

# ФАББЕР-ТЕХНОЛОГИИ

## НОВОЕ СРЕДСТВО ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Возросшие требования к мобильности современных боевых систем, оперативности и полноте их всестороннего обеспечения вынуждают военных специалистов развитых стран искать новые подходы к совершенствованию средств военной логистики.

Эффективные методы решения проблем в этой области могут дать фаббер-технологии, именуемые также технологиями быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) или трехмерной печати. Эти технологии основаны на автоматическом преобразовании электронных CAD-моделей в твердотельные физические объекты с помощью так называемых фабберов – специальных цифровых устройств механической обработки. Развитие фаббер-технологий привело к тому, что сегодня они уже выходят за границы своего первоначального предназначения и находят широкое применение в промышленном и гражданском секторах рынка.

### ИСТОКИ ФАББЕР-ТЕХНОЛОГИЙ

Идея автоматического формирования трехмерного твердотельного объекта впервые была реализована еще 18-м веке, когда во Франции для копирования медальонов стали использовать устройство, подобное пантографу. Позднее по тому же принципу было создано несколько машин, способных вырезать полноразмерный человеческий бюст. Полвека назад появились токарные и шлифовальные станки с "числовым программным управлением", способные напрямую "материализовывать" модели, созданные с помощью компьютера. Используемые при этом методы получили название субтрактивных ("отнимающих"), поскольку фабберы при формировании предмета различными способами вырезали, выпиливали, дробили или удаляли из заготовки ненужный материал.

В последние годы этот подход распространился и в область микроминиатюрных технологий. Так, фирма Revise разработала процесс трехмерной инверсной стереолитографии, основанный на лазерном микрохимическом травлении исходного материала. Суть процесса состоит в плавлении микроскопической области материала с помощью узкофокусированного лазерного пучка (мощностью 8–10 Вт) в присутствии газообразного химического реагента. Подаваемый под высоким давлением (100–400 Торр) газ-реагент образует с расплавленным материалом устойчивое химическое соединение, которое удаляется из зоны реакции. Фирмой создана установка 9900 FIB ASSISTANT для лазерной обработки кремниевых заготовок в присутствии хлора. Благодаря уникальным теплопро-

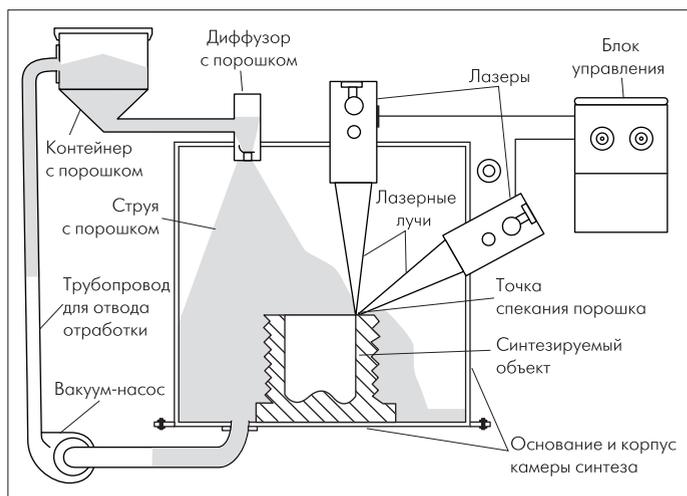


В.Слюсар

водным свойствам кремния размер его расплавленной области может составлять всего несколько кубических микрон, причем за пределами этой области его кристаллическая решетка не изменяется. Толщина удаляемого слоя равна 1–8 мкм, шероховатость вытравленных поверхностей не превышает 30 нм. Вытравливание кремния возможно на различных уровнях независимо друг от друга со скоростью  $10^5$  мкм<sup>3</sup>/с. Это позволяет создавать различные трехмерные микроформы. Основное назначение установки – серийное производство кремниевых микроэлектромеханических систем (МЭМС) и трехмерная обработка кремниевых пластин [1].

Но субтрактивным методам присущ ряд недостатков, в частности ограниченный ассортимент форм, поддающихся реализации, а также чрезвычайная сложность или невозможность создания на их основе асимметричных, запутанных и вложенных друг в друга фигур. Более продвинутый подход – аддитивное (add – прибавлять) прототипирование, при котором формообразующая жидкость, листовая или мелкодисперсный порошковый материал последовательно фиксируются на локальных участках и уровнях синтезируемого объекта, выстраивая его область за областью. Корни аддитивных технологий берут начало в 19 веке, когда был запатентован первый слоистый метод создания шаблонов для производства рельефных топографических карт, используемых военными ведомствами для получения макетов местности. Но распространение эти методы получили лишь во второй половине прошлого столетия. В 1972 году на фирме Mitsubishi был разработан процесс формирования трехмерных топографических карт с применением фотополимеризующейся резины. А в 1974-м с помощью аддитивных методов впервые начали изготавливать объекты, поверхности которых трудно сфабриковать машинной обработкой: пропеллеры самолетов, трехмерные кулачки со сложными профилями, лекала для дыропробивных прессов и т.п. [2,3].

В начале 70-х был предложен порошковый процесс, имеющий много общего с современными лазерными методами поверхностного синтеза [2]. При формировании объекта этим методом мелкие частицы подаются к матрице либо самотеком, под действием магнитостатической или электростатической силы, либо с помощью сопла. Лазерным, электронным или плазменным пучком частицы локально нагреваются, образуя в результате сцепления друг с другом непрерывный слой. Для увеличения силы связи частиц можно использовать несколько синхронно работающих источников тепла, например лазеров (рис.1). Правда, для формирования прототипов с помощью этого метода материал должен быть плавким, хотя бы частично.



**Рис.1. Порошковый лазерный процесс**

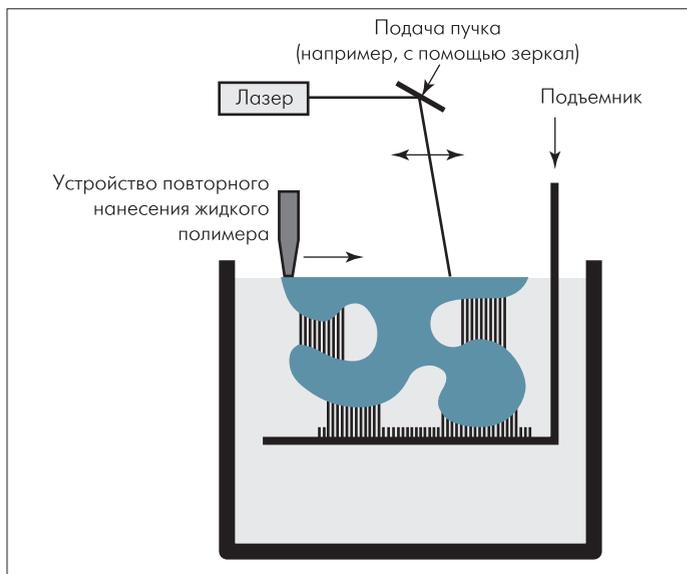
### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФАББЕР-ТЕХНОЛОГИЙ

Сегодня фабберы реализуют свыше 30 различных процессов аддитивного прототипирования, среди которых наиболее успешно разработаны следующие:

- стереолитография (StereoLithography, SL);
- сплавляющее экструдерное осаждение (Fused Deposition Modelling, FDM) [4];
- баллистическое осаждение частиц (Ballistic Particle Manufacturing, BPM);
- многослойное изготовление объектов (Laminated Object Manufacturing, LOM);
- селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS).

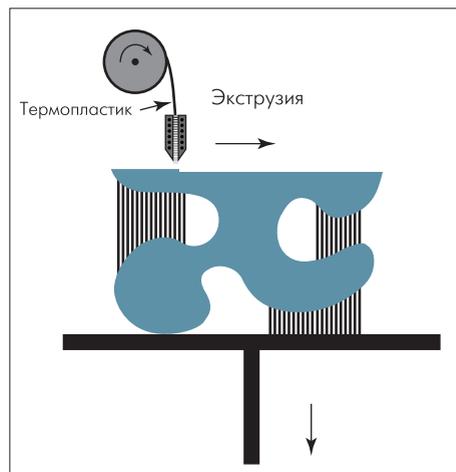
Перечисленные технологии наиболее активно продвигаются на мировой рынок фабберов, поэтому они заслуживают подробного рассмотрения, тем более что пока трудно прогнозировать, какие из них станут ключевыми.

**Стереолитография** – самая известная технология трехмерной печати. Стереолитографические фабберы на мировом рынке широко представлены фирмами 3D Systems (США) [4,5], CMET, D-MEC, Mitsui, Teijin Seiki (Япония), Electro Optical Systems (EOS), Fockele & Schwarze (Германия) [4]. В России разработана экспериментальная установка [6] и выпускается стереолитографическая система



**Рис.2. SL-технология**

ЛС-250 [7]. Общеизвестный лидер в области стереолитографии – компания 3D Systems. Типичный фаббер фирмы состоит из четырех основных блоков: процессора построения сечений, управляющего процессора, камеры синтеза и лазерного блока. Процессор построения сечений преобразует данные файла модели на стандартном языке высокого уровня STL (StereoLithography Text Language), используемого в большинстве фабберов, в данные совокупности послойных сечений с заданным шагом, помещаемые в SLI-файл (машинно-зависимый двумерный формат векторных данных управления лучом лазера). По данным этого файла управляющий процессор на протяжении всего процесса синтеза контролирует перемещения механических узлов фаббера (элеватора, системы зеркал, тральщика и т. п.). Камера синтеза представляет собой резервуар, заполняемый жидким фотоотверждаемым полимером (рис.2). Внутри него по командам управляющего процессора в вертикальном направлении перемещается опорная платформа (элеватор). В исходном состоянии зазор между рабочей поверхностью элеватора и поверхностью жидкого полимера равен толщине первого слоя синтезируемого объекта. С началом синтеза лазерный луч сканирует поверхность полимера в соответствии с текущими данными сечения модели. Фотополлимерная жидкость под действием лазерного излучения переходит в твердую фазу, причем для этого не требуется большой энергии. После того, как лазерный луч полностью отсканирует первый слой, элеватор опускается на один уровень и процесс сканирования повторяется. По завершении синтеза заготовка модели удаляется из резервуара и для обеспечения заданной прочности обрабатывается мощным УФ-излучением. Для поддержки выступающих фрагментов модели в ходе формирования последующих уровней используются опорные элементы, образуемые точечной лазерной засветкой фотополлимера. После завершения синтеза объекта эти элементы удаляются.



**Рис.3. FDM-технология**

Для поддержки выступающих фрагментов модели в ходе формирования последующих уровней используются опорные элементы, образуемые точечной лазерной засветкой фотополлимера. После завершения синтеза объекта эти элементы удаляются.

**FDM-процесс** предусматривает протягивание обжимными роликами через экструдер диаметром менее 0,178 мм нити из стирол-бутадиен-акрилонитрила (СБА), поликарбоната, воска или эластомера. Нить при этом нагревается, переходит в полужидкое состояние и наносится на матрицу формируемого трехмерного объекта в ходе построчного сканирования экструдером (рис.3). Компоночное вещество, осаждаясь на матрице объекта, быстро затвердевает при температуре окружающей среды. Процессор FDM-системы управляет перемещением головки экструдера по трем осям и регулирует температуру нагрева подаваемого материала. Особенность FDM-системы – прецизионный нагрев материала до температуры, лишь незначительно превышающей температуру его затвердевания. Во многих FDM-устройствах используются несколько бобин с различными по цвету или составу нитями, причем сменой бобин также управляет процессор. Время смены не превышает 1 мин. Достоинство FDM-систем – безотходная работа, не требующая фильтрации токсичных газообразных продуктов.

Основные характеристики FDM-фабберов фирмы StrataSys

Тип машины	FDM2000	FDM3000	FDM8000	FDM Maxum
Размеры синтезируемых объектов, макс., мм	245x254x254	245x254x406	457x457x609	600x500x600
Габариты, мм	660x1067x914	660x1067x914	1486x1905x1003	2235x1981x1118
Масса, кг	180	180	392	1134
Точность синтеза, мм	+/-0,1	+/-0,1	+/-0,1	+/-0,1
Исходный материал	СБА (P400 и P500), эластомер E20, Индустриальный воск (ICW06)	СБА (P400 и P500), эластомер E20, Индустриальный воск (ICW06)	СБА (P400)	СБА (P400)
Температура обработки, °C				
СБА (P400 и P500)	260–290	260–290	260–290 (P400)	270 (P400)
E20	160–220	160–220		
ICW06	68	68		
Толщина нити, мм	0,05–0,5	0,05–0,5	0,1–0,5	0,1–0,25

Формирование трехмерного, спроектированного САПР объекта с помощью FDM-системы сводится к преобразованию САПР-файла в STL-формат и трансформированию STL-описания моделируемого объекта в набор данных, характеризующих послойные поперечные сечения требуемого разрешения. Эти данные транслируются затем в файл машинных команд SML-формата (Stratasys Modeling Language), по которым и осуществляется синтез.

Крупнейшая фирма, продвигающая FDM-технику на мировой рынок, – StrataSys (см. табл.). Согласно ее рекламному проспекту, FDM-фабберы позволяют на 30–50% сократить расходы на обработку дизайна проектируемых изделий. Недавно StrataSys усовершенствовала свои системы, оснастив их двойным экструдером, одно сопло которого подает компоновочный материал, а другое – легко удаляемый материал поддержки (воск), необходимый для формирования сложных составных объектов (рис.4).



Рис.4. Образец ключа из СБА-пластмассы, изготовленный на установке FDM-3000

Фирма одной из первых инициировала продвижение FDM-технологии в сферу офисного моделирования. Ее установка Prodigy – пока единственная система подобного класса, работающая с нетоксичной достаточно прочной СБА-пластмассой. Широкий набор основных цветов используемого материала (белый, синий, желтый, черный, красный и зеленый) позволяет моделировать изделие любого заданного цвета.

**ВРМ-технология** по сути аналогична обычному процессу струйной печати [4]. Реализуется она путем перемещения пьезоэлектрической головки, выбрасывающей на поверхность синтезируемой модели крошечные капли расплавленного нетоксичного цветного термопласта, закрепляющиеся на этой поверхности (рис.5). Для получения гладкой поверхности иногда применяется вторая, нагревающая головка. При синтезе объекта с выступающими формами используется специальный связующий материал, который поддерживает их на стадиях формирования объекта, а затем легко удаляется с помощью растворителя. Достоинства ВРМ-технологии – дешевизна, малые габариты ВРМ-системы, относительно

низкое энергопотребление, отсутствие системы вентиляции. Это – достаточно новая технология, и ВРМ-платформы пока выпускает лишь фирма ВРМ Technology, владеющая большинством патентов на нее. Поэтому сейчас отмечается лишь один недостаток этой технологии – низкая производительность ВРМ-систем.

**ЛОМ-технология** – результат развития слоистых методов формирования шаблонов. Заключается она в послойном вырезании по заданной программе сечений трехмерной модели из супертонких листовых материалов с помощью лазера (рис.6а) или прецизионной фрезы (рис.6б) и последующем склеивании их друг с другом [8]. Разрешающая способность ЛОМ-процедуры уже сейчас может достигать 50 мкм. По мере уменьшения толщины листовых материалов и совершенствования

механизмов прецизионного позиционирования резца этот показатель может быть доведен до 10 мкм. Получить такое разрешение с помощью других фабер-технологий пока нельзя из-за трудностей формирования лазерного пучка, жидкостной или порошковой струи малого диаметра, а также жидкого либо порошкового слоя малой толщины. Другие достоинства ЛОМ-метода – возможность создания твердотельных объектов с размерами, недостижимыми пока для других фабер-технологий, и отработанность механических компонентов на устройствах другого назначения. Кроме того, при ЛОМ-синтезе применяются разнообразные нетоксичные материалы (металл, пластмасса, керамика) более чем 60 цветов и оттенков. Когда вертикальным разрешением можно поступить в пользу увеличения скорости синтеза, допускается применение более толстых листовых заготовок.

Современная **SLS-технология** основана на принципе послойного формирования трехмерного объекта путем выборочного спекания металлического или неметаллического порошка под воздействием управляемого процессором луча, как правило, CO<sub>2</sub>-лазера (рис.7) [4,9,10]. В этой технологии широко используются материалы, вязкость которых при высокой температуре уменьшается, – поликарбонатные пластмассы, поливинилхлорид, нейлон, металл, керамика, воск и др. Неспекшийся порошок используют повторно для формирования последующих уровней изделия.

Порошкообразное сырье в последнее время все чаще получают посредством воздействия на нитевидную заготовку из требуемого материала сверхмощным электромагнитным импульсом длительностью 10<sup>-7</sup>–10<sup>-6</sup> с, энергия которого в два-три раза превышает энергию связи атомов разрушаемого вещества. В результате формируется мелкодисперсный порошок со средним размером частиц от 10 мкм до 20 нм [11]

и высокой поверхностной энергией (100 Дж/г для алюминиевой пудры с характерным размером частиц 20 нм). Кроме того, деформация кристаллической решетки, вызываемая "электро взрывом", образование химических связей молекул металла и нейтральных газов, появление вакансий и атомов внедрения приводят к возникновению "избы-

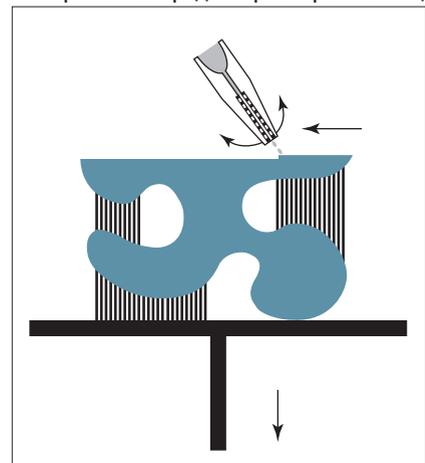


Рис.5. ВРМ-технология

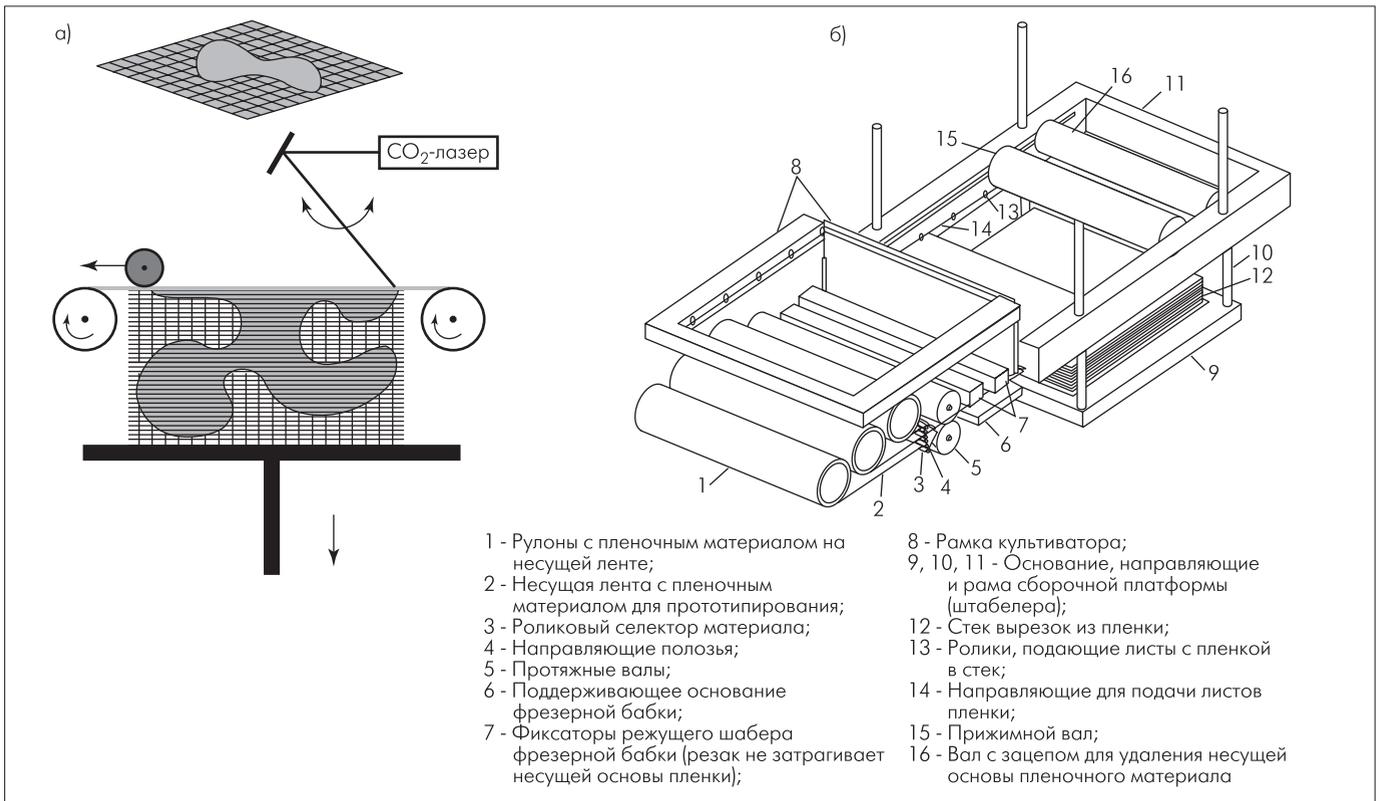


Рис.6. LOM-технология: а) лазерная и б) фрезерная

точной" энергии наночастиц. Высокая энергонасыщенность наночастиц обуславливает их высокую активность при спекании, а это, в свою очередь, позволяет существенно снизить температуру синтеза. Основные проблемы SLS-технологии:

- вероятность неконтролируемого закрепления на поверхности изготавливаемого оригинал-макета лишних частиц порошка в процессе загустения исходного материала;
- шероховатость наклонных поверхностей синтезируемых объектов, появление ступенек при послойном формировании;
- необходимость фильтрации токсичных газов, образуемых в процессе синтеза, вследствие чего сегодня все известные SLS-системы оснащены фильтрующим оборудованием.

В решении указанных проблем наиболее существенно продви-

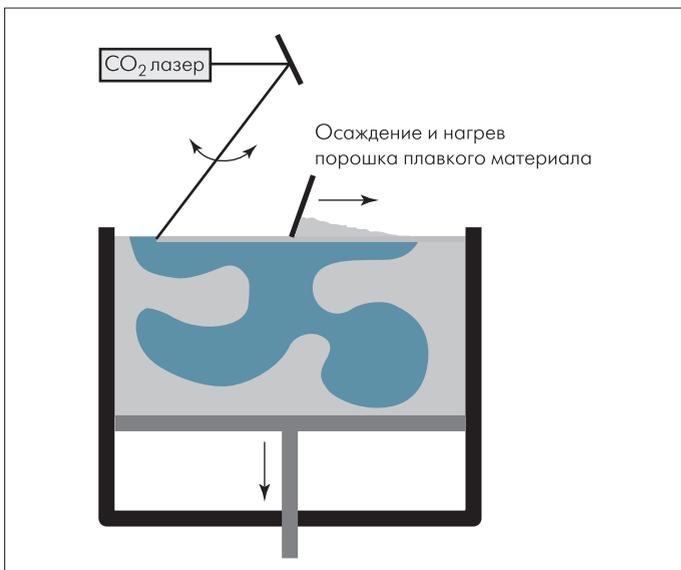
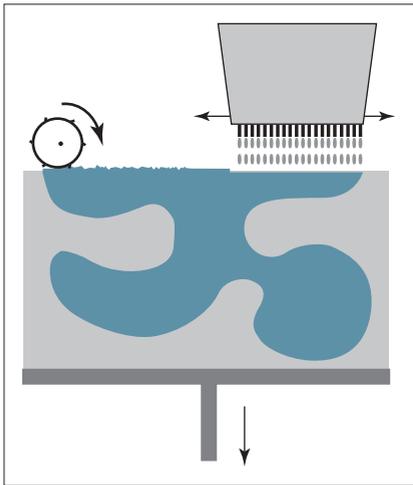


Рис.7. Селективное лазерное спекание порошка

нулись фирмы DTM (США) и EOS (Германия), широко реализующие SLS-технологии на установках собственного производства. В России исследования этой технологии интенсивно ведутся в лаборатории технологических лазеров самарского филиала ФИАН [9].

#### ФАББЕРЫ ФИРМЫ Z CORP.

Порошковые материалы можно фиксировать на поверхности синтезируемого объекта не только с помощью лазера, как это предусмотрено SLS-технологией, но и путем воздействия на порошок специальными связующими веществами. Именно такой принцип заложен в основу фабберов фирмы Z Corp. (США), работающих с нетоксичными порошковыми материалами на основе крахмала или гипса и водным связующим веществом [12]. В основе метода лежит технология, запатентованная Массачусетским Технологическим Институтом. Процесс трехмерного прототипирования крайне прост и, по сути, мало чем отличается от печати на обычном струйном принтере [13]. Оператор импортирует STL-файл описания модели управляющей программе фаббера. Программа "режет" модель на слои толщиной 76–254 нм в зависимости от выбранного соотношения между разрешением (ступенчатостью) и скоростью печати. Узел печати один за другим в соответствии с программой наращивает слои порошка. Четыре 300-струйные головки (всего 1200 форсунок) наносят связующее вещество, склеивающее частицы порошка в соответствии с формой слоя (рис.8). Затем "печатается" новый слой порошка, и процесс повторяется, пока объект не будет полностью сформирован. По окончании построения несвязанный порошок удаляется, и объект очищается от его остатков в специальной установке, набор насадок которой позволяет обрабатывать практически любые труднодоступные участки, в том числе глубокие полости. Для повышения прочности и улучшения внешнего вида модель может быть пропитана различными материалами, например нетоксичным парафиновым воском, эпоксидными смолами, полиуретанами, клеевыми составами. Модель можно сверлить, шлифовать и кра-



**Рис.8. Технология Z Corp.**

сложности без поддерживающих структур, поскольку все нависающие элементы фиксируются несвязанным порошком.

В целом возможности рассматриваемой технологии выходят за рамки концептуального моделирования. Сформированные объекты, пропитанные воском или специальной смолой ZR10 (цианоакрилат), могут играть роль мастер-моделей для изготовления литьевых форм. Получены положительные результаты по применению "напечатанных" объектов в таких процессах, как литье в землю, литье в гипсовые формы, термоформование. Следует также отметить возможность нанесения на гипсовые и крахмальные детали гальванопокрытия.

Одно из последних достижений фирмы – выпущенный в марте 2000 года цветной трехмерный фаббер нового поколения Z406, созданный совместно с Hewlett-Packard. По скорости построения физических моделей (2620 см<sup>3</sup>/ч в монохромном и ~870 см<sup>3</sup>/ч в полноцветном режиме) новая система в три раза превосходит предыдущую модель Z402 и в 20 раз любое конкурирующее оборудование быстрого прототипирования. При габаритах 102x79x112 см и массе 210 кг новый фаббер способен "напечатать" кронштейн трубопровода, показанный на рис.9, за 35 мин. Максимальный размер изготавливаемых деталей 203x254x203 мм. Цветной трехмерный фаббер может не только расширить возможности промышленного дизайна, но и решать такие задачи, как наглядное представление результатов анализа механических и тепловых напряжений, создание моделей молекул или медицинское моделирование.

Но фирма не остановилась на этом принтере. Ею недавно выпущен новый цветной широкоформатный трехмерный принтер Z810, позволяющий быстро строить полноцветные крупные прототипы изделий в натуральную величину для оценки их внешнего вида и проверки пригодности для сборки. Это позволяет повысить эффективность обсуждения конструкции изделия, облегчает проведение маркетинговых исследований и переговоров с производителями, поставщиками и клиентами. Возможно и создание мастер-моделей для литья. Физические объекты могут быть выполнены из порошков на основе крахмала или гипса. Габариты принтера 241x114x193 см, масса – 565 кг. В нем используются шесть печатающих головок, формирующих 1800 струй. Толщина получаемых слоев задается оператором в пределах 76–254 мкм, максимальные размеры синтезируемого объекта 500x600x400 мм.

### ЧТО ДАЛЬШЕ?

Таков далеко не полный перечень современных подходов к созданию устройств быстрого прототипирования. Наметившийся в по-

следние годы бум в разработке фабберов позволяет многим аналитикам делать довольно оптимистичные прогнозы их развития и применения по трем основным секторам рынка [1]. Это – сектор тривиальных систем, "рознично-офисный" сектор и сектор так называемых персональных фабрик. Основную нишу первого сектора будут занимать дорогие (стоимостью более 100 тыс. долл.), постоянно совершенствуемые фабберы, доступные лишь крупным корпорациям и сервисным организациям. Оставшуюся нишу первого сектора займут более дешевые системы, используемые в технических и проектных отделениях фирм в качестве трехмерных факсов, настольных машин для отработки дизайна и моделирования изделий. Именно по такому двухуровневому принципу большинство компаний строят сегодня стратегию применения фаббер-технологий. Несмотря на дороговизну, системы первого уровня, обеспечивающие резкое ускорение и удешевление проектирования новых изделий с принципиально новыми свойствами, будут привлекать внимание все большего числа крупных производителей, и постепенно вклад фабберов в долю выпускаемой в мире продукции станет преобладающим. Удачный пример этого – освоение фирмой Molex запатентованной фаббер-технологии для серийного производства сотовых телефонных трубок с встроенными в корпус многодиапазонными антеннами [14].

В следующем, рознично-офисном, секторе будут представлены системы производства потребительских товаров не только в промышленных условиях, но и, например, в сервисных бюро. Это позволит исключить кризис перепроизводства, необходимость складирования готовой продукции, существенно упростит инфраструктуру систем материально-технического обеспечения. Речь может идти о производстве игрушек, бытовой и канцелярской утвари, запчастей к автомобилям, мебели, фурнитуры, изделий электроники, производстве сувениров, включая образцы уникальных музейных экспонатов, и многого другого. Покупателю не придется рыскать по магазинам в поисках нужной вещи, достаточно через Интернет обратиться к услугам ближайшего сервисного бюро и заказать требуемое изделие.

О возможности реализации такого сценария свидетельствует большая заинтересованность оборонных ведомств в офисных системах. И эта заинтересованность имеет серьезные основания. Например, высота потолков склада на типовом авианосце сегодня со-

существенно упрощит инфраструктуру систем материально-технического обеспечения. Речь может идти о производстве игрушек, бытовой и канцелярской утвари, запчастей к автомобилям, мебели, фурнитуры, изделий электроники, производстве сувениров, включая образцы уникальных музейных экспонатов, и многого другого. Покупателю не придется рыскать по магазинам в поисках нужной вещи, достаточно через Интернет обратиться к услугам ближайшего сервисного бюро и заказать требуемое изделие.

О возможности реализации такого сценария свидетельствует большая заинтересованность оборонных ведомств в офисных системах. И эта заинтересованность имеет серьезные основания. Например, высота потолков склада на типовом авианосце сегодня со-



**Рис.9. Кронштейн трубопровода, "напечатанный" трехмерным фаббером фирмы Z Corp.**

ставляет ~6 м и занимает он площадь, равную половине футбольного поля [15]. Добрая часть склада отводится под хранение разного рода болтов, фланцев, втулок и прочих достаточно простых деталей, отсутствие которых в океанском походе не позволит своевременно устранить неисправность. Поэтому-то специалисты ВМС США заинтересованы в замене всего этого нагромождения запчастей несколькими фабберами и контейнерами с разнообразным порошковым сырьем, необходимым для их работы. В свое время ВМС, рассматривающие фабберы как важный фактор военной логистики, уже выделили 55 млн. долл. на разработку машины, способной утилизировать пластмассовые изделия с целью последующего их преобразования в новые предметы [16].

С помощью фабберов в полевых условиях можно будет создавать элементы антенно-фидерных трактов радиотехнических средств и даже большую часть комплектующих для микропланов, которым военные аналитики США отводят важную роль в войнах будущего [17].

Самые радикальные прогнозы относятся к третьему сектору рынка и предсказывают превращение фабберов в персональные фабрики "на дому", использующие универсальные материалы для изготовления различных бытовых предметов. Многие из необходимых для этого методов сегодня находят ограниченное коммерческое применение или пока разрабатываются. Ключевым фактором такого превращения должно стать резкое снижение стоимости фабберов (до 1 тыс. долл. и менее). Работы по снижению стоимости расходных материалов, расширению их спектра, устранению токсичности процессов прототипирования, созданию рынка виртуальных моделей дают все основания полагать, что через тридцать-сорок лет человечеству все же удастся воплотить в жизнь немыслимое, реализовав в условиях дома непосредственное производство.

Фабберный этап развития средств производства может в корне изменить наши представления о вещах, открывая путь не только к совершенствованию форм и методов вооруженной борьбы, но и к гармонизации в целом потребительских стандартов нынешней цивилизации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. Ehrlich, S. Silverman, R. Aucoin, M. Burns. Laser etching for flip-chip debug and inverse stereolithography for MEMS. – Solid State Technology, June, 2001, p. 145–150.
2. Rapid Prototyping in Europe and Japan. – JTEC/WTEC Report, March, 1997. PB97-162564. www.itri.loyola.edu/rp/toc.htm.
3. Пат. 3932923 США. Приор. 20.06.1976.
4. http://www.biba.uni-bremen.de/groups/rp/rp\_intro.html.
5. Пат. 5779967 США. Int. Cl. B29C 035/08. Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography/ Ch. W. Hull. – 3D Systems, Inc. – Приор. 1407.1998.
6. Евсеев А.В., Камарев С. В., Коцюба Е. В. и др. Изготовление физических моделей методом стереолитографии. – Автоматизация проектирования, 1999, № 2, www.osp.ru/ap/1999/02/005.htm.
7. Технологии быстрого прототипирования. – Институт проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук. – www.laser.ru/rapid/index.htm
8. Пат. 5879489 США. Int. Cl. B32B 31/00. Method and apparatus for automatic fabrication of three-dimensional objects/ M. Burns and more. – Приор. 9.03.1999.
9. Что такое быстрое прототипирование. – www.fian.samara.ru/rp/rp\_intro-r.htm.
10. www.fian.samara.ru/rp/rp\_papers-r.htm.

11. V. Ivanov, Yu. Kotov, O. Samatovye et al. Synthesis and Dynamic Compaction of Ceramic Nanopowders by Techniques Based on Electric Pulsed Power. – Nanostructured Materials, 1995, v. 6, № 4–6, p.287–290.
12. Колка И.А. Самый быстрый и недорогой способ построения трехмерных моделей. – САПР и графика, 2001, № 6. www.sapr.ru/ contents.asp?IDM=САПР%20и%20графика.
13. Трехмерная печать. – www.pumori.ru/Engineer/BPP/3D.htm.
14. www.molex.com.ua/news/index.shtml.
15. Scott Faber. Technology Watch, Printing in 3-D. – www.totse.com/en/technology/science\_technology/fabber.html.
16. Brock Hinzmann. The Personal Factory. www.ennex.com/publish/199600-Brock-PersonalFactory.sht.
17. Слюсар В.И. Микропланы: от шедевров конструирования – к серийным системам. – Конструктор, 2001, № 2, с.23–25.

## Матрица энергонезависимой памяти



### на нанотрубках.

### Прогресс не прекращается

Фирма Nantero объявила о разработке технологии, позволяющей изготавливать на кремниевых подложках схемы оперативной памяти на базе нанотрубок (NRAM) емкостью до 10 Гбит. Так называемые углеродные нанотрубки – это своеобразные цилиндрические молекулы диаметром около 0,5 нм и длиной до нескольких миллиметров. Представляют они собой побочные продукты синтеза фуллерена C60. Углеродные нанотрубки сопоставимы с медью по электропроводности, прочнее стали и тверже алмаза. Толщина стенки нанотрубки не больше размера атома, а ее диаметр на пять порядков меньше толщины человеческого волоса.

В предложенной специалистами фирмы структуре в качестве элементов памяти NRAM используются распределенные по кристаллу нанотрубки, при этом положение нанотрубки "вверх" соответствует логическому нулю, "вниз" – логической единице. Положение нанотрубок можно менять путем подачи электрического поля. Метод изготовления NRAM, предложенный фирмой Nantero заключается в осаждении чрезвычайно тонкого слоя произвольно расположенных углеродных нанотрубок на поверхность кремниевой пластины с последующим удалением с помощью литографии "неправильно" расположенных трубок. Этот метод и позволил создать большую матрицу NRAM. К достоинствам технологии относится высокий уровень резервирования элементов памяти, поскольку один бит данных соответствует не одной трубке, а группе их.

Разработчиками с помощью стандартной полупроводниковой технологии изготовлена матрица NRAM, содержащая 10<sup>9</sup> переходов на нанотрубках. Это делает новые схемы весьма перспективными для скорейшего освоения в производстве, поскольку для этого не потребуется специальное оборудование, и цена такой памяти не будет заоблачной. Основная проблема, стоящая сегодня перед разработчиками, – разрешение современных систем литографии.

Компания рассчитывает, что новая память типа NRAM заменит если не все современные типы ЗУ, то многие из них, в том числе ДОЗУ, в сравнении с которыми она быстрее и имеет большую плотность упаковки, СОЗУ и флэш, потребляемая мощность которых выше. NRAM найдет применение в мгновенно включаемых компьютерах, плеерах MP3, цифровых камерах и персональных помощниках, а также в компьютерных сетях. По утверждению специалистов фирмы, чипы памяти NRAM-типа емкостью до 4 Мбит могут появиться уже в конце 2004 года, а к 2007 этот тип памяти будет уже на равных конкурировать с существующими ОЗУ.