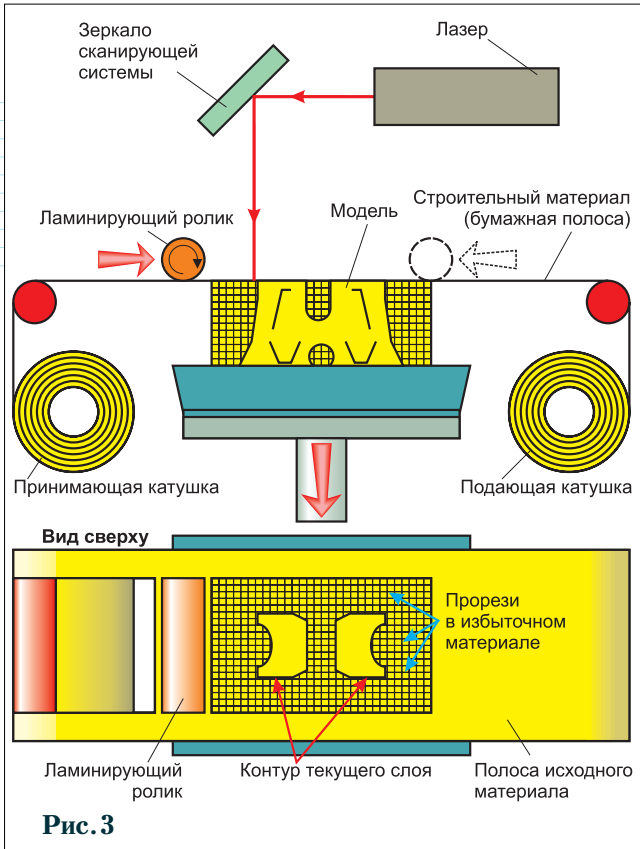


Рис. 3

тельного материала применяются пластики или даже металлические фольги.

Рассмотрим подробнее классическую схему (рис. 3). Бумажная лента разматывается с подающего ролика и собирается на принимающем. При этом лента проходит над перемещаемой в вертикальном направлении строительной платформой. Когда платформа оказывается полностью покрытой фрагментом бумажной ленты, свободным от разрезов (которые остаются от изготовления предыдущих деталей), вращение роликов прекращается. По поверхности бумаги прокатывается нагретый ламинирующий валик. При этом активируется нанесенный на бумагу клей, и прямоугольный фрагмент бумажной полосы прочно фиксируется на поверхности подложки. Следующим шагом лазерный луч, управляемый компьютером, вырезает из приклеенного фрагмента контур первого слоя, а затем обводит вокруг этого контура прямоугольник, отделяющий приклеенный фрагмент от основной полосы. В завершение лазерный луч покрывает взаимоперпендикулярными прорезами всё пространство между контуром первого слоя и внешним прямоугольником – они облегчают последующее отделение собственно модели от избыточного материала. После этого строительная платформа опускается на толщину одного слоя и включается механизм подачи ленты. Процесс повторяется шаг за шагом, и каждый последующий слой приклеивается к предыдущему.

В итоге из машины извлекается прямоугольный параллелепипед, представляющий собой модель изделия,

окруженную избыточным материалом. Благодаря изобилию прорезей весь избыток легко отделяется с помощью нехитрого инструмента. Такая склеенная из бумажных листов модель по внешнему виду и на ощупь напоминает дерево. При этом «бумажная» модель прекрасно поддается механической обработке – например, шлифовке или сверлению.

Основной производитель LOM-систем – американская компания **Helisys** – уже несколько лет, как прекратил свое существование. Тем не менее, немалое количество выпущенных ею устройств до сих пор используются по всему миру, – в том числе и самые крупные **LOM 2030**. Эти машины используют газовый ( $CO_2$ ) лазер мощностью 50 Вт. Максимальный размер изготавливаемых моделей –  $813 \times 559 \times 508$  мм, толщина слоя – 0.1 мм.

### Моделирование распределением расплава

В FDM-процессе (*Fused Deposition Modeling – FDM*) исходным материалом служит пластиковый шнур, который разматывается с подающей катушки и поступает в перемещаемое в горизонтальной плоскости устройство (рис. 4). Устройство состоит из нагревателя, расплавляющего пластик, и форсунки, через которую расплав выдавливается в рабочее пространство машины. Так же, как и в прочих реализациях метода послойного воспроизведения, в данном процессе присутствует перемещаемая в вертикальном направлении строительная платформа. Процесс изготовления новой модели начинается в тот момент, когда платформа находится непосредственно под форсункой.

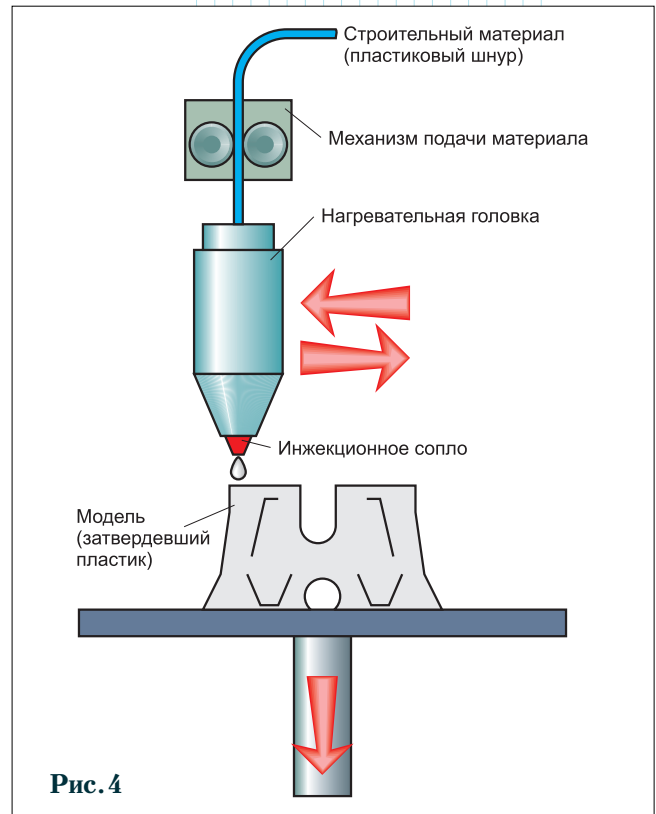


Рис. 4

Перемещаемая под управлением компьютера форсунка описывает запрограммированный контур, при этом выдавленный пластик формирует границу первого слоя. Далее методичными штрихами заполняется всё пространство внутри контура. После завершения первого слоя платформа опускается на соответствующую глубину, и процесс продолжается.

Выдавленный из форсунки расплав (он попадает на платформу или на слой уже затвердевшей пластмассы) быстро затвердевает, схватываясь при этом с прилегающими порциями ранее размещенного материала. Таким образом, формируется достаточно прочная структура.

Для формирования суппорта (если необходимость такового обусловлена геометрией модели) используется аналогичный механизм, что и для размещения основного материала. В качестве материала для формирования поддерживающих структур используется нить менее прочного пластика, – она подается с отдельной катушки и выдавливается через отдельную форсунку.

Основным производителем *FDM*-систем является американская компания **Stratasys** (Эден Прейри, Миннесота). Наиболее мощная из поставляемых этой компанией систем – **FDM Maxum**. Максимальный размер изготавливаемых моделей – 600×500×600 мм. Толщина слоя выбирается оператором. За счет использования пластиковых нитей разной толщины она варьируется в пределах 0.193÷0.965 мм. Для генерации поддерживающих структур применяется водорастворимый материал, что облегчает финишную обработку моделей.

Дальнейшим развитием принципа *FDM* стало появление технологии многосопловой инжекции (*Multi-Jet Modeling – MJM*). В машинах этого типа строительный материал, представляющий собою технический воск, расплавляется и выдавливается на поверхность строительной платформы через многосопловую головку (аналогичную головкам, используемым в технологии струйной печати). В качестве примера реализации такой технологии можно назвать установку **TermoJet**, производимую не раз уже упомянутой компанией **3D Systems**.

## Трехмерная печать

Схема устройств данного типа (*3D Printing – 3DP*) во многом аналогична схеме устройств, основанных на принципе селективного лазерного спекания. Точно так же исходным материалом здесь служит порошок, который таким же образом подается из питающего контейнера и так же распределяется по поверхности строительной платформы. Однако на этом сходство заканчивается.

В *3DP*-процессе для соединения частиц порошка вместо лазерного луча используется печатающая головка, аналогичная тем, что применяются в офисных струйных принтерах (рис.5). Через сопла печатающей головки на поверхность порошкового слоя подается связующий раствор. Перемещаемая в горизонтальной плоскости печатающая головка распределяет раствор

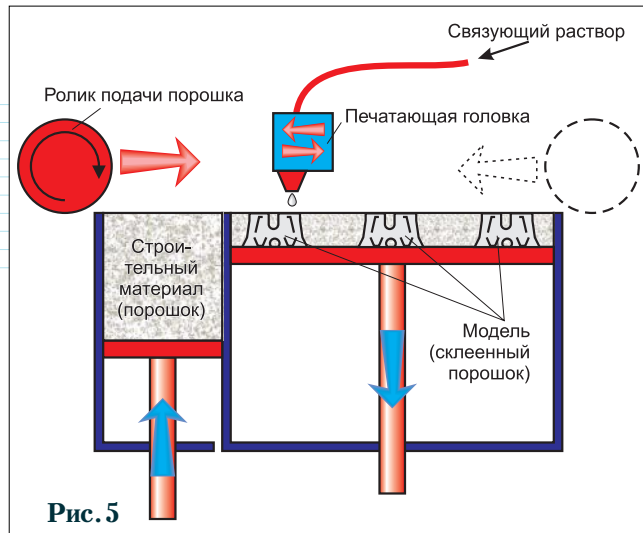


Рис. 5

по поверхности порошкового слоя – точно так же, как струйные принтеры и плоттеры распределяют чернила по поверхности бумаги. Связующий раствор пропитывает порошок, прочно склеивая его частицы. После того как завершается «печать» первого слоя, строительная платформа опускается. Поверх первого слоя распределяется новая порция исходного материала. Этот процесс продолжается до полного завершения построения модели.

Лидирующим производителем устройств данного типа является американская компания **Z Corporation** (Бурлингтон, Массачусетс). Наиболее крупная из машин – **Z810** – позволяет изготавливать модели размерами до 500×600×400 мм. Толщина слоя варьируется в диапазоне 0.076÷0.254 мм.

Другая машина – **Z406** – может «печатать» полноцветные модели размерами до 203×254×203 мм. Возможность полноцветной печати реализуется за счет добавления краски в связующий раствор, при этом нужный оттенок формируется за счет смешивания чернил трех основных цветов. Следует отметить, что ни одна другая система из доступных в настоящее время на рынке не имеет такой возможности. Скорость изготовления моделей на **Z406** составляет два слоя в минуту (при использовании цвета) или шесть слоев в минуту – без такового. При этом толщина слоя выбирается в диапазоне 0.076÷0.254 мм.

## Непосредственное размещение металла

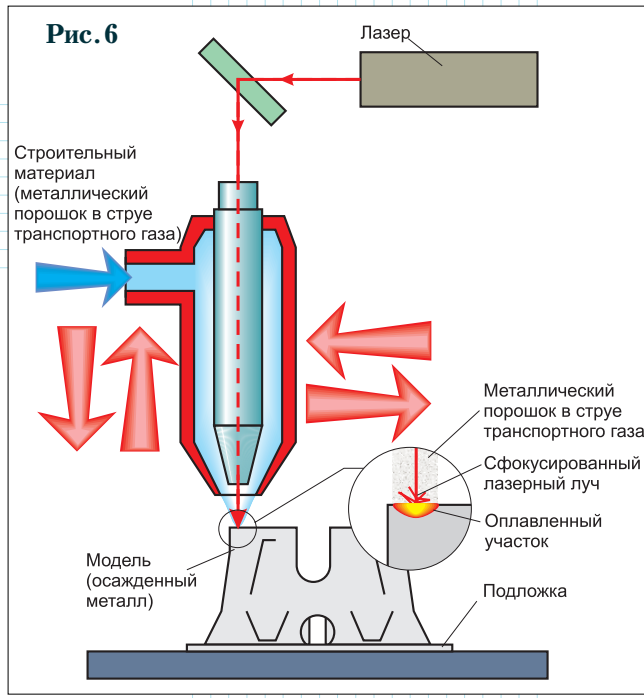
Технология непосредственного размещения металла (*Direct Metal Deposition – DMD*, или, по-другому, *Laser Engineering Net Shaping – LENS*) на сегодняшний день является наиболее совершенной (по достижимому уровню прочностных характеристик создаваемых объектов) реализацией метода послойного воспроизведения.

Надо сказать, что системы, построенные на этом принципе, вряд ли могут быть отнесены к устройствам быстрого изготовления прототипов. Дело тут в том, что качество создаваемых объектов, с одной стороны, и

стоимость – с другой, не позволяют рассматривать их в качестве приемлемого варианта визуализации. Данные системы окупают себя только при производстве функциональных деталей или технологического инструмента.

В качестве строительного материала в *DMD*-процессе применяются металлические порошки. Выращивание объекта начинается со специальной подложки, которая впоследствии либо становится частью модели, либо удаляется механическим способом (рис. 6). Мощный лазерный луч оплавляет поверхность подложки, образуя таким образом микроскопическую ванну жидкого расплава. Струей инертного транспортирующего газа в расплав вдвигается порция металлического порошка. После смещения лазерного луча жидкий металл моментально затвердевает, а за счет вдутого в расплав порошка на поверхности подложки появляется локальное утолщение. Таким образом, в результате методичного сканирования поверхности подложки лазерным лучом с одновременной инъекцией строительного порошка формируется первый и все последующие слои генерируемого объекта.

Данный метод позволяет применять в качестве строительного материала практически любые металлы и сплавы, которые могут быть расплавлены лазерным лучом без испарения. За счет сверхбыстрой кристаллизации создаваемые детали имеют ультрамелкозернистую или даже аморфную структуру. Таким образом, по своим механическим свойствам эти детали не только не уступают, но в ряде случаев значительно превосходят изделия, получаемые из аналогичных сплавов традиционными производственными методами (литье, штамповка). К вышесказанному можно добавить возможность генерировать детали из нетехнологичных с позиции традиционного производства сплавов (т.е. труд-



нодеформируемых или имеющих низкую жидкотекучесть), в том числе – *интерметаллидных*.

Приведем основные характеристики коммерчески доступной системы **LENS 850**, поставляемой американской корпорацией **OPTOMECH** (Альбукерке, Нью-Мехико). Установка имеет мощный (1000 Вт) твердотельный *Nd:YAG* лазер с длиной волны 1064 нм. Средняя скорость выращивания объектов составляет порядка 8 см<sup>3</sup>/час. Максимальный размер генерируемых деталей – 457×457×1067 мм.

Ниже мы поговорим о возможном применении быстрого прототипирования.

(Продолжение следует.) 

**НОВОСТИ ♦ СОБЫТИЯ ♦ КОММЕНТАРИИ**