

А.М. ГРЕЧКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ – ОТ ДЕТСКОЙ ИГРУШКИ ДО МИРОВОГО ГОСПОДСТВА

В статье проведен аналитический обзор одной из наиболее перспективных на сегодняшний день технологий в машиностроении – быстрое прототипирование сложных трехмерных моделей.

Ключевые слова: 3D-технология, быстрое прототипирование, 3D-печать, технология машиностроения.

30-летию открытия стереолитографии посвящается...

Введение. "Распечатать", "отксерить", "снять копию"... еще совсем недавно, каких-то 15 лет назад, в конце XX века перечисленные выражения поставили бы многих из нас в тупик. Что там говорить, если автор принадлежит к тому поколению студентов, которое переписывало пропущенные лекции (честно признаюсь – случалось такое) от руки обычной шариковой ручкой! Услышав подобное, современные студенты открывают широко глаза и лишь разводят руками, держа смартфоны, планшеты, ноутбуки... Технический прогресс шагает по Земле семимильными шагами, входя практически во все области и сферы деятельности человека. Конечно же, не обделил он своим вниманием и такую область науки, как машиностроение.

В начале статьи перечисляются выражения, которые мы привыкли, в подавляющем большинстве случаев, употреблять применительно к нанесению *двумерного* графического изображения (или же текста) на бумагу. Но это двумерная печать – будь-то матричная, струйная, лазерная, сублимационная или же твердочернильная. Однако машиностроение, и другие области науки, зачастую имеют дело со сложными *трехмерными* объектами (детальками) и их соединениями (сборками), которые после их создания инженерами в виртуальном виде всё также, как правило, в конечном итоге переносятся в виде проекций, аксонометрий, сечений и разрезов всё на ту же пресловутую бумагу. Невольно возникает вопрос: нельзя ли каким-нибудь образом обойтись без оной и сразу, "без посредников", попробовать воспроизвести объемную трехмерную модель будущего изделия?

Оказывается – можно! Данным вопросом занимается одна из самых, на сегодняшний день, перспективных отраслей машиностроения,

так называемая технология быстрого прототипирования (по англ. – Rapid Prototyping (RP-technology)) или, может быть, более известная в нашей стране просто под названием 3D-печать, то есть технология создания с помощью специальных устройств (3D-принтеров) физических объектов (моделей, макетов, образцов) из предварительно созданной виртуальной 3D-модели. Это относительно новая технология для машиностроения Украины, поэтому проведение подробного обзора и анализа данного вопроса является актуальной задачей. О популярности технологии и оборудования для 3D-печати красноречиво говорит и то, что достаточно ввести в ячейке любой поисковой системе просто фразу-запрос "3D" и в первой пятёрке результатов поиска Вы увидите предлагаемый вариант-подсказку "3D-принтер" – более 3,5 миллионов ссылок!

Таким образом, **целью работы** является ознакомление читателей с существующими на сегодняшний день технологиями по быстрому прототипированию трехмерных объектов, проведение технического анализа и обзора современных достижений в новой, только зарождающейся на Украине технологии быстрого прототипирования.

Основная часть. Почему же необходимо именно не просто увидеть чертежи, а, как говорится, пощупать руками готовую деталь? Ответ заключается в следующих примерах.

Во-первых, по словам представителя американской компании "Pratt & Whitney" [1] – производителя авиационных двигателей для гражданской и военной авиации – "стоимость разработки сложного продукта может очень сильно снизиться, если предложить инженерам вместо десятков чертежей посмотреть на реальную деталь" [2].

Во-вторых, "распечатанная" 3D-модель может служить неким подобием опытного образца будущих серийно выпускаемых изделий, на котором возможно проведение определенных видов тестов для выявления недостатков конструкции. Например, всемирно известная автомобильная компания Porsche использовала на этапе разработки своего автомобиля серии 911 GTI прозрачную пластиковую 3D-модель трансмиссии с целью изучения циркуляции масла [2].

Проведя анализ и обзор публикаций по данной тематике [3-6], можно сделать вывод, что на сегодняшний день в мире наибольшее распространение получили две технологии быстрого прототипирования – *лазерная* и *струйная*, которые, в свою очередь, подразделяются на такие основные разновидности (приводятся как оригинальные англоязычные названия технологий и их соответствующие аббревиатуры, принятые и понимаемые во всем мире, так и их авторский перевод на русский язык – прим.):

- *лазерные технологии:*

- стереолитография (stereolithography apparatus или SLA-технология);
- селективное лазерное спекание (selective laser sintering или SLS-технология);
- ламинирование или послойное формирование моделей из листового материала (laminated object manufacturing или LOM-технология);

- *струйные технологии:*

- моделирование методом наплавления (fused deposition modeling или FDM-технология).

Необходимо отметить, что перечислены далеко не все технологии быстрого прототипирования, а только наиболее распространенные и применяемые в мировой промышленности (дополнительно также можно выделить разработки компаний Objet Geometries (Polyjet-технология, принадлежащая сейчас компании Stratasys [7]) и технологию компании Z Corporation [8], ставшей в 2012 г. частью компании 3D Systems, речь о которой пойдет ниже). Далее рассмотрим более подробно суть каждой из приведенных технологий, принцип прототипирования, технологические возможности, ограничения по применению, преимущества и недостатки данных технологий.

Исторически первой технологией 3D-печати была разработана т.н. **стереолитография** (SLA-технология). Ее принцип был изобретен ровно 30 лет назад в 1983 г. американским ученым Чарльзом Халлом (Charles "Chuck" Hull) и запатентован им же в 1986 г. Название данной технологии происходит от слова "литография", что в переводе с древнегреческих слов означает: "λίθος" – "камень" и "γράφω" – "пишу".

Логическим продолжением проведенной исследовательской и патентной работы было основание Ч. Халлом собственной компании 3D Systems [9], которая, собственно, и занялась практическим внедрением в жизнь теоретических разработок. На рис. 1 показан автор разработки технологии стереолитографии Ч. Халл на фоне одного из первых образцов оборудования для 3D-печати с готовым "распечатанным" макетом диска для легкового автомобиля. Следует отметить, что компания 3D Systems существует и по сегодняшний день и по-прежнему продолжает занимать одно из лидирующих положений по выпуску оборудования для 3D-печати, несмотря на присутствие на данном сегменте рынка большого количества конкурирующих компаний.

Схема, описывающая процесс 3D-печати стереолитографическим способом показана на рис. 2, а ее суть заключается в следующем.

В рабочей емкости 5 (ванне) 3D-принтера находится специальная жидкость – фотополимер 6. Данный класс материалов (фотополимеры,

кроме жидкости, также выпускаются в виде пленки – сухие фотополимеры и в виде спрея – лаковые фотополимеры, рис. 3) имеет одну особенность – под действием света, а именно ультрафиолетовой части его спектра, фотополимеры либо затвердевают (полимеризуются) практически мгновенно (как в нашем случае на рис. 2), либо же приобретают новые уникальные свойства, например, способность противостоять воздействию агрессивных сред, растворителей (такие фотополимеры, например, широко применяются при производстве печатных плат и называются фоторезистами). Жидкие же фотополимеры сегодня часто используются для изготовления печатей и штампов. С фотополимерами также большинство из нас встречалось и в повседневной жизни – при посещении стоматологических кабинетов и установке так называемых фотополимерных пломб.



Рис. 1 – Основатель стереолитографического способа 3D-печати Чарльз Халл с практическим результатом своего изобретения.

Для перехода жидкого фотополимера b в твердое состояние (в довольно прочный пластик) в установке используется ультрафиолетовый лазер 1 . Лазерный луч 4 , пройдя через фокусирующие линзы 2 , попадает на вращающееся зеркало 3 , которое направляет луч в рабочую емкость 5 с жидким фотополимером 6 . Луч лазера проходит не по всей области (слою) фотополимера, который подается в рабочую зону дозированно в небольшом количестве и тонким слоем (несколько десятков микрон), а попадает лишь на те участки, которые подлежат затверждению. Данные участки задает специальная компьютерная программа,

исходя из анализа виртуальной модели, созданной в той или иной системе автоматизированного проектирования (computer aided design, т.н. САД-программы). Таким образом, лазерный луч как бы "сканирует" рабочую плоскость фотополимера и формирует отдельные твердые участки слоя детали, пока не воспроизведет на пластике одно из сечений будущей модели (например, нижняя часть детали 9 на рис. 2).

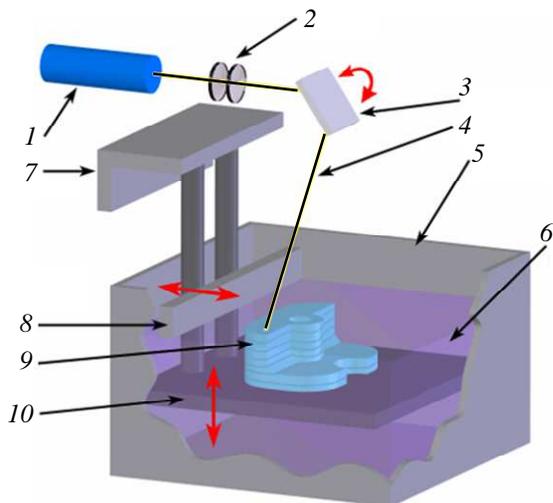


Рис. 2 – Схема процесса 3D-печати стереолитографическим способом:
 1 – лазер; 2 – фокусирующие линзы; 3 – вращающееся зеркало; 4 – лазерный луч; 5 – рабочая емкость (ванна); 6 – жидкий фотополимер; 7 – мобильный подъемник; 8 – очиститель-выравниватель; 9 – "распечатываемая" деталь; 10 – мобильная платформа с деталью.

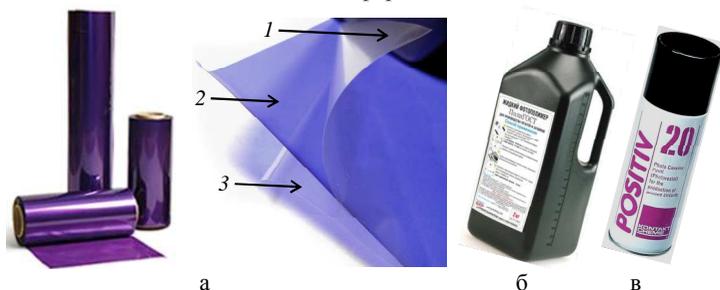


Рис. 3 – Разновидности фотополимеров:
 а – сухой пленочный (1 – полиэтиленовая матовая пленка; 2 – сухой фотополимер (фоторезист); 3 – лавсановая прозрачная пленка); б – жидкий фотополимер; в – фоточувствительный лак-спрей.

После окончания обработки одного сечения детали над всей поверхностью проходит очиститель-выравниватель 8 и убирает слой неиспользованного фотополимера. Далее необходимо "нарастить" следующий слой детали, для чего мобильная платформа вместе со сформированной частью детали 10 полностью погружается в ванну с фотополимером, тем самым подготавливая основу для следующего слоя (сечения) детали. Таким образом, поверх предыдущего слоя лазерным лучом "рисуются" следующий слой, пока трехмерная модель не будет воспроизведена полностью.

SLA-технология на сегодняшний день является одной из наиболее распространенных в мировой промышленности, что связано с рядом ее преимуществ. Прежде всего, стереолитография обеспечивает высокую точность "печатаемой" детали – порядка 100 мкм; позволяет воспроизвести как мелкие детали сложной формы, так и довольно крупные; обеспечивает низкую шероховатость поверхности. Недостатками стереолитографии являются, прежде всего, высокие цены установок и расходных материалов – цена такого 3D-принтера может достигать до сотен тысяч долларов. Также SLA-технология нуждается в применении т.н. поддерживающих структур для частей модели, "висящих" в воздухе (рис. 4), которые подлежат удалению после окончания печати. Процесс удаления требует определенной квалификации, кропотливости – неосторожность может привести к разрушению модели. Также ограничением применения стереолитографии является то, что данная технология позволяет получать детали только из фотополимеров.

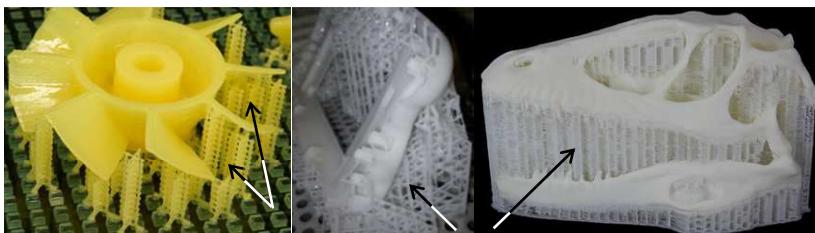


Рис. 4 – Поддерживающие структуры моделей при печати по SLA-технологии.

Следующая технология 3D-печати называется **селективным лазерным спеканием** (selective laser sintering или SLS-технология).

Теоретическая суть технологии была разработана в конце 80-х годов XX века в Техасском университете (г. Остин) и запатентована в 1989 г. выпускником данного университета Карлом Декардом (Carl Deckard, рис. 5) [10]. Спустя несколько лет принцип SLS-технологии был реализован американской компанией DTM Corporation (ее основа-

телями и стали Карл Декард с Джо Бимэнном), которая и начала применять данную технологию на практике. Однако в конце 90-х годов после ряда перепродаж контрольный пакет акций DTM Corporation был приобретен Ч. Халлом и все той же компанией 3D Systems!



Рис. 5 – Проф. Джо Бимэн (Joe Beaman) демонстрирует трехмерные пластиковые модели, выполненные (Joe SLS-технологии на установке, разработанной тогда еще студентом Карлом Декардом (слева) (фото 1987 г.).

В SLS-технологии, также как и в SLA-технологии, применяется источник лазерного излучения, однако в качестве рабочего материала применяется не жидкий фотополимер, а мелкодисперсный сыпучий порошок легкоплавкого пластика (далее – пластиковый порошок).

Схема, описывающая процесс 3D-печати с помощью SLS-технологии показана на рис. 6, а ее суть заключается в следующем.

Начальный этап работы схемы аналогичен SLA-технологии. Точно также лазерный луч 4 проходит не по всему слою пластикового порошка 6, который подается в рабочую зону дозированно в небольшом количестве и тонким равномерным слоем с помощью выравнивающего валика 7, а попадает лишь на участки детали 5, которые подлежат запеканию, формируя, тем самым, одно из сечений будущей модели. Пластиковый порошок 6 поступает из специальных картриджей 8, размещенных на установке с двух сторон, с помощью воронки 9. Пластиковый порошок непосредственно в рабочей зоне нагревается практически до температуры плавления, а во избежание его воспламенения и окисления в рабочую камеру 10 подается защитный газ, в качестве которого, как правило, применяется азот. На следующем этапе мощный лазерный луч установки формирует на поверхности разрабатываемого объекта текущий слой толщиной около 50-100 мкм. Под тепловым воздействием лазерного луча предварительно разогретый пластиковый порошок нагревается уже выше температуры плавления и спекается.

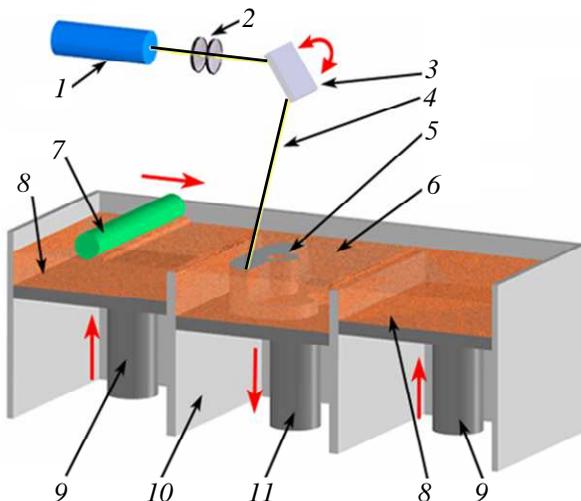


Рис. 6 – Схема процесса 3D-печати по SLS-технологии:

1 – лазер; 2 – фокусирующие линзы; 3 – вращающееся зеркало; 4 – лазерный луч; 5 – спечённая часть детали, обработанная лазером; 6 – пластиковый порошок; 7 – выравнивающий валик, подающий порошок в рабочую зону; 8 – емкости (картриджи) с пластиковым порошком; 9 – поршни подачи пластикового порошка из картриджей; 10 – рабочая камера с деталью; 11 – поршень, приводящий в движение платформу с установленной на ней деталью.

Затем мобильная платформа 10 с деталью 5 с помощью поршня 11 опускается на толщину одного слоя и в рабочую зону валиком 7 вновь поступает равномерный слой пластикового порошка 6 и операция повторяется снова.

Хотя наружная поверхность моделей, изготовленных по SLS-технологии, и получается несколько пористой, но все-таки лазерное спекание обеспечивает хорошее качество деталей наряду с их высокой механической прочностью. Лазерное спекание дает возможность "распечатывать" модели даже с подвижными частями (например, с петлевыми соединениями, кнопками и т.п.). В отличие от SLA-технологии, модели, "напечатанные" по SLS-технологии не нуждаются в поддерживающих структурах за счет заполнения свободного пространства порошком. Поскольку пластиковый порошок находится в рабочей камере при температуре чуть меньше температуры плавления, то энергия применяемой для спекания лазерной установки может быть существенно снижена (но все равно SLS-технология требует использования лазера большей мощности по сравнению с SLA-технологией). Есть у SLS-технологии и недостатки.

Установка для лазерного спекания достаточно сложная и дорогая (цена может достигать до 400 тыс. USD), а скорость 3D-печати невелика – составляет всего лишь несколько сантиметров (в высоту) в час (также необходимы временные затраты на нагревание установки и ее остывание). Также относительным недостатком технологии лазерного спекания является то, что в качестве материала моделей могут быть использованы лишь порошковые полимеры, литейный воск, нейлон и т.п.

Однако несколько лет назад по данному недостатку был нанесен первый удар в лице разновидности SLS-технологии – т.н. **DMLS-технологии** (direct metal laser sintering или "прямое лазерное спекание металла"), о которой нужно сказать несколько слов. Были успешно разработаны специальные материалы (металлические порошки с размером частиц порядка 20 мкм), позволяющие напрямую "распечатывать" детали из металла [11]! В качестве порошка были использованы микрочастицы стали, сверху покрытые слоем связующего пластика. Спекание пластика происходит как при SLS-технологии, только после "распечатанная" модель дополнительно обжигается в печи. При термообработке пластик выгорает, а освободившиеся пустоты заполняются бронзой. В результате получается деталь, состоящая на 60 % из стали и на 40 % из бронзы. Такой сплав по своим механическим характеристикам превосходит алюминий и приближается к нержавеющей стали. Таким образом, данная технология позволяет получать полноценные металлические детали практически любой формы. Кроме того, относительно недавно был успешно разработан аналогичный материал с керамической "сердцевинкой", из которого можно изготавливать модели, устойчивые к высоким температурам и агрессивным средам.

Следующая технология 3D-печати с использованием лазера называется **ламинирование** или послойное формирование моделей из листового материала (laminated object manufacturing или LOM-технология). Технология была разработана нашим соотечественником, одесситом Михаилом Фейгеном (Michael Feigin, рис. 7) [6, 12], выпускником механического факультета Московского технологического института пищевой промышленности, эмигрировавшим в 1978 г. в возрасте 25 лет в США. Он основал в 1985 г. компанию Helisys Inc., которая и занялась выпуском 3D-принтеров (рис. 7), работающих по LOM-технологии. Однако в 2000 г. из-за финансовых трудностей компания прекратила свое существование, а на теоретической основе разработанных ею технологий на сегодняшний день выпускает свое оборудование ее преемник – компания Cubic Technologies (США) [13] и ряд других производителей, например, компания Solido3D (США) [14].



Michael Feygin
Cubic Technologies



LOM-1015Plus



LOM-2030H

Рис. 7 – Основатель LOM-технологии Михаил Фейген с двумя ведущими моделями 3D-принтеров компании Cubic Technologies.

Схема, описывающая процесс 3D-печати с помощью LOM-технологии показана на рис. 8, а ее суть заключается в следующем.

Начальный этап работы схемы аналогичен рассмотренным выше технологиям. Отличием является то, что в LOM-технологии в качестве рабочего материала применяется не фотополимер, не порошок, а тончайшая пленка 9 (толщина от 76 до 254 мкм). В 3D-принтер (рис. 9), в зависимости от его модификации, предварительно загружаются либо тонкие листы пленки с нанесенным на поверхность клеящим покрытием, которое активизируется при нагреве, либо смотанный рулон пленки целиком 10 с дополнительными емкостями, в которых заправлено специальное клеящее вещество.

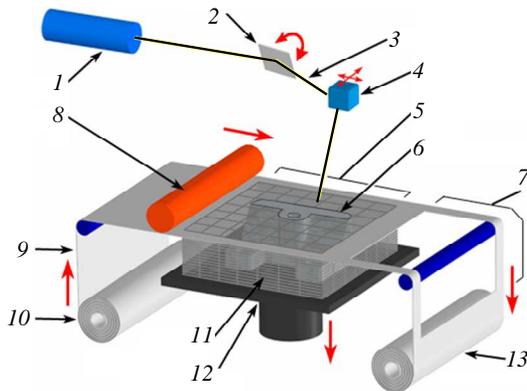


Рис. 8 – Схема процесса 3D-печати по LOM-технологии:

- 1 – лазер; 2 – вращающееся зеркало; 3 – лазерный луч; 4 – подвижная оптическая головка; 5 – текущий обрабатываемый слой (рабочая зона); 6 – обрабатываемый контур детали; 7 – предыдущий обработанный слой; 8 – мобильный нагревательный валик; 9 – тонкая пленка; 10 – картридж с рулоном пленки; 11 – слоистая структура детали и заготовки; 12 – мобильная платформа; 13 – отработанный рулон пленки после печати.

Пройдя через выравнивающие валики, слой пленки поступает в рабочую зону 5, где лазерным лучом 3 (либо механическим способом – режущим инструментом) вырезается как контур 6 детали, так и разрезается на отдельные фрагменты (сетка на рис. 8) текущий обрабатываемый слой. После резки по всей поверхности рабочей зоны перемещается валик 8, разогревая клеящее вещество и сдавливая текущий слой пленки с предыдущим, формируя тем самым, шаг за шагом, послойно склеенную трехмерную модель детали. Отходы пленки 13 в виде рулона с прорезанными обработанными слоями 7 сматываются на конечном этапе печати. Для послойного вертикального перемещения детали платформа 12 выполнена мобильной.

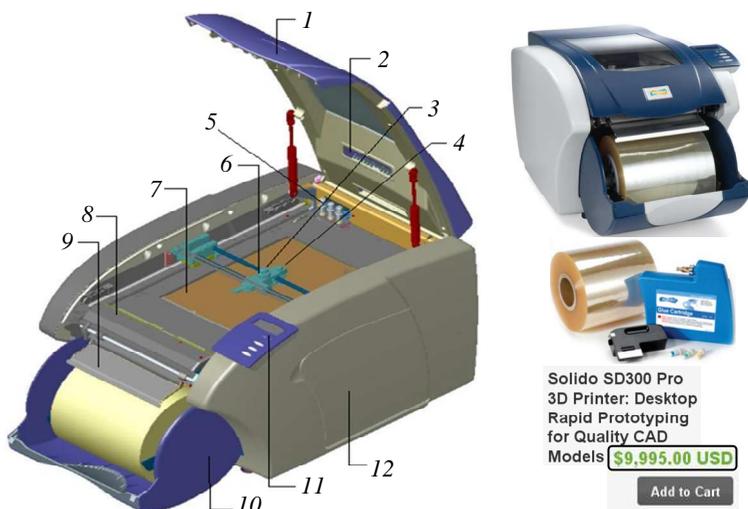


Рис. 9 – 3D-принтер SD300 Pro компании Solido3D [15], работающий по LOM-технологии:

1 – верхняя крышка; 2 – нагреватель, встроенный в верхнюю крышку; 3 – отрезной (cut) нож; 4 – обрезной (trim) нож; 5 – емкости с антиклеющим веществом (antiglue pen); 6 – координатная головка; 7 – рабочая платформа; 8 – блок разглаживания (ironing unit); 9 – устройство подачи пленки; 10 – крышка отсека для рулона пленки (8 кг); 11 – панель управления; 12 – крышка отсека для картриджа с клеящим веществом (glue cartridge).

В первых моделях 3D-принтеров, работающих по LOM-технологии, применялась специальная бумага с нанесенным слоем клеящего вещества. Теоретически, с помощью данной технологии можно нарезать и тонкий пластик, керамику и даже металлическую

фольгу. Так как в "распечатываемой" модели отсутствуют пустоты (они заполнены нарезанными "кубиками", см. рис. 8), LOM-технология также не нуждается в поддерживающих структурах, однако, процесс удаления лишнего материала с модели требует специального инструмента (рис. 10) и в ряде случаев, при сложных конструкциях деталей, может вызывать определенные затруднения.

Данная технология на первый взгляд выглядит неудобной в практическом применении, однако позволяет получать детали довольно сложной формы (рис. 11) даже в домашних условиях. Только вот цена... (рис. 9). Также процесс печати моделей по LOM-технологии занимает относительно длительное время (рис. 12) [16].

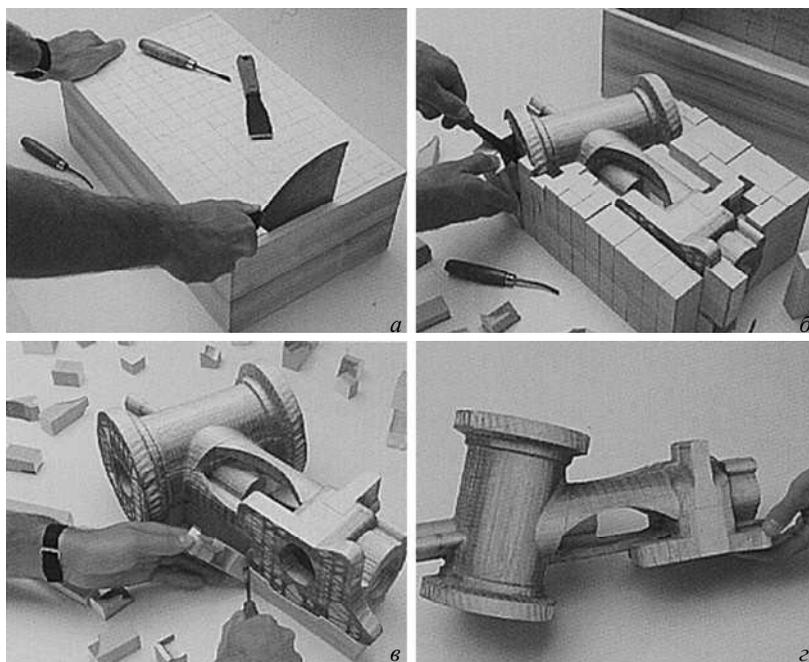


Рис. 10 – Процесс извлечения детали, выполненной по LOM-технологии: *а* – "распечатанный" блок снимается с платформы LOM-принтера; *б* – с модели снимается "опалубка" для освобождения "кубиков" нарезанного материала; *в* – "кубики" отделяются от поверхности модели с помощью специального инструмента; *г* – поверхность модели может быть дополнительно шлифована, отполирована или окрашена.

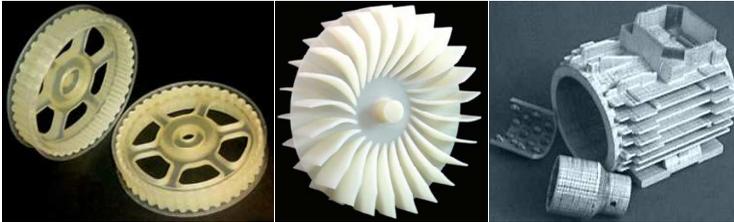


Рис. 11 – Пример деталей, выполненных по LOM-технологии.



Гидромотор
 Размеры: 310×215×225 мм
 LOM-принтер: 1015Plus
 Построение: 37 часов

Корпус двигателя
 Размеры: 787×610×280 мм
 LOM-принтер: 2030H
 Построение: 150 часов



Рис. 12 – Затраты времени для печати моделей по LOM-технологии.

LOM-технология, помимо создания прототипов деталей, применяется для 3D-печати моделей для последующего литья в землю, центробежного литья, литья в постоянные и гипсовые формы, создания оснастки для вакуумной формовки, отличаем которых является высокая точность (порядка 100 мкм). Поскольку ни во время печати, ни после затвердевания листовые заготовки не подвергаются ни физическим, ни химическим, ни фазовым изменениям, готовые модели не подвержены короблению, в них отсутствуют внутренние остаточные механические напряжения или другие деформации.

Среди недостатков LOM-технологии можно выделить такие.

Мощность лазера подлежит точной настройки, так как лазерный луч должен прорезать только текущий обрабатываемый слой и не проникать по глубине в ранее обработанные слои. Недостаточный контроль мощности лазерного луча может привести к искажению модели.

Изготовление моделей, содержащих тонкостенные элементы конструкции, затруднено по причине их невысокой механической прочности. При извлечении такой модели из блока (рис. 10) необходимо точно знать, где подобные элементы расположены во избежание их повреждения.

Относительно невысокая механическая прочность моделей, что связано с самим принципом LOM-технологии – по сути модели состо-

ят из склеенных между собой слоев пленки. Поэтому целостность модели полностью зависит от адгезионной прочности используемого клея, и возможны случаи, когда "распечатанные" модели могут не справиться с высокой механической нагрузкой, которая может потребоваться от прототипов при предварительных испытаниях.

Наиболее трудоемкой операцией LOM-технологии является процесс отделения модели от блока (рис. 10), который выполняется специальным инструментом и является трудоемким и довольно утомительным. Рабочий, выполняющий данную операцию, должен обладать определенными навыками и соблюдать осторожность при извлечении модели, чтобы не повредить ее.

Таким образом, рассмотрены три наиболее распространенных способа 3D-печати на основе лазерных технологий (SLA, SLS, LOM), которые в основном применяются в различных областях промышленности в виде довольно габаритных, дорогостоящих установок и не подходят для использования в качестве настольных принтеров для дома и офиса. Лишь LOM-технология реализована для "домашних" 3D-принтеров, однако их стоимость заставляет лишь развести руками... Но не стоит отчаиваться! Любой человек на Украине, имеющий в кармане 900 USD и больше, может приобрести компактный настольный 3D-принтер [17, 18], но работающий уже по *струйной технологии* 3D-печати. Как и в обычной двумерной печати, струйные 3D-принтеры пытаются не отставать от лазерных и в трехмерной области.

Самой распространенной струйной технологией 3D-печати является **моделирование методом наплавления** (fused deposition modeling или FDM-технология). Принцип данного способа 3D-печати был разработан в 1988 г. американским инженером Скоттом Крапом (S. Scott Crump, рис. 13) и запатентован им и его женой Лизой (Lisa H. Crump) в 1989 г.



Рис. 13 – Сооснователь FDM-технологии Скотт Крапп.

Идея FDM-технологии пришла в голову С. Крампу в 1988 г. при очень забавных обстоятельствах [19] – как любящий отец он решил сделать своими руками игрушечного лягушонка для своей младшей дочери с помощью обычного клеевого пистолета (glue gun), но "зарядив" его стержнем из смеси полиэтилена и свечного воска. Идея заключалась в постепенном наращивании и создании моделей слой за слоем. С. Крамп "загорелся" данной идеей: он придумал способ автоматизации процесса, посвятил бесчисленные выходные на усовершенствование конструкции, а также потратил 10000 USD на необходимое оборудование... Какая жена выдержит такую одержимость мужа? И Лиза Крамп поставила условие – либо превратить эту одержимость в бизнес, либо поставить точку на этой затее! Так поблагодарим же С. Крампа за то, что он выбрал первый вариант! Так в 1989 г. и появилась на свет компания Stratasys Inc. [20], основателями которой и стали Скотт и Лиза Крамп.

Схема, описывающая процесс 3D-печати с помощью FDM-технологии показана на рис. 14, а ее суть заключается в следующем.

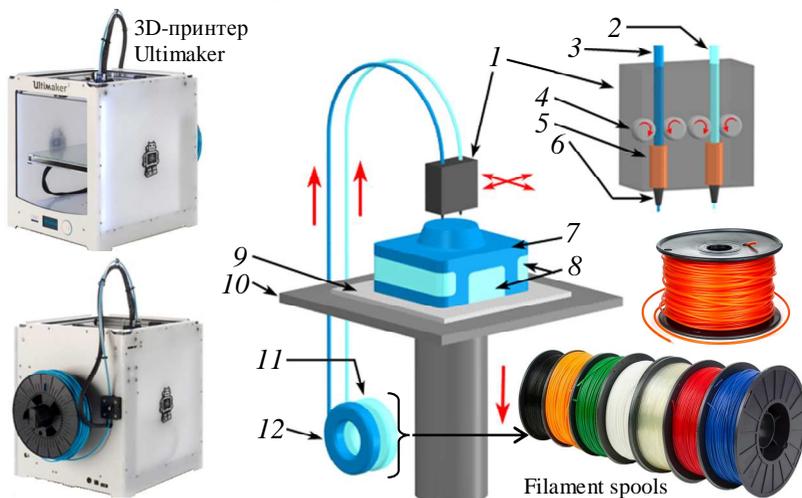


Рис. 14 – Схема процесса 3D-печати по FDM-технологии:

1 – экструзионная головка; 2 – полимерная нить (filament) для создания поддерживающих структур; 3 – полимерная нить для построения модели; 4 – вращающиеся приводные ролики; 5 – ожигители (liquefiers); 6 – сопла экструзионной головки; 7 – "тело" модели; 8 – элементы поддерживающих структур; 9 – пенопластовая подложка; 10 – мобильная платформа; 11 – бобина (filament spool) с полимерной нитью для создания поддерживающих структур; 12 – бобина с полимерной нитью для построения модели.

Материалом для 3D-печати по FDM-технологии в основном служат термопластики (акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полилактид (PLA) и другие), поставляемые в виде тонких (1,27; 1,75; 3 мм) нитей 2 и 3, смотанных в бобины 11 и 12, массой от 1 кг. В установках могут одновременно применяться несколько бобин (например, разных цветов) в зависимости от модели принтера, но, как правило, минимальное количество бобин равно двум – первая (поз. 12 на рис. 14) служит для построения модели, вторая же (поз. 11 на рис. 14) – для создания поддерживающих структур (см. рис. 4). Нити с бобин с помощью роликов 4 поступают в мобильную экструзионную головку 1, где нагревательные элементы ожигителей 5 разогревают их до полужидкого состояния. Через сопла экструзионной головки 6 полужидкий материал выдавливается тонкой (250-965 мкм, в зависимости от модели) струйкой на пенопластовую подложку 9, расположенную на мобильной платформе 10, имеющую возможность перемещаться в вертикальном направлении. Так как температура окружающего воздуха вблизи сопла намного меньше температуры плавления выходящего из экструзионной головки 6 материала, то он практически мгновенно затвердевает. Таким образом, перемещаясь в горизонтальной плоскости, экструзионная головка "печатает" текущий слой модели 7 и поддерживающих структур 8. Когда слой полностью завершен, платформа 10 опускается вниз на расстояние порядка 100-300 мкм (величина называется "толщина слоя" и может задаваться в принтере вручную) и процесс повторяется снова для следующего слоя.

FDM-технология обладает целым рядом преимуществ: во-первых, данная технология дает возможность получать модели сразу же из нужного материала – различных видов пластика. Исследования показали [6], что пластиковые детали, полученные на 3D-принтере по FDM-технологии, по своим механическим характеристикам на 85 % соответствуют механическим характеристикам деталей, полученных традиционным способом – литьем. Во-вторых, FDM-технология является практически безотходной – дополнительный расход материала необходим лишь для создания поддерживающих структур. Следует отметить, что компанией Stratasys для деталей, полученных по "своей" FDM-технологии, был разработан специальный способ по быстрому и "безболезненному" удалению поддерживающих структур. Это уже не медленный, ручной, как для LOM-технологии, способ удаления, а полностью автоматизированный процесс – WaterWorks Soluble Support System [21]). Он протекает в специальных очистительных станциях (CleanStation [22], рис. 15), в которых за счет циркуляции теплой воды

с небольшим содержанием специального моющего раствора (также возможно дополнительное использование ультразвуковых колебаний) происходит растворение материала поддерживающих структур без нарушения целостности самой модели. В-третьих, материал для 3D-печати по FDM-технологии поставляется в удобном технологичном виде – бобиных, которые довольно просты и легки как в применении, так и в замене на новые.



Рис. 15 – Очистительные станции для удаления поддерживающих структур.

Среди недостатков FDM-технологии следует отметить такие.

Невысокая точность моделей, что связано с формой используемого "печатающего" материала – нить, диаметром 1,27 мм и более.

Относительно невысокая скорость печати, вызванная вязкостью материала и ограниченной скоростью его выхода из экструзионной головки, необходимостью заполнить всю площадь поперечного сечения каждого слоя материалами модели и поддерживающих структур.

Усадка материала, связанная с сутью FDM-технологии – быстрое охлаждение выдавленного из экструзионной головки материала. Это обуславливает также возникновение в модели напряжений. Усадка и напряжение могут вызвать "перекос", искажение модели. Это явление нередко встречается у моделей, напечатанных по FDM-технологии, и его, как правило, проблематично спрогнозировать и устранить. Лишь приобретя определенные навыки и опыт, удастся избежать подобных искажений, варьируя параметры процесса печати.

Но, несмотря на все недостатки, именно FDM-технология получила самое широкое распространение в бытовых 3D-принтерах. Одна-

ко деловая жилка четы Крамп проявилась и в том, что кроме получения патента на сам принцип печати по FDM-технологии, была также защищена и сама аббревиатура "FDM", являющаяся запатентованной торговой маркой компании Stratasys. В результате, обладая, по сути дела, монопольным правом на 3D-печать данным способом, цена принтеров компании Stratasys, а также необходимых расходных материалов, продолжает держаться на довольно высоком уровне.

Дабы законным путем "обойти" патент и иметь возможность выпускать 3D-принтеры по "схожей" технологии, но за меньшую цену, в марте 2005 г. на базе университета в английском городе Бат (University of Bath) был создан проект RepRap [23, 24] (от англ. – Replicating Rapid Prototyper), который возглавил преподаватель механического факультета этого университета, математик Эдриан Боуер (Adrian Bowyer). Цель проекта RepRap – разработка и предоставление на свободное, всеобщее обозрение конструкций дешевых устройств для быстрого прототипирования, которые были бы доступны не только для людей в развитых, но и в развивающихся странах, на что уже летом 2005 г. было получено финансирование от Совета по инженерным и естественнонаучным исследованиям Великобритании (остается лишь позавидовать оперативности решения финансовых вопросов – неужели у них нет Казначейства?!). Члены проекта RepRap решили ввести собственный термин, описывающий технологию, по которой работают разрабатываемые ими 3D-принтеры – **моделирование плавленной нитью** (fused filament fabrication или FFF-технология). По своей сути и принципу FFF-технология – это та же описанная выше FDM-технология, но позволяющая решить юридические стороны вопроса. Уже 13 сентября 2006 г. на суд общественности был представлен первый прототип RepRap 0.2, успешно напечатавший первую собственную деталь. На сегодняшний день проект RepRap представлен тремя 3D-принтерами [24], в т.ч. и одной моделью, позволяющей печатать в цвете (рис. 16).

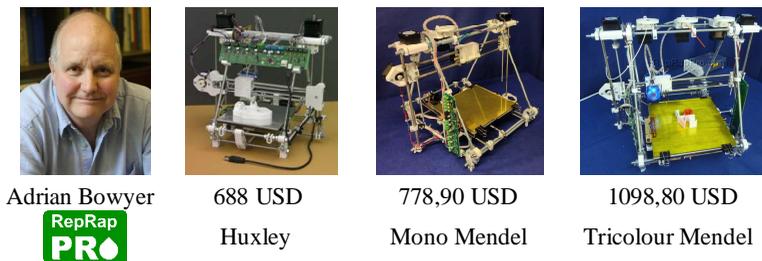


Рис. 16 – Основатель проекта RepRap Эдриан Боуер с линейкой 3D-принтеров, печатающих по FFF-технологии.

Для сравнения, самый дешевый "бюджетный" 3D-принтер серии Mojo (рис. 17) компании Stratasys, печатающий по FDM-технологии, в комплекте с программным обеспечением, набором материалов, системой очистки от поддерживающих структур WaveWash (аналог описанной ранее системы WaterWorks) самим производителем рекомендовано продавать по розничной цене 9900 USD, что на целых 8401 USD (!!!) дороже, чем в среднем все существующие марки настольных 3D-принтеров [25]! Ох уж эта чета Крамп!



Рис. 17 – "Бюджетный" комплект с 3D-принтером Mojo компании Stratasys.

В 2012 г. проведен социологический опрос [26], касающийся использования 3D-принтеров, одним из вопросов которого был следующий: "3D-принтером какого производства Вы пользуетесь?". Результаты опроса показаны на рис. 18.

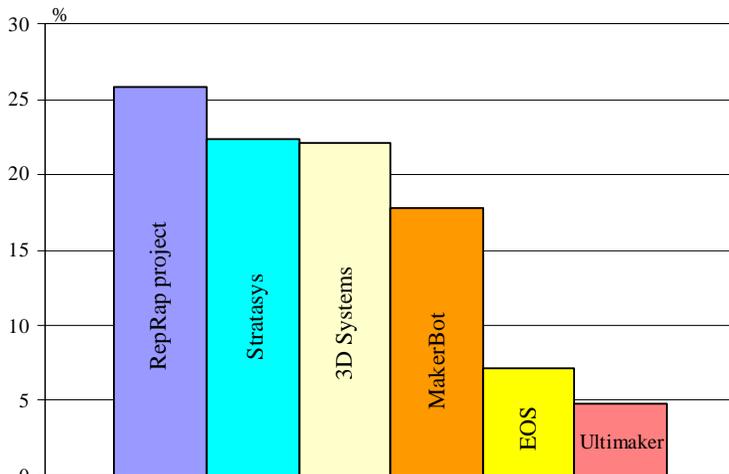


Рис. 18 – Результаты соцопроса по вопросу выбора производителя 3D-принтеров.

Здесь нужно учесть, что, компании Stratasys принадлежат 3D-принтеры таких торговых марок, как Objet и Dimension, а компании 3D Systems – Z Corporation и Bits from Bytes. Необходимо также отметить положительную тенденцию, которая наметилась за последние годы. В среде небольших групп людей, как правило, друзей, выпускников одного института, объединенных общим увлечением – быстрым прототипированием – зарождаются вначале "кружки", в которых просто ради интересного времяпровождения, методом проб и ошибок проектируются свои собственные конструкции 3D-принтеров, которые в случае упорной работы, терпения, настойчивости, ну и удачи, конечно же, могут составить (и таки составляют!) реальную конкуренцию крупным компаниям на рынке технологий быстрого прототипирования. Такими примерами могут послужить упомянутые на рис. 18 компании MakerBot (США) [27] и Ultimaker (Нидерланды) [28], причем некоторые из основателей этих компаний (рис. 19, 20) в свое время были питомцами Эдриана Боуiera и участниками проекта RepRap.



Рис. 19 – Основатели компании MakerBot (слева направо) со своим "детищем": Adam Mayer, Zach Smith и Bre Pettis.



Рис. 20 – Основатели компании Ultimaker (слева направо) со своим "детищем": Siert Wijnia, Martijn Elserman и Erik de Bruijn.

Интересно, что в июне 2013 г. чета Крамп "добралась" и до компании MakerBot – было объявлено [29] о ее приобретении компанией Stratasys за 403 млн USD! Отныне компания MakerBot является дочерней компанией Stratasys, акцентирующей на выпуске "домашних" настольных 3D-принтеров для широкого круга потребителей, а сама компания Stratasys – безусловным мировым лидером на рынке технологий для быстрого прототипирования. А ведь все начиналось с безобидного детского игрушечного лягушонка для младшей дочери...

В заключение хотелось бы привести несколько примеров использования 3D-принтеров в социальных проектах и направлениях, при виде которых на глаза просто наворачиваются слезы, и которые подтверждают, что все в нашей жизни возможно и настоящие чудеса случаются (рис. 21) [27, 30, 31] – достаточно просто взглянуть на счастливые лица и улыбки ребят!!!



Рис. 21 – 3D-печать – шанс на нормальную жизнь.

Выводы.

1. Рассмотрен чрезвычайно актуальный для машиностроительной области Украины вопрос, касающийся существующих на сегодняшний день на мировом рынке основных технологий по быстрому прототипированию сложных трехмерных объектов.

2. Подробно проанализированы принципы 3D-печати по SLA, SLS, LOM и FDM технологиям, рассмотрены их особенности применения, исторические факты возникновения и развития, технологические возможности и ограничения, преимущества и недостатки.

3. Показана перспективность и полезность от применения технологий по быстрому прототипированию как в учебном процессе, так и в научно-исследовательских целях.

Список литературы: 1. Электронный ресурс / Режим доступа: pw.utc.com/Home. 2. Афанасьев К. 3D-принтеры [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.3dnews.ru/160001. 3. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок, Л.И. Пупань, В.А. Фадеев; под ред. А.И. Грабченко. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2011. – 416 с. 4. Todd Grimm. User's Guide to Rapid Prototyping. – Society of Manufacturing Engineers (US), 2004. – 404 p. 5. Hague R.J.M., Reeves P.E. Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing. – iSmithers Rapra Publishing, 2000. – 118 p. 6. Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. Second Edition. – World Scientific Publishing, 2003. – 420 p. 7. Электронный ресурс / Режим доступа: stratasys.com/3d-printers/technology/polyjet-technology. 8. Принцип действия трёхмерной печати. Зрительное восприятие, инновации и технологии: составляющие процесса струйной трёхмерной печати. Электронный ресурс / Режим доступа: zcorp.com/documents/821_3D%20Printing%20White%20Paper%202009%20HiRes_RU.pdf. 9. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dsystems.com. 10. Электронный ресурс / Режим доступа: me.utexas.edu/news/2012/0612_selective_laser_sintering.php. 11. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dsystems.com/3d-printers/production/phenix-rx1#.urpxudfppkqr. 12. Электронный ресурс / Режим доступа: plus.google.com/104304548478539727387/about. 13. Электронный ресурс / Режим доступа: cubictechnologies.com/Helisys.htm. 14. Электронный ресурс / Режим доступа: solido3d.com. 15. Электронный ресурс / Режим доступа: mcad-cafe.com/PDFs/MCADCafe_SolidoReview_090209_Final_web.pdf. 16. Электронный ресурс / Режим доступа: portal.tpu.ru:7777/SHARED/k/KSO/Files/TomskCAD/LOM/LOM.htm. 17. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dprinter.org.ua/products/3d-printers/?orderby=price. 18. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dfactory.com.ua/3d-printer-up-mini. 19. Электронный ресурс / Режим доступа: fundinguniverse.com/company-histories/stratasys-inc-history. 20. Электронный

ресурс / Режим доступа: www.stratasys.com/3d-printers/technology/fdm-technology. 21. Электронный ресурс / Режим доступа: solver.ru/engl/preproduct/stratasys.htm. 22. Электронный ресурс / Режим доступа: cleanstation-srs.com. 23. Электронный ресурс / Режим доступа: reprap.org/wiki/RepRap. 24. Электронный ресурс / Режим доступа: reprappro.com. 25. Электронный ресурс / Режим доступа: desktop-3d-printers.findthebest.com/q/28/12373/How-much-is-the-Stratasys-Mojo-3D-printer. 26. Электронный ресурс / Режим доступа: surveys.peerproduction.net/2012/05/manufacturing-in-motion. 27. Электронный ресурс / Режим доступа: makerbot.com. 28. Электронный ресурс / Режим доступа: ultimaker.com. 29. Электронный ресурс / Режим доступа: techcrunch.com/2013/06/19. 30. Отец распечатал на 3D-принтере протез для сына. 05 ноября 2013. [Электронный ресурс] / Режим доступа: podrobnosti.ua/video/cybernetics/2013/11/05/940420.html. 31. Электронный ресурс / Режим доступа: robohand.blogspot.com.

Поступила в редколлегию 03.12.2013

УДК 67.05

Технологии быстрого прототипирования – от детской игрушки до мирового господства / Гречко А.М. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 65 (1038). – С. 3-25. Бібліогр.: 31 назв.

У статті проведено аналітичний огляд однієї з найбільш перспективних на сьогоднішній день технологій у машинобудуванні – швидке прототипування складних тривимірних моделей.

Ключові слова: 3D-технологія, швидке прототипування, 3D-друк, технологія машинобудування.

The article provides an analytical overview of one of the most advanced to date technologies in mechanical engineering – rapid prototyping of complex three-dimensional models.

Keywords: 3D-technology, rapid prototyping, RP-technology, mechanical engineering.



Гречко Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических аппаратов НТУ "ХПИ". Защитил диссертацию кандидата технических наук в 2009 г. в НТУ "ХПИ" по специальности "Электрические машины и аппараты". Научные интересы связаны с проблемой усовершенствования электромагнитных механизмов электрических аппаратов, новыми технологиями в машиностроении.