

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

(Часть первая)

*Канд. техн. наук, доц. КОЛЕСНИКОВ Л. А.<sup>1)</sup>, МАНЖУЛА Г. П.<sup>2)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. ШЕЛЕГ В. К.<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. ЯКИМОВИЧ А. М.<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>ЗАО «МСП Технолоджи Центр»

В настоящее время прибыльность машиностроительного производства упала во всем мире. Основная причина – бурное индустриальное развитие стран так называемого третьего мира, в особенности Китая и Индии. Ценовая конкуренция развитых стран с ними невозможна по понятным причинам, поэтому для получения по-прежнему высокой нормы прибыли у них остается единственная возможность – производство уникальной продукции. Только уникальный продукт можно продать не за конкурентную, а за уникальную (монопольную) цену. Уникальность продукции сегодня обеспечивается двумя путями: сегментацией рынка и ускорением разработки и выпуска новых видов продукции. Развитые страны (ЕС, США, Япония и др.) хорошо освоили эти возможности. Приемлемую прибыльность машиностроительной отрасли этих стран как раз и обеспечивают путем организации быстрого проектирования и производства выпуска малых партий уникальных или хотя бы в чем-то отличающихся товаров.

Страны СНГ и Восточной Европы пытаются догнать развитые страны, идя по тому же пути. Но можно попытаться не догонять развитые страны, а обогнать их, используя принципиально новые (для машиностроения) технологии. Одной из таких технологий является формирование трехмерных объектов не путем удаления материала (точение, фрезерование) или изменения формы заготовки (ковка, штамповка), а путем послойного выращивания материала. Эти технологии наиболее известны как быстрое

прототипирование (Rapid Prototyping, RP). Иногда их еще называют технологиями послойного выращивания или аддитивными технологиями (Additive Techniques). При изготовлении по этим технологиям компьютерная модель будущей детали или узла передается в установку для быстрого прототипирования. Далее из порошка или фотополимера формируются тончайшие горизонтальные слои, которые в процессе изготовления автоматически объединяются друг с другом. В результате получается твердая копия исходной компьютерной модели с точностью до толщины слоя.

В настоящее время можно выделить три области использования технологий быстрого прототипирования:

1) изготовление эскизных макетов, дизайнерских или инженерных образцов (прототипов). Изначально это направление и называлось «быстрое прототипирование»;

2) изготовление либо непосредственно инструмента (технологической оснастки) для традиционных производственных процессов (литья, штамповки), либо промежуточных средств для его производства, используя технологии быстрого прототипирования. Такое направление носит название Rapid Tooling (быстрое изготовление инструмента или быстрый инструмент);

3) непосредственное изготовление функциональных деталей, используя технологии быстрого прототипирования. Такой подход к производству носит название Rapid Manufacturing, или «быстрое изготовление».

Два последних направления называют также аддитивным производством (Additive Fabrication, AF или Additive Manufacturing, AM).

Косметические прототипы предназначены для оценки внешнего вида и формы (эргономики) новой детали. Они используются для получения первых комментариев от заказчика и оперативной коррекции дизайна изделия. Часто их также применяют для оценки реакции потенциальных потребителей.

Инженерные прототипы используются для оценки функциональной пригодности новой разработки. В первую очередь, это оценка сопрягаемости новой детали с ее существующим окружением (в частности, проверка собираемости), а также выполнение тестов на удобство использования, продувка в аэродинамической трубе и т. д.

**Примеры технологий быстрого прототипирования.** Прежде чем перейти к технологиям быстрого изготовления, рассмотрим вкратце их основу – наиболее распространенные технологии быстрого прототипирования или послойного изготовления трехмерных объектов [1].

Одним из первых способов быстрого прототипирования является лазерная стереолитография (Stereolithography – STL или Stereo Lithography Apparatus, SLA). Принцип работы установки для лазерной стереолитографии иллюстрирует рис. 1а. Ванна, оборудованная подвижным столом, заполнена жидким фотополимером, который может затвердевать (полимеризоваться) под действием лазерного луча. В исходном положении поверхность стола находится ниже уровня жидкости ровно на толщину слоя. Лазерный луч, направляемый сканирующим зеркалом, засвечивает только те участки поверхности, где на текущем слое должен находиться материал. Освещенные участки поверхности фотополимера за 2–3 с затвердевают и прилипают к столу или к ранее выращенной части детали. По завершении обработки первого слоя стол опускается на глубину следующего слоя. Выравнивающая линейка наносит тонкий слой жидкой смолы на ранее выращенную часть детали. Далее опять засвечиваются только те участки поверхности нового слоя, на которых должен находиться материал. Так, слой за слоем, и формируется деталь. По завершении построения готовая де-

таль промывается от остатков жидкой смолы, сушится и может быть дополнительно помещена в ультрафиолетовую камеру для ускорения окончания полимеризации. Затвердевший полимер по цвету и прочности напоминает эпоксидную смолу. Для сокращения расхода фотополимера и ускорения работы массивные детали часто выполняют в виде тонкостенных сот, заполняющих цельную оболочку.

Точность изготовления моделей методом стереолитографии наивысшая среди других технологий быстрого прототипирования. Она определяется толщиной слоя, как правило, составляющего от 0,016 до 0,200 мм, и диаметром луча лазера. При правильном подборе параметров минимальная толщина стенки полого изделия не превышает 0,2 мм. Размеры выращиваемых деталей ограничены габаритами рабочей камеры и могут достигать величины 1500×750×500 мм. Для получения более крупных деталей выращивают отдельные блоки и склеивают их. Скорость выращивания – порядка 10 мм по высоте в час, стоимость изготовления – менее 2 евро/см<sup>3</sup>. Стоимость установки в зависимости от размера камеры выращивания составляет 200000–900000 дол.; стоимость фотополимера – ориентировочно 150–190 дол./кг. Самым крупным производителем установок для стереолитографии является фирма 3D System, США. В настоящее время примерно 3/4 всего выпуска деталей по технологиям быстрого прототипирования осуществляется на установках этого типа. Пример изделия сложной формы, изготовленного методом стереолитографии, представлен на рис. 1б. К недостаткам стереолитографии относятся высокая цена установок и токсичность фотополимера в жидком виде. Получаемое изделие хрупкое и может покорежиться при длительном нахождении во влажной среде.

Способ создания прототипа избирательным спеканием (плавлением) порошков лучом лазера (Selective Laser Sintering, SLS или Selective Laser Melting, SLM) в чем-то похож на стереолитографию. На поверхность подвижного стола (рис. 2а) при помощи ролика подачи наносится тонкий слой порошка. Лазерный 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. По окончании процесса выращивания неспеченный порошок удаляют. Важной особенностью процесса является то, что во время изготовления модель погружена в «ванну» из неспеченного порошка. Этот порошок служит своеобразной опорой для частей модели, что упрощает создание тонких стенок и нависающих участков. Для производства деталей могут использоваться порошки из металлов, керамики или полимеров (в зависимости от мощности лазера в установке). Например, на рис. 2б показаны турбинные лопатки сложной внутренней структуры из жаропрочной стали, выполненные по технологии избирательного спекания порошков лучом лазера [2].

Интересным решением служит также использование металлических или керамических порошков с полимерным покрытием частиц. В процессе обжига маломощным лазером полимер расплавляется и склеивает между собой частицы основного материала. Далее готовую модель («сырец», green) спекают в печи и, при желании, пропитывают металлическим расплавом (чаще всего бронзой). В результате возможно получить полностью функциональную деталь.

Точность этой технологии может достигать величины  $\pm 0,05$  мм, а скорость выращивания – порядка 12–25 мм<sup>3</sup>/ч, рабочая камера – размера 700×380×580 мм. Основные производители: 3D System (США) и EOS (ФРГ).

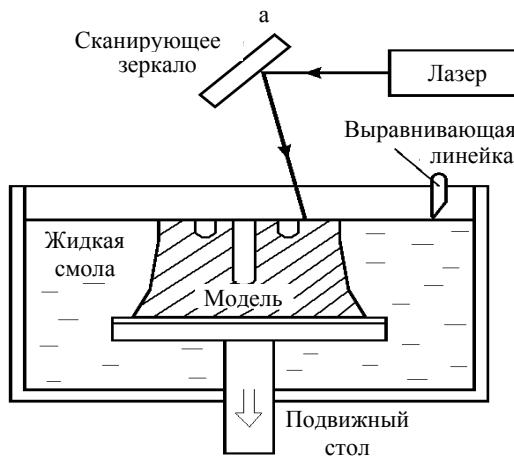


Рис. 1. Схема установки для стереолитографии (а) и образец изделия (б)

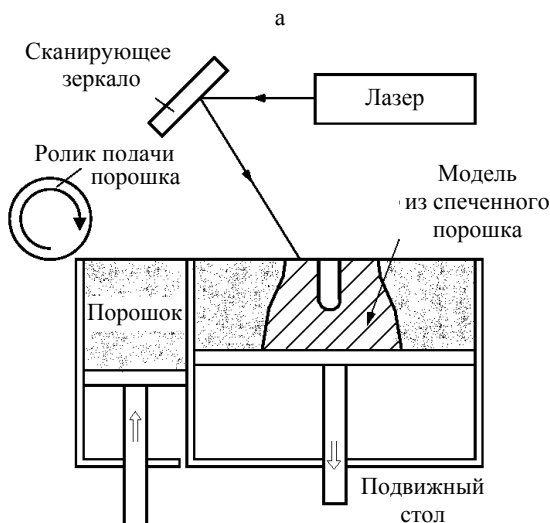


Рис. 2. Схема установки для избирательного спекания порошков (а) и образцы изделий (б)

Главный недостаток метода заключается в сложности удаления и повторного использования остатков порошка. Это, в частности, приводит к тому, что замена порошка вынуждает проводить весьма трудоемкую очистку всей камеры выращивания. Кроме того, процесс выращивания необходимо проводить в среде инертного газа.

Установка трехмерной печати (3D Printing, 3DP) тоже выращивает деталь из порошка, но для соединения частиц порошка между собой используется клей. На поверхность подвижной платформы при помощи ролика подачи наносится тонкий слой порошка (рис. 3а). Подвижная головка с соплами сканирует поверхность слоя и разбрызгивает быстро застывающий клей только на те участки поверхности, где на текущем слое должен находиться материал. В этих местах частицы порошка склеиваются между собой и с нижележащим слоем. Название метода обусловлено, видимо, тем, что работа установки внешне напоминает работу струйного принтера. Сходство усиливается тем, что клей может быть окрашен в базовые (красный, зеленый, голубой) цвета. В результате возможно создание детали, любой объем которой будет окрашен в произвольный цвет (теоретически доступно 16 миллионов оттенков цвета). Например, на рис. 3б показана «змея», разноцветные чешуйки которой насквозь пронизывают тело.

В качестве строительного материала чаще всего используются крахмально-целлюлозные или гипсовые порошки, а в качестве клея – полиэфирный компаунд или специальный воск. Для повышения прочности готовой модели

иногда ее пропитывают цианоакрилом или эпоксидной смолой. Экологичность используемых материалов позволяет устанавливать 3D-принтеры даже в офисах. Стоимость и аппаратов, и расходных материалов одна из самых низких в отрасли [3]. Толщина слоя меняется в диапазоне от 0,076 до 0,254 мм при скорости «печати» двух-шести слоев в минуту. Размеры рабочей камеры достигают 500×600×400 мм. Основные производители: Z Corporation, Stratasys (США). К недостаткам этого метода можно отнести сравнительно невысокую точность выращивания, грубость поверхности и не всегда достаточную прочность детали.

Технологию моделирования распределением расплава (Fused Deposition Modelling, FDM) иллюстрирует рис. 4а. В нагревательную головку со множеством сопел подается нить (или нити, шнуры) из термопласта. В головке нить плавится и отдельными каплями выбрасывается из сопел на нужный участок. Застывая, капельки пластика привариваются к предыдущему слою. Головка перемещается над поверхностью детали, формируя очередной слой. Далее подвижный стол опускается на толщину слоя, и цикл повторяется до завершения выращивания детали. Как правило, используются одновременно не менее двух головок. Одна головка – для распыления материала, из которого изготавливается деталь. Вторая головка распыляет легкоудаляемый материал, который служит для создания специальных поддерживающих элементов (поддержек) для выступающих (или нависающих) частей модели, тонких стенок, поднутрений и т. д.

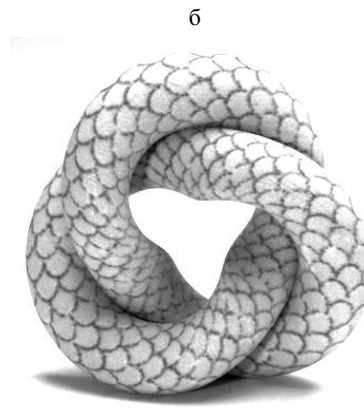
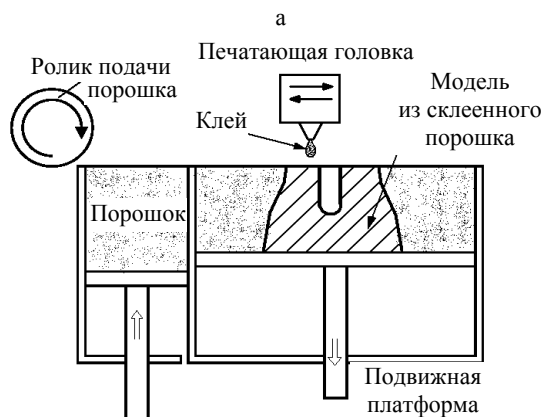


Рис. 3. Принцип работы установки для трехмерной печати (а) и образец изделия (б)

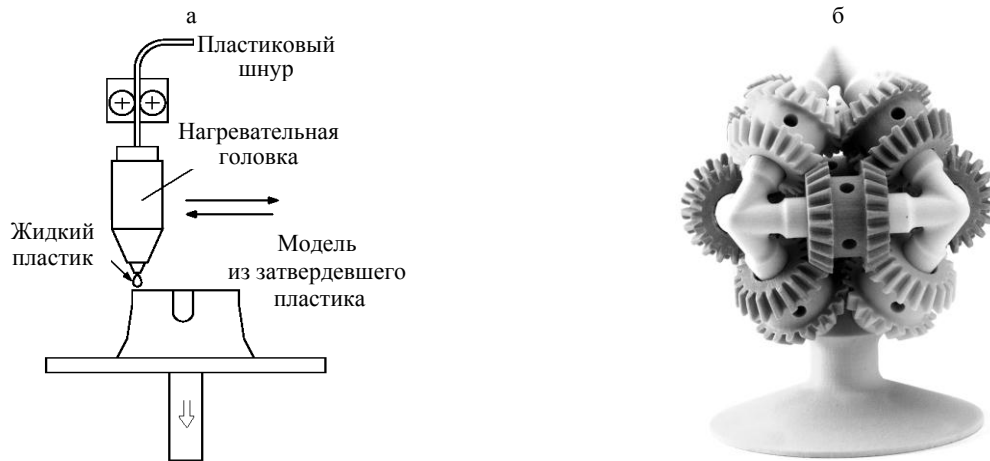


Рис. 4. Схема установки для моделирования распределением расплава (а) и образец изделия, выращенного в сборе (б)

В качестве строительного материала могут использоваться ABS-пластики различных цветов или эластомеры на основе полиэфира. Применение промышленных термопластов позволяет создавать сразу полнофункциональные детали, в том числе гибкие и упругие компоненты (рис. 4б). Кроме того, при необходимости создавать образцы для литья по выплавляемым моделям в качестве строительного материала используется также литейный воск, в качестве материалов поддержки – водорастворимые материалы типа крахмала.

Точность этой технологии достигает величины порядка  $\pm 0,13$  мм при производительности до  $380 \text{ мм}^3/\text{с}$ . Размер рабочей камеры таких установок может достигать  $600 \times 500 \times 600$  мм. Ориентировочная стоимость установки с размером камеры  $254 \times 254 \times 254$  мм – около 35000 дол.; стоимость литейного воска – около 250 дол./кг. Основным производителем таких установок является Stratasys, DTM Corporation (США). К недостаткам технологии моделирования распределением расплава можно отнести возможность расслоения изделия под нагрузкой и жесткие требования по поддержанию температурного режима в процессе выращивания.

Принцип работы установки для создания прототипов методом лазерной резки листовых материалов (Laminated Object Manufacturing, LOM, LOM1) иллюстрирует рис. 5а. Бумажная лента с нанесенным слоем термоактивируемого клея при создании очередного слоя останавливается над подвижным столом. Луч лазера вырезает в ленте бумаги контур очередного слоя и обрезает края листа. Горячий ламинирующий ролик прокатывается по листу бумаги, приклеивая его при этом к нижележащим. Для упро-

щения удаления излишков бумаги выполняется сетка дополнительных разрезов между контуром детали и краями листа. Далее стол опускается на толщину ленты и процесс повторяется до завершения выращивания изделия. После окончания процесса деталь оказывается заключена внутри параллелепипеда из излишков бумаги. Эти излишки относительно легко удаляются вручную благодаря заблаговременно выполненной сетке дополнительных разрезов. Выращенная деталь по внешнему виду и механическим свойствам напоминает слоистый пластик или фанеру и легко обрабатывается. Изделия, изготавливаемые по этому способу, имеют самые большие линейные размеры и делаются быстрее, чем при использовании любого другого способа быстрого прототипирования (рис. 5б). Существуют установки с размером рабочей камеры  $560 \times 810 \times 500$  мм. Точность процесса – порядка  $\pm 0,127$  мм.

В качестве рабочего материала можно использовать не только бумагу, но и пластиковую ленту, металлическую фольгу или даже листовый металл. Вырезание контура в этом случае может производиться 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.

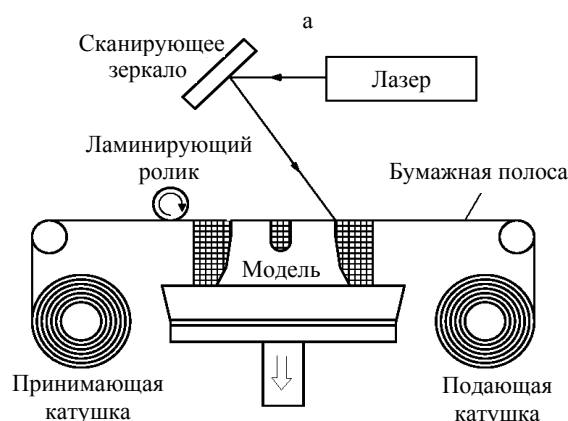


Рис. 5. Схема установки для лазерной резки листовых материалов (а), образец прототипа и литой детали (б)

Способ непосредственного размещения металла (Direct Metal Deposition, DMD) позволяет создавать сразу металлическую деталь. Принцип его работы иллюстрирует рис. 6а. Струя инертного газа подает порошок на поверхность детали. Мощный лазер расплавляет поверхность формирующейся детали в заданной точке. Порошок попадает на всю деталь, но приваривается к ней только в точке, где металл расплавлен лазером. Излишний порошок тут же выдувается из зоны обработки.

Такая 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, возможно получать деталь сложной

структуры, состоящей из различных материалов или даже отдельных устройств [4]. Например, 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 (рис. 6б).

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.

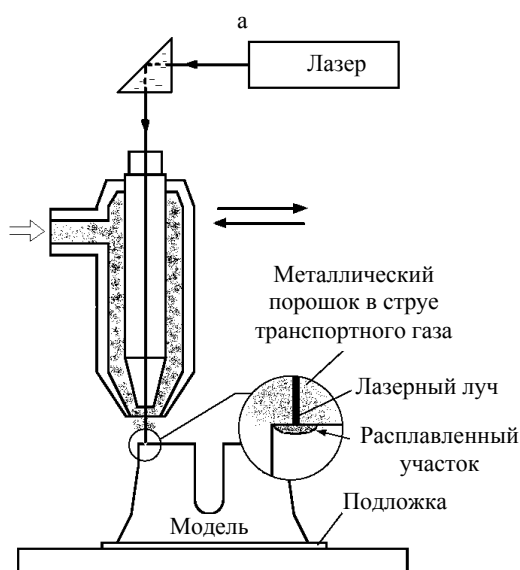


Рис. 6. Принцип работы установки для непосредственного размещения металла (а) и образец изделия (б)

Причина в том, что при сверхбыстром застывании капельки расплавленного металла кристаллы в ней просто не успевают сформироваться, т. е. формируется 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 получить никакими иными способами. Единственное ограничение – температура плавления одного металла не должна превышать температуру кипения другого металла.

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

Приведенные примеры не являются исчерпывающими. В последние 2–3 года отрасль быстрого прототипирования переживает бурное развитие, направленное на кардинальное снижение стоимости и увеличение скорости работы установок. Например, успешно развиваются технологии печати фотополимером. В одних случаях каждый слой детали в буквальном смысле слова печатается фотополиме-

ром, точно так же, как в обычном струйном принтере, и затем засвечивается ультрафиолетовой лампой (технологии типа PolyJet). В других случаях тонкий слой фотополимера наносится на прозрачную подложку и засвечивается ультрафиолетовым изображением текущего слоя (технологии типа ProJet или Film Transfer Imaging, FTI). Используя разные типы фотополимеров, возможно получить жесткие или гибкие, прозрачные или цветные детали, в том числе биосовместимые, пригодные для использования в медицине.

Своеобразный «ренессанс» переживает и LOM-технология. В качестве расходных материалов стало возможно использовать обыкновенную офисную бумагу ([www.mcorctechnologies.com](http://www.mcorctechnologies.com)) или упаковочную пленку ([www.solido3d.com](http://www.solido3d.com)).

#### ВЫВОД

Технологии быстрого прототипирования получают все более широкое распространение, при этом каждый год появляются все новые их разновидности. В настоящее время, помимо создания собственно прототипов, опережающими темпами растет использование технологий быстрого прототипирования непосредственно в промышленном производстве (так называемый Additive Manufacturing).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Черепашков, А. А.** Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / А. А. Черепашков, Н. В. Носов. – Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2009. – 640 с.
2. **Шишковский, И. В.** Лазерный синтез объемных изделий / И. В. Шишковский // Сборник докладов Самарского филиала Физического института имени П. Н. Лебедева РАН. – Самара, 2010. – С. 2–38.
3. **Зленко, М.** 3D-принтеры. Что выбрать? / М. Зленко // CAD/CAM/CAE Observer. – 2009. – № 1 (44). – С. 84–92; № 2 (46). – С. 93–96.
4. **Комаров, С. М.** Самозарождение машин / С. М. Комаров // Химия и жизнь. – 2006. – № 5. – С. 18–20.

Поступила 06.07.2012