

## ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что качественные теплозащитные покрытия необходимо формировать из материалов с равномерными химическим и фазовым составами по сечению исходных порошков, с максимальным количеством тетрагональной фазы и минимальным размером зерна фазовых включений, минимальным содержанием межкристаллитной влаги, со строго определенным размером и морфологией частиц исходного порошка.

Проведена оптимизация режимов получения материала на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом церия, для получения в порошке максимального содержания тетрагональной фазы. Покрытия, полученные из порошков  $ZrO_2 - 25 \text{ мас. \% } CeO_2$ , изготовленных по предлагаемому авторами способу, выдерживают в 1,5 раза больше циклов нагрева-охлаждения, чем покрытие, полученное из порошка оксида циркония, стабилизированного оксидом иттербия. Предложенный способ позволяет повысить стойкость покрытия к термоциклированию при температурах, превышающих  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ , что приводит к более длительной защите подложки от воздействий высоких температур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стернс, К. А. Теплозащитные покрытия / К. А. Стернс // Аэрокосмическая техника. – 1997. – № 10. – С. 144–164.
2. Ильющенко, А. Ф. Плазменные покрытия на основе керамических материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Беспринт, 2006. – 316 с.
3. Phane, L. Plasma-sprayed ceramic thermal barrier coatings for Turbine vane platforms / L. Phane // Thin Solid Films. – 1990. – P. 455–461.
4. Оковитый, В. А. Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия. – 1998. – Вып. 21. – С. 101–105.
5. Способ получения керамических порошков: а. с. 1736119 СССР, МКИ<sup>4</sup> C04 B35/48 / С. Б. Соболевский, А. А. Верстак, В. А. Оковитый; ГНУ «Ин-т порошковой металлургии». – № 4818348; заявл. 23.04.1990; опубл. 07.02.1991.
6. Способ получения копозиционного керамического материала: пат. № 13690 Респ. Беларусь МПК C04B 35/10 / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый; заявитель и патентообладатель – БНТУ. – № а 20090464; заявл. 30.03.2009 // Бюл. – 2010. – № 5.
7. А. с. СССР № 1316413, C04B41/50, 1987.
8. Оковитый, В. А. Влияние технологических параметров керамического слоя теплозащитного покрытия на стойкость к термоциклированию / В. А. Оковитый // Порошковая металлургия. – 1998. – Вып. 21. – С. 101–105.
9. Способ получения керамического порошка: пат. № 13736 Респ. Беларусь, МПК C04B 35/48 / В. А. Оковитый, С. Б. Соболевский, Ф. И. Пантелеенко, А. И. Шевцов, В. В. Оковитый; заявитель – ГНУ «Ин-т порошковой металлургии». – № а 20090431; заявл. 24.03.2009; опубл. 30.10.10 // Афiцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4.

Поступила 21.01.2013

УДК 621.7

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

(Часть 2)

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»

**Примеры использования технологий быстрого прототипирования в промышленности.** Если при изготовлении деталей посредством

механообработки один универсальный инструмент (резец, фреза, сверло) позволяет получить множество разных деталей практически произ-

вольной формы, то при литье, штамповке и в определенной мере ковке ситуация с точностью наоборот. Для получения единичной детали требуется специализированный уникальный инструмент – пресс-форма, штамп, ручей и т. д. Стоимость такого инструмента (технологической оснастки) часто в 10–1000000 раз превышает стоимость производимой детали. Ситуация усугубляется тем, что первый, а часто и второй, и третий варианты оснастки могут использоваться не для производства, а только для доводки проектируемого изделия. В результате штамп стоимостью в десятки, а то и сотни тысяч долларов может произвести одну-две экспериментальные детали, в лучшем случае – опытную партию, а в дальнейшем отправляется на склад. Стоимость этой промежуточной оснастки ложится на итоговую стоимость изделия.

Еще в большей степени на конкурентоспособность будущего изделия влияют сроки изготовления оснастки. В среднем по отрасли время изготовления, например сложной пресс-формы, колеблется от 9 до 12 недель (на предприятиях, активно использующих сквозные CAD/CAM/CAE-системы и современные технологии механообработки). Использование технологий, более традиционных для отечественной промышленности, приводит к тому, что на изготовление опытных образцов таких деталей, как блок цилиндров ДВС, может потребоваться 8–10 месяцев (включая литье и последующую механообработку).

Еще одной актуальной проблемой является получение малых партий литых или штампованных деталей. Но при использовании традиционных технологий стоимость и время технологической подготовки к выпуску такого изделия достигают совершенно неприемлемых величин. Стремление ускорить и, по возможности, автоматизировать процесс создания технологической оснастки привело к идее использования технологии быстрого прототипирования для изготовления либо непосредственно самого инструмента (матрицы или штампа), либо промежуточных средств для его производства. Такой подход носит название Rapid Tooling (быстрое изготовление инструмента или «быстрый инструмент»). Можно выделить три прин-

ципальных подхода в технологии быстрого прототипирования в процессе изготовления инструмента:

- прямое использование (direct tooling) – технологическая оснастка создается непосредственно в установке быстрого прототипирования;
- не прямое использование (indirect tooling) – создается прототип, и уже его применяют для выполнения формообразующих поверхностей собственно технологической оснастки;
- производство без инструмента (toolless manufacturing) – конечное изделие создается непосредственно в установке для быстрого прототипирования.

Рассмотрим примеры использования средств быстрого прототипирования при производстве литых деталей [1].

Варианты более традиционного, т. е. непрямого использования технологий быстрого прототипирования для промышленного производства, приведены на рис. 1. Например, если необходимо получить уникальную литую деталь (рис. 1а), то достаточно выполнить прототип этой детали из парафина, литьевого воска или другого легкоплавкого материала. Затем на восковую модель наносится керамическая оболочка. В это оболочку заливается расплавленный металл, при этом восковая модель выгорает и формируется готовая литая деталь (рис. 2).

Если методом литья по выплавляемым моделям необходимо получить небольшую партию деталей, то первым шагом выполняется прототип из любого материала (рис. 1б). Прототип заливается силиконом (рис. 3). После застывания образуется эластичная форма (так называемая soft tooling), которая разрезается на две половинки. В получившуюся разъемную форму заливают литейный воск. Форму можно использовать многократно. Обычно такой способ применяют для получения 20–50 образцов для литья по выплавляемой модели.

Аналогичным образом создают эластичную форму для литья в нее более износостойких материалов, например полиуретана (рис. 1в). Получившуюся прочную мастер-деталь можно многократно использовать как модель для литья в песок.

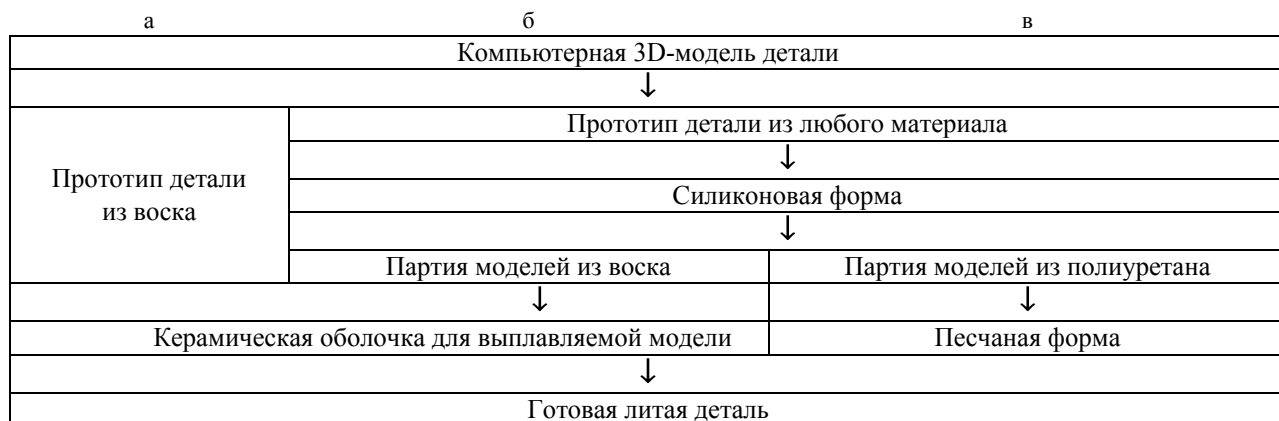


Рис. 1. Схемы технологий непрямого изготовления литых деталей из металла



Рис. 2. Основные этапы литья по выплавляемой модели-прототипу



Рис. 3. Схема подготовки партии восковых моделей с использованием силиконовых форм

Еще одним способом получения пресс-форм для литья пластмасс является использование метода электродугового напыления. С помощью специального пистолета на прототип напыляют тонкий (1–2 мм) слой специального сплава. Затем эту достаточно прочную металлическую оболочку помещают в разъемную форму и для повышения жесткости заливают эпоксидной смолой с наполнителем. Получившаяся металлическая форма пригодна для литья под давлением, раздува, вакуумной формовки и т. д. Такая технология позволяет получать уже до 50000 деталей с одной формы.

Рассмотренные примеры «быстрого литья» подобны традиционным технологиям в том, что первым шагом процесса является создание мастер-детали. Но при компьютерном проектировании нетрудно сразу создать геометрическую модель пресс-формы. Возникает вопрос: зачем, собственно, нужна деталь, если на самом деле необходима только формообразующая поверхность пресс-формы? В этом случае на установке быстрого прототипирования выращивается не деталь, а непосредственно части пресс-формы для ее изготовления. Варианты прямого использования технологий быстрого прототипирования

для изготовления инструмента приведены на рис. 4. Пресс-формы, выполненные из керамического порошка, и отлитые с их помощью детали из алюминиевого сплава, показаны на рис. 5. Данный подход относится к технологиям «производства без инструмента». Дополнительным преимуществом такого решения является возможность создания пресс-формы со сколь угодно сложной поверхностью разъема.

В качестве материала формы можно также использовать подходящий металлический порошок. В этом случае получается металлическая форма, которую для прочности и снижения пористости пропитывают расплавом бронзы.

Не всегда удается подобрать смесь порошков, пригодную для изготовления высокопрочной формы, используемой для массового производства литых деталей. В этом случае посту-

пают таким образом: создают прототип формы по любой технологии быстрого прототипирования и, используя его как образец, делают форму из силикона. Силиконовая форма заполняется смесью порошков стали, карбида вольфрама и полимера. Полимер выступает в роли связующего компонента смеси порошков. Затем полученный «сырец» спекается или помещается в расплав бронзы. Благодаря капиллярным силам расплавленная бронза проникает в поры порошковой формы, попутно выжигая полимер. В результате образуется монолитная матрица для литья. Одна пресс-форма, выполненная по описанной технологии, позволяет выпустить до 1000000 литых деталей. Нетрудно заметить, что по приведенной выше технологии можно изготовить партию деталей методами порошковой металлургии.



Рис. 4. Схемы использования технологий быстрого прототипирования при изготовлении форм для литья деталей из металла

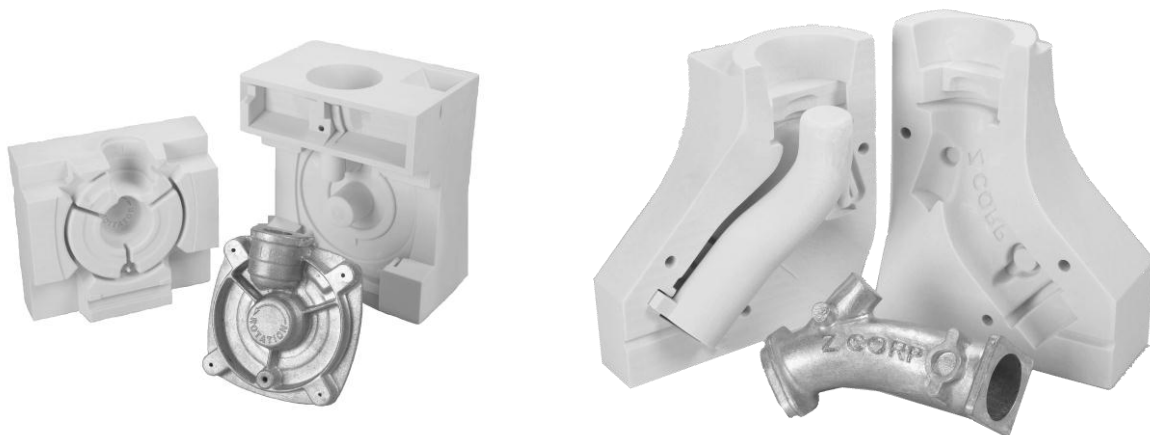


Рис. 5. Выращенные керамические формы для литья и готовые детали

Частным случаем использования методов быстрого прототипирования в изготовлении инструмента является послойное выращивание электродов для электроэрозионной обработки пресс-форм или штампов. Такой электрод выполняется из электропроводящего материала (например, из меди или графита) и может иметь достаточно сложную форму.

Технологии быстрого прототипирования возможно использовать для быстрого изготовления штампованных деталей (рис. 6). Первым шагом создается мастер-модель изготавливаемой детали одним из методов быстрого прототипирования. Затем модель заливается специальным сплавом (например, МСР 137) с температурой плавления 145 °С (рис. 6а). Для прочности в отливку могут быть установлены стальные вставки (на рис. 6 показаны как Т-образные контуры). На полученную отливку наносится листовой воск, толщина которого равна толщине штампуемого листового материала (рис. 6б). После этого отливаются ответная часть (пуансон) и прижимы листа (рис. 6в). Готовые матрицу и пуансон собирают вместе с тем, чтобы образовался штамп в сборе (рис. 6г). Время изготовления такого штампа – менее 48 ч. Несмотря на внешнюю легковесность технологии, подобный легкоплавкий штамп в состоянии произвести до 2000 деталей из алюминиевого или стального листа.

Единичное изделие или небольшую партию деталей можно вырастить также непосредствен-

но на установке для быстрого прототипирования. В качестве «строительного материала» используют ABS-пластики, стальные и титановые сплавы и т. д. Производство запасных частей по таким технологиям все чаще применяется в армии и флоте США, их давно использует НАСА, в том числе при подготовке полета на Марс.

Эти примеры лишь в самой малой степени показывают возможности аддитивного производства. По словам научного руководителя Центра аддитивных технологий ФГУП «НАМИ» М. Зленко, «эти технологии позволяют сделать невозможное, построить, синтезировать или отлить то, что невозможно в принципе сделать традиционными технологиями... В ходе их использования происходит интеллектуализация производственного процесса, замещение «пролетарской» составляющей производства на интеллектуальную деятельность инженера-конструктора-технолога» [2].

**Направления развития RP-технологий в мире.** На Западе распространяется мнение, что в настоящее время начинается вторая промышленная революция и технологии быстрого изготовления являются ее первыми ласточками. По мнению Larry Rhoades, культовой фигуры в области быстрого изготовления, «эта революция позволит людям жить там, где они хотят, и производить все потребное им прямо на месте. Люди будут покупать модели, но не готовые изделия» [3].

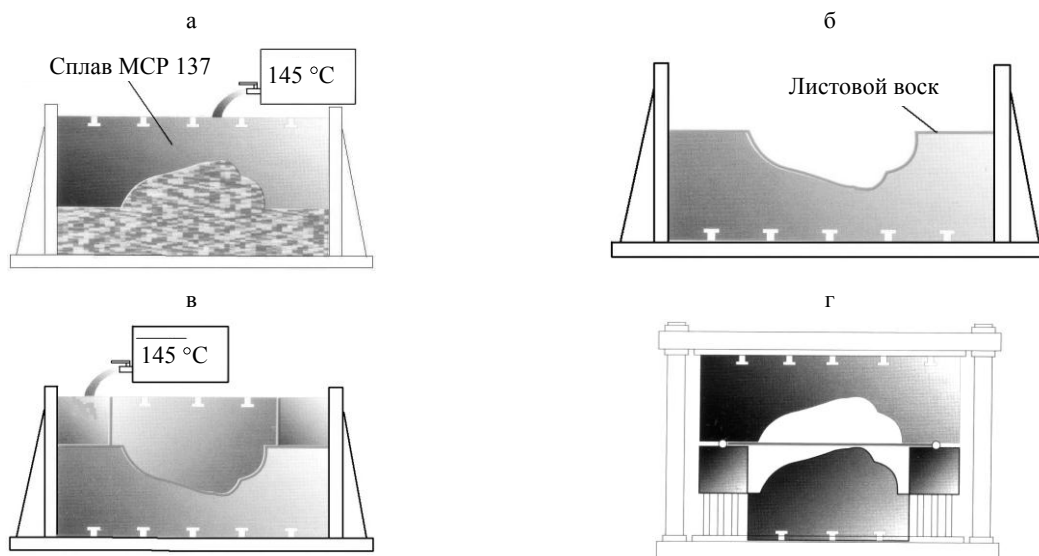


Рис. 6. Технология «быстрой штамповки»

Более того, по некоторым признакам, в настоящее время на Западе разворачивается пиар-кампания технологий быстрого прототипирования. Для этого используются как традиционные средства социальной рекламы (научно-популярные и художественные фильмы, ток-шоу, статьи в СМИ и т. д.), так и такой, например, продукт, как прозрачный 3D-принтер для детского сада (рис. 7). Можно предположить, что стратегическая цель этой кампании – внедрить в массовое сознание представление о естественности ситуации, когда нужная вещь выбирается из глобальной базы данных и изготавливается в сервис-центре на соседней улице или даже в своем гараже одним нажатием на кнопку.



Рис. 7. 3D-принтер для детского сада

Такие ожидания становятся более понятными, если учесть географию распространения технологий быстрого прототипирования [3, 4]. Более 40 % подобных установок находятся в США и Канаде, примерно 24 % – в странах ЕС, 16 % – в Японии, Южной Корее и на Тайване. Таким образом, более 70 % установок сосредоточены всего в шести странах, но зато самых технологически развитых: США, Германии, Великобритании, Франции, Японии, Италии.

Для сравнения: Российская Федерация имеет чуть более 1 % от мирового числа установок для быстрого прототипирования. Причем, по мнению эксперта [2], из 30–40 установок,

закупаемых в год, только 10 % предназначены для целей «быстрого изготовления», и лишь половина из них находится в рабочем состоянии (исправны, снабжены сырьем и т. д.). В какой-то мере эти цифры объясняют, почему в странах СНГ технологии быстрого изготовления все еще остаются своеобразной экзотикой. В этом контексте следует отметить, что Китай на сегодня владеет чуть менее 8 % от мирового числа установок для быстрого прототипирования. При этом он продолжает покупать сотни установок, не считая того, что и сам производит порядка 600 единиц такого оборудования в год.

Основные области применения технологий быстрого изготовления можно оценить по следующим данным. Из общего объема изделий, производимых с использованием технологий быстрого прототипирования, модели для литья металлов занимают 8,1 %, компоненты оснастки – 6,9 %, а непосредственное выращивание функциональных деталей – 8,2 % [3, 4]. Для сравнения: для задач визуализации новых конструкций, в том числе создания функциональных моделей деталей и узлов, используется около 55 % выпускаемых прототипов. Остальное – модели для презентаций, эргономических исследований и т. д.

Полезно также оценить распространенность технологий быстрого прототипирования по отраслям промышленности. Такой анализ позволит выделить достаточно динамично развивающиеся и, таким образом, наиболее перспективные направления, в том числе и для отечественной промышленности. Довольно широко эти технологии используются при производстве потребительских товаров и электроники (механические компоненты) – 28 %, в автомобильной промышленности – 20 % и в аэрокосмическом и индустриальном машиностроении – 15 % [3]. Следует отметить необычно высокую долю медицины – 13 %, где в последние годы наблюдается буквально взрывной рост производства индивидуальных протезов и имплантатов по аддитивным технологиям.

В образовании используется более 10 % всех установленных машин для быстрого прототипирования, что для непроизводственной

сферы очень много. По мнению И. Н. Шиганова, директора НИИ конструкционных материалов и технологических процессов МГТУ им. Н. Э. Баумана [2], такой интерес вызван тем, что при использовании этих технологий в учебном процессе меняется стиль мышления конструкторов. Часто конструктор отказывается от деталей очень сложной формы, поскольку понимает проблемы, возникающие при их изготовлении. Если же конструктор знает о возможностях технологий быстрого прототипирования, умеет их применять на практике, то он становится свободнее в своем творчестве и получает возможность разрабатывать изделия действительно с уникальными возможностями.

Согласно данным Wohlers Associates [3] – одного из самых авторитетных аналитических агентств в области высоких технологий – в настоящее время рынок технологий быстрого прототипирования составляет около 1,5 млрд дол. и быстро развивается. В частности, среднегодовой рост в этой отрасли за последние 23 года составил 26,2 %. Хотя в 2009 г. вследствие глобального экономического кризиса произошел спад на 9,7 %, но уже в 2010-м стоимость товаров и услуг в области быстрого прототипирования вновь возросла на 24,1 %. Предполагается, что этот рынок вырастет до 3,1 млрд дол. к 2016 г. и до 5,2 млрд дол. – к 2020-му.

По результатам опроса компаний, уже использующих технологии быстрого прототипирования, в настоящее время доля продукции, изготавливаемой с применением этих технологий, составляет 15,6 %. Предполагается, что эта доля возрастет до 35,9 % к 2013 г. и до 50,5 % – к 2018-му. Следует отметить, что эти прогнозы отражают мнение в первую очередь владельцев небольших предприятий.

**Состояние и направления развития RP-технологий в Республике Беларусь.** Определенный опыт использования технологий быстрого прототипирования есть и в Республике Беларусь. Некоторые предприятия, среди которых такие мощные, как «Атлант», «Горизонт», «Пеленг», имеют установки для быстрого прототипирования. Правда, используют их в основном для изготовления именно прототипов, инженерных или косметических, но не для произ-

водства. Тем не менее как минимум одно белорусское предприятие [5] вот уже почти 20 лет целиком сосредоточено на производстве с использованием технологий быстрого изготовления. В качестве примера его деятельности можно привести формы для литья выплавляемых моделей турбинных лопаток, впускных коллекторов автомобильного двигателя, формы для литья опытных пластиковых деталей бытовой техники, волноводы, титановые протезы и многое другое. Для оценки сроков производства можно привести пример изготовления алюминиевой обрезиненной рукоятки (штурвала) для перспективного российского истребителя, которая была выполнена от электронной модели до готового функционального изделия за двое суток.

Что сдерживает широкое использование технологий аддитивного производства? В первую очередь, цена оборудования для промышленного производства. Если для изготовления дизайнерского прототипа часто достаточно 3D-принтера ценой до 10000–20000 дол., то для промышленного производства, например точных восковых отливок, желательна машина на порядок дороже. Стоимость установок для выращивания функциональных крупных деталей из титана или жаропрочных сталей может достигать многих сотен тысяч евро. При этом, с одной стороны, срочное изготовление даже одной «невозможной» детали для ремонта поврежденной АЭС может окупить такую установку. С другой стороны, для разумных сроков окупаемости и получения устойчивой прибыли оборудование такой стоимости должно быть загружено 24 ч семь дней в неделю. Даже самый крупный отечественный завод пока еще не нуждается в выпуске уникальных изделий с такой интенсивностью. Помимо финансовых вопросов, на темпы развития аддитивного производства влияет дефицит кадров. Для полноценной загрузки и обслуживания промышленных аддитивных установок требуются квалифицированные специалисты. Пока их буквально единицы, даже на Западе. И, наконец, у руководителей предприятий действует фактор психологической инерции и определенной настороженности (нередко оправданной) к технологическим инновациям. Первопричиной та-

кой позиции являются трудности определения степени риска при внедрении новых технологий и неопределенность их экономической эффективности.

Какие конкретные шаги по внедрению технологий аддитивного производства в отечественное машиностроение целесообразно предпринять прямо сейчас? Для ответа на этот вопрос может оказаться полезен опыт стран, дольше идущих по этому пути. В частности, для системной подготовки к ускоренному развитию этих технологий производители и разработчики аддитивного оборудования на период до 2018 г. предлагают следующий комплекс мероприятий [6]:

1) разработка новых и адаптация существующих стандартов, включающих единообразие терминологии. С этой целью в 2009 г. было инициировано создание официального международного комитета по стандартам в области быстрого прототипирования (ASTM International);

2) разработка единых методик тестирования процессов, материалов и самих установок для быстрого прототипирования;

3) разработка нового поколения CAD-систем с целью упрощения моделирования применительно к технологии выращивания деталей и узлов;

4) создание адаптивных систем управления для таких установок;

5) разработка «зеленых» (повторно используемых или биоразлагаемых) материалов, пригодных для систем быстрого изготовления;

6) разработка программ обучения для всех уровней образования и центров обучения для конечных пользователей в промышленности;

7) учреждение национальных центров по применению, а также сертификации установок и материалов для быстрого изготовления;

8) создание сообщества специалистов для исследований в этой области.

Из общего перечня задач, стоящих перед производителями и пользователями аддитивного оборудования, в отечественных условиях наиболее просто реализовать последние три. Практическим шагом в этом направлении могла бы стать организация так называемого центра компетенции в области быстрого прототипиро-

вания. В перспективе данный центр мог бы организовать вначале опытную, а затем и коллективную работу с дорогими установками и систематизировать опыт такой работы. Организаторами подобных центров традиционно являются технические университеты, взаимодействующие с заводами и предприятиями, уже имеющими установки быстрого прототипирования.

Ближайшей задачей центра компетенции могла бы стать разработка типовых технологических цепочек производства типовых деталей с использованием установок быстрого прототипирования. Определение условий экономической эффективности таких цепочек в отечественных условиях существенно снизит риски внедрения, поможет в изменении позиции руководителей предприятий и даст реальную альтернативу традиционным технологиям. Кроме того, имея такой центр, существует реальный шанс принять участие в разработке, а также в тестировании новых материалов. В последние годы скорость появления новых материалов для аддитивных технологий возросла настолько, что даже специалисты не всегда успевают за этими изменениями. Тем более не хватает достоверных данных о технологических аспектах использования этих материалов, об их механических свойствах в составе выращенного изделия и т. д. Особенно это актуально для медицинских имплантатов и биоразлагаемых полимеров, свойства которых существенно зависят от режимов обработки и чувствительны даже к небольшим вариациям состава. Подобные исследования (тестирование) достаточно трудоемки и, вместе с тем, требуют высокой квалификации исполнителей. Поэтому такие работы могут оказаться востребованными на мировом рынке как потребителями, так и производителями материалов. Следует подчеркнуть, что эти работы могут вестись не только в интересах отечественных потребителей, но также под потребности (и финансирование) западных пользователей.

В настоящее время основным сырьем для аддитивного производства являются порошки различных материалов. Но отдельно стоит упомянуть и о так называемых LOM-технологиях, использующих листы различных матери-



алов в качестве заготовки для слоев выращивания. В последние один-два года эти технологии переживают своеобразный ренессанс. Главное их достоинство – низкая стоимость и доступность расходных материалов. Прототипы научились выращивать из листов обыкновенной офисной бумаги, из полиэтиленовой пленки и т. д. Возможно, окажется востребованной и технология выращивания функциональных деталей сложной формы из фольги или металлических листов (так называемых LOM2). Относительная распространенность установок для лазерной и гидроабразивной резки, широкая гамма доступных материалов и сохранившийся научно-технический потенциал в области машиностроения потенциально могут дать дешевые и производительные технологии, основанные на этом принципе. Центр компетенции мог бы координировать или даже возглавить работы в этом направлении.

Главной проблемой при создании и особенно функционировании центра компетенции являются источники финансирования. Как показывает отечественный и мировой опыт, бесплатный энтузиазм и «добрая воля» владельцев оборудования закономерно приводят к быстрому затуханию реальной деятельности.

#### ВЫВОД

В настоящее время сложилась достаточно редкая ситуация. Есть технология аддитивного производства (точнее, набор технологий), кото-

рая по всем признакам имеет огромное будущее. При этом и количество участников этого рынка и, самое главное, объем финансовых средств еще очень небольшие. Самым серьезным «недостатком» является определенный интеллектуальный порог для вхождения на этот рынок разработчиков как моделей, так и, в значительно большей степени, технологий и оборудования. Для России, Беларуси, Украины такая ситуация создает уникальный шанс реализовать свой интеллектуальный потенциал и выйти на мировой рынок с действительно прибыльными товарами и услугами. Таким образом, технологии быстрого прототипирования имеют все шансы стать «локомотивом» наших новых экономик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Литье** по выжигаемым моделям / В. Банкрутенко [и др.] // САПР и графика. – 2007. – № 4. – С. 66–72.
2. **Аддитивная** революция и серийные детали для AIRBUS // Конструктор. Машиностроитель. – 2010. – № 2. – С. 38–39.
3. **Wohlers, T.** Wohlers Report 2011, Wohlers Associates / T. Wohlers // Inc., Fort Collins, Colorado USA. – 2010. – 270 p.
4. **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.
5. [Электронный ресурс] Режим доступа: [www.mcp.by](http://www.mcp.by)
6. **Roadmap** for Additive Manufacturing. Identifying the Future of Freeform Processing. – The University of Texas at Austin. – 2009. – 102 p.

Поступила 06.07.2012