

Оператор управляет установкой быстрого прототипирования автомобильных деталей

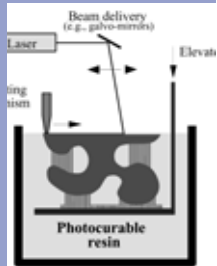
Сегодня уже никого не удивляют принтеры, воссоздающие на бумаге сколь угодно сложные изображения. Некоторые из них наносят рисунок в несколько слоев. Если развить эту идею и научить печатную головку многократно накладывать друг на друга слои вещества, то изображение станет рельефным. Именно этот принцип лежит в основе 3D-фабрикаторов, иначе — фабберов, устройств, способных по командам компьютера создавать детали почти произвольной формы. А некоторые изделия со сложной внутренней геометрией вообще затруднительно изготовить другим способом

# Фабрика в каждый дом

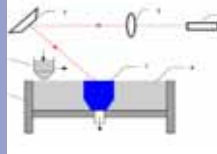
ВАДИМ СЛЮСАР,  
доктор технических наук



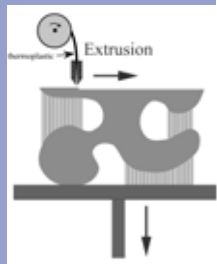
Зубчатая передача в форме листа Мёбиуса, изготовленная при помощи 3D-фабрикатора



Стереолитография: заготовка пошагово опускается в светотвердеющую жидкость. Лазер заставляет жидкость твердеть в нужных местах



Технология SLM: картридж насыпает тонкий слой порошка, лазер сплавляет его в нужных местах



Технология FDM: экструдер расплавляет нить и осаждает вещество в нужных частях. Другой экструдер формирует поддерживающие элементы из воска

**В** 1984 году американский инженер Чак Халл (Chuck Hull) запатентовал принцип стереолитографии, который сегодня стал самой известной технологией трехмерной печати. Оснований на этой фабрикатор состоит из камеры синтеза, лазерного блока и управляющего компьютера, который по трехмерной цифровой модели объекта строит набор его последних сечений и управляет механическими узлами устройства. Синтез начинается с того, что камера заполняется жидким светотвердеющим полимером (вроде тех, что используются для зубных пломб). Под самой поверхностью жидкости, на глубине в доли миллиметра — это толщина первого слоя синтезируемого объекта — располагается стальная платформа-элеватор. Затем лазерный луч сканирует поверхность полимера в соответствии с текущим сечением модели, и жидкость под действием света — переходит в твердую фазу. По завершении сканирования первого слоя элеватор немного опускается и лазерное сканирование повторяется. При наличии в геометрии объекта нависающих частей для их создания в процессе синтеза создаются тонкие опорные элементы, которые потом удаляются. Сформированный объект обрабатывается мощным ультрафиолетовым излучением для достижения максимальной прочности.

Данная технология реализована в устройствах американской компании 3D Systems. Аналогично работают фабрики японских фирм CMET, D-MEC, Mitsui, Teijin Seiki и германских EOS, Fockele & Schwabe. Обычно так изготавливают модели различного оборудования на стадии разработки изделия. Но сфера применения фабрикеров гораздо шире, а эксперты насчитывают более трех десятков различных технологий, лежащих в основе их работы. Большинство из них похижи и порождены в основном для обхода чужих запатентованных решений, но каждая характеризуется своим набором материалов, точностью и скоростью изготовления. И в этой области трудно сказать, какие из них победят в конкурентной борьбе.

#### ТВОРЕНИЕ ИЗ ПОРОШКА

Технология селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering, SLS) отличается от стереолитографии тем, что объект создается не в жидкой, а в порошковой среде. Подвижный картридж насыпает на горизонтальную платформу тонкий слой мелкодисперсного порошка, а мощный лазер сканирует соответствующее сечение объекта, вызывая размягчение и спекание частиц. Затем из картриджа укладывает

ется новый слой порошка. По окончании синтеза незадействованный порошок можно использовать повторно. Достоинство этого метода состоит в том, что для формирования нависающих элементов не нужны поддерживающие элементы, поскольку изделие покоится в порошковой среде.

Метод запатентован в октябре 1986 года студент-магистрант Техасского университета Карл Деккард (Carl Deckard). В своей разработке он отталкивался от предложенного в 1971 году французом Пьером Сиро (Pierre Sirod) порошкового процесса, в котором частицы постоянно подаются в зону работы лазера. Первая коммерчески успешная машина Sinterstation 2000, появившаяся в 1992 году, создавала из воска или поликарбоната объекты диаметром до 305 миллиметров и длиной до 410 миллиметров. Современные установки подобного типа используют также поливинилхлорид, нейлон, керамику и даже металлы — главное, чтобы вязкость вещества уменьшалась при нагреве. В некоторых моделях вместо лазера применяется тонкий пучок электронов или плазмы.

Серьезный недостаток лазерного спекания — необходимость вести процесс в герметичной емкости, заполненной инертным газом, чтобы избежать возгорания порошка и утечки токсичных газов, выделяющихся при твердотельном синтезе. В новом комплексе Sinterstation Pro компании 3D Systems, способном создавать детали размером более полуметра (максимум 550x550x750 мм), все процедуры осуществляются автоматическими, а необходимый для создания инертной среды азот подается из окружающей атмосферы воздуха. Стоит такая установка свыше миллиона долларов.

Немецкая компания EOS достигла больших успехов в синтезе металлических изделий. Одно из последних достижений — фабрика EOSINT M 270, работающая с порошковыми бронзы и инструментальной стали. Со скоростью от 7 до 70 см<sup>3</sup> в час он формирует из них детали размером до 250x250x215 миллиметров. В планах заявлена работа с титановыми и хром-кобальтовыми сплавами. Погрешность производства не превышает 50 микрон, а шероховатость поверхности менее 9 микрон. Причем полученные детали имеют прочность на разрыв до 1,1 гигапаскаля (всего вдвое меньше, чем у стальные, и на порядок больше, чем у продукции самых первых фабрикаторов).

И все же спекание порошка не достичь прочности монолитного материала. На помощь приходит родственная по своей природе технология спекания (Selective Laser Melting, SLM), продвигаемая на рынок англий-



Модели будущих углеводородно-волоконных офисных зданий, изготовленные методом селективного лазерного спекания

### Эксперты насчитывают более трех десятков различных запатентованных технологий, применяемых в трехмерных фабрикаторах

ской компании MCP Tooling Technologies. В нем металлические частицы полностью расплавляются под воздействием лазерного излучения, что обеспечивает высокую плотность структуры изделий. Расплачиваться за это приходится снижением скорости и точности синтеза. Фабрикатор MCP Realizer формирует за час всего около 10 см<sup>3</sup> изделия с шероховатостью поверхности 10–30 микрон. Зато ассортимент материалов включает цинк, бронзу, сталь, титановые и хром-кобальтовые сплавы, золото, а в ближайших планах работа с алюминием и инструментальными сталями.

Рекордных размеров металлические изделия создают установки британской корпорации Aeromet, в которых используется технология аддитивного лазерного изготовления (Laser Additive Manufacturing, LAM). CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 18 киловатт создает на поверхности заготовки локальный участок расплава, куда из отдельного контейнера подается расплавленный металлический порошок. В отличие от ранее рассмотренных систем деталю за этой

технологии формируются не в толще порошка, а путем постепенного наращивания на горизонтально расположенной платформе. Это позволяет расплачивать объекты размером 3,0x3,0x0,9 метра. Ведутся разработки системы, рассчитанной на габариты 6,0x2,4x2,7 метра. На уникальных установках от AeroMet создаются тонкоблочные (до 0,5 миллиметра) крупногабаритные детали из титановых сплавов, рения и тантала для авиационной и космической промышленности, например сопла и части двигательных гондол.

#### ТРЕХМЕРНЫЕ ПРИНТЕРЫ

Но не стоит думать, что фабрики — это ступолю промышленное оборудование. Эти устройства отчетливо делятся на два класса. К первому, называемому иногда Rapid Manufacturing (системы быстрого производства) относят дорогие промышленные машины, о которых мы рассказали выше. Другой класс — Rapid Prototyping (системы быстрого прототипирования) — это те самые, иногда настольные прибо-



#### ВОЛШЕБНАЯ НИТЬ

Сплавляющее экструдерное осаждение (Fused Deposition Modelling, FDM, дословно: моделирование с последующим расплавлением), одна из самых популярных фабрик-технологий, было изобретено в 1989 году Скоттом Крумпом (Scott Crump), соучредителем американской компании StratifySys. Пластмассовая, высококачественная или эластомерная нить расходуемого материала сечением 0,05 миллиметра и более подается в локально разогреваемую область в экструдере (cone), разжижается, осаждается на поверхность и мгновенно затвердевает. Управляемое компьютером движение экструдера приводит к построению формируемого трехмерного объекта. Для создания нависающих элементов служит второй экструдер, подающий воск для элементов поддержки, которые потом удаляются.

Наряду с промышленными устройствами StratifySys выпускает по FDM-технологии 3D-принтеры, способные создавать изделия любого цвета за счет использования нескольких цветных материалов (белого, синего, желтого, черного, красного и зеленого). В 2006 году из трех тысяч 3D-принтеров, проданных в мире, свыше половины были поставлены компанией StratifySys.



Таковыми станут в будущем роботы-строители Contour Crafting

## НАРИСУЕМ ДОМ БЕТОНОМ

Система, изобретенная Берхом Хошневисом (Behrokh Khoshnevis) и развиваемая его командой Contour Crafting, является типичным фаббером, только в качестве расходного материала в нем используется бетон, а ее назначение — строительство домов. По принципу действия он больше напоминает не принтер, а графопроектировщик — «лишущая» бетонном головка раз за разом проходит по контуру стен, наращивая их высоту. Лабораторные прототипы уже работают и сооружают постройки размером до полутора метров со стенами любой формы, хоть кривыми, хоть наклонными. А когда будет создан полномасштабный робот на базе козлового крана, он по праву сможет считаться самым большим фабрикой в мире.

Занимается подобными экспериментами и в России. Молодежный научно-технический центр, например, стал выпускать конструкторский набор «Кубикин» на базе координатного сверлопровода, который может служить экспериментальным стендом для создания самодельных 3D-принтеров на базе разных материалов.

Простейший вариант — использовать разломные в кофемолке пластиковые отходы, которые сжигаются в вакуумном точечном нагреве, например, с помощью паяльного фена. Эпоксидно-песчаный материал используется послышнюю насышку мелкого песка, на который дробно помещается порошок эпоксидной смолы. Аналогично работает суперклеевой, термостойкий, жидкостеклянный и другие варианты фаббера. Позволяет конструктор создать и небольшой бетонный 3D-принтер, который смешивает мелко просеянный песок с цементом в пропорции примерно 3:1, а на слой этой смеси по команде с компьютера наносит капли воды с добавлением оксидного стекла. Создатель конструктора отмечает необходимость правильного сочетания материалов. Например, соль замедлительно взаимодействует с суперклеем, а вот цемент с оксидной — плохо.



Прототип резиновой клавиатуры для телефона



С помощью фабберов можно создавать детали сложной формы — такие проблематично произвести на основе других технологий

ры, используемые в проектных отделах фирм для отработки дизайна и проведения моделирования в ходе конструкторских работ. Может, такой цветной трехмерный принтер служить и другим задачам: создавать трехмерные модели молекул или медицинских имплантатов, строить наглядные представления результатов анализа механических и тепловых напряжений, и др. Специалисты уже считают подобные устройства стандартными инструментами в процессе разработки и совершенствования серийных промышленных изделий. Они позволяют в несколько раз сократить время и расходы на проектирование типичных бытовых приборов.

Наиболее активна на рынке устройств быстрого прототипирования американская Z Corporation. Ее 3D-принтеры вместо металла и лазеров оперируют нетоксичными порошковыми материалами на основе крахмала или гипса и водным связующим веществом. Узел печати развивает слой порошка толщиной от 0,076 до 0,254 миллиметра в зависимости от требуемой точности изготовления, а четыре 300-струйные печатающие головки (всего 1 200 форсунок) в соответствии с формой слоя наносят связующее вещество, склеивая частицы порошка друг с другом. Затем распечатывается новый слой порошка, и процесс повторяется, пока деталь не будет

напечатана полностью, после чего ее для повышения прочности и улучшения внешнего вида пропитывают воском, эпоксидной смолой, полиуретаном или различными клеями составами. Готовые изделия можно шлифовать, красить, сверлить. Z Corporation разработала даже специальный материал, позволяющий делать модели эластичными, как резина. Это сразу же заинтересовало предприятия, выпускающие обувь, гибкие трубы и другую эластомерную продукцию.

Последнее достижение Z Corporation — цветной трехмерный принтер Z450 размером с большой холодильник и весом 193 килограмма, который строит объекты со скоростью 2—4 слоя в минуту, так что на изделие максимального размера 203x254x204 миллиметра уходит один рабочий день. Разрешение печати при этом составляет 300x450 точек на дюйм.

В целом возможности технологии Z Corporation выходят за рамки центрального моделирования. Например, детали, протиснутые специальной смолой ZR10 (дианоакрилат), могут служить мастер-моделями для литья форм. А на гипсовые и крахмальные детали можно наносить токопроводящее гальваническое покрытие и использовать для отработки конструкции внутрикорпусных антенн сотовых телефонов.



Рукоятка для дисковой пилы, изготовленная фаббером, может сразу использоваться в готовом изделии



Компьютерная 3D-модель из пластика по ней фигура сложного персонажа

## Будущие фабберов — надомное производство любых бытовых предметов из универсального сырья по моделям, полученным из Интернета

### ЛОГИСТИКА БУДУЩЕГО

Вообще разработка и потребительских товаров, и электроники уже несколько лет остается основной сферой применения фабберных систем. Об этом говорится в отчете исследовательской фирмы Wohlers Associates, которая в 2007 году обобщила данные о нескольких тысячах компаний, использующих фабрикатры. Далее в порядке массовости применения следуют автомобильная и аэрокосмическая промышленности, медицина, производство вооружений и военной техники, индустриальное машиностроение.

Уже сегодня практически все сложные технические системы, создаваемые за рубежом, содержат комплектующие, выполненные по фабричной технологии. Например, в составе американского истребителя F-18 насчитывается более 80 деталей, изготавливаемых фабрикатрами, а в процессе создания Международной космической станции их использовано более двухсот. Технологии фабберов постоянно совершенствуются, в ней следует ожидать значительных прорывов, которые обеспечат появление изделий с принципиально новыми свойствами, а со временем их можно будет использовать в производстве изделий в значительно-офисном секторе. Это в первую очередь системы

для мелкосерийного или штучного производства потребительских товаров в специализированных сервисных бюро. Речь может идти об изготовлении игрушек, наглядных пособий, бытовой, канцелярской и медицинской утвари, электронных устройств, запчастей к автомобилям и бытовой технике, бижутерии, сувенирам, включая клонирование уникальных музейных экспонатов и антиквариата и т. п. Покупателям будущего не придется тратить время на блуждание по магазинам в поисках нужной вещи, достаточно будет через Интернет обратиться к услугам ближайшего сервисного бюро. С массовым выходом на такую уровень развития фабричные технологии получат невиданный расцвет — во многих секторах промышленности будут забыты кризисы перенормирования, необходимость складирования готовой продукции, сильно упрощена логистика.

В пользу реалистичности описанного сценария говорит серьезная заинтересованность оборонных ведомств ряда стран в развитии подобных фабричных систем, которые могут существенно упростить тыловое обеспечение войск. Особенно активно финансируются эти исследования Военно-морским флотом США, чье руководство рассматривает фабферы как важный фактор военной логистики будущего. Склад на авансце занимает полу-

мещение размером этак с половину футбольного поля. Добрая половина его содержимого — это разного рода запчасти, которые могут понадобиться для ремонта в походе. Было бы куда эффективнее заменить их несколькими фабриками и контейнерами с разнообразными порошковыми сырьем.

И уже вовсе незаменимым средством должны стать фабберы в космических полетах, особенно при создании лунных баз и освоении Марса. Ведь они позволят сэкономить не только место на корабле, но и самый дефицитный ресурс — массу полезной нагрузки (ведь материал для производства можно и на месте найти).

### РОБОТЫ ИЗ ПРИНТЕРА

По прогнозам экспертов NASA и Агентства перспективных оборонных исследований DARPA, уже через несколько лет некоторые виды роботов будут массово изготавливаться на 3D-принтерах. Открытие электропроводных полимеров позволило заложить основу нового направления в науке и технике — флексионик, занимающейся проблемами производства гибких микроэлектронных печатных плат, а также микроэлектромеханических систем (МЭМС), напечатанных на трехмерных принтерах. Основным результатом развития флексионик можно считать то, что практически все используемые в робототехнике



Компьютерные модели в течение нескольких часов превращаются в готовые пластиковые детали

Фабрики помогают математикам вочично представить форму сложных геометрических объектов



ке компоненты, кроме процессоров, ныне уже доступны для 3D-печати. Это OLED-дисплеи, идентификационные RFID-чипы, искусственные мускулы, электронные компоненты, сухие печатные аккумуляторные батареи. На подходах фабрикации солнечных батарей, призванных обеспечить автономность и энергонезависимость «печатных роботов».

Наиболее радикальный прогноз развития фабберов — это их превращение в персональные ведомые «фабрики», использующие универсальные материалы для домашнего изготовления различных бытовых предметов.

Их появление вообще может почти полностью «похоронить» массовое производство, со всеми его проблемами и недостатками. Ключевым фактором должно стать радикальное снижение стоимости как сырьевых материалов, так и расходных материалов, расширение их спектра, устранение токсичности побочных продук-

тов и, наконец, создание насыщенного и дешевого рынка виртуальных моделей. Многие необходимые для этого технологии уже находятся на стадии ограниченного коммерческого использования, другие только разрабатываются. Однако есть все основания полагать, что уже в ближайшие десятилетия производство большинства необходимых предметов быта удастся реализовать в домашних условиях по моделям, загруженным из глобальной сети, прообразом которой ныне является Интернет.

Общая тенденция развития фабберных технологий состоит в максимальном расширении сферы их применения: от синтеза живых тканей и выращивания искусственных органов до послойного нанесения изделий микроэлектронники и даже строительства зданий и сооружений. Фабберный этап в развитии средств производства может в корне изменить наши представления о производстве и доставке вещей, открывая путь к гармонизации стандартов потребления и достижению многовековой мечты человечества об обществе изобилия. ●