



АНАСТАСИЯ ПОПОВА,
научный сотрудник Института проблем лазерных
и информационных технологий
Российской академии наук (ИПЛИТ РАН)
reporter@fsmedia.ru

3D: ИДЕОЛОГИЯ И МИФОЛОГИЯ.

ЧАСТЬ 1. ТЕХНОЛОГИИ

В современной науке существует понятие Disruptive Technologies, или «прорывные технологии». Обычно это — частное применение инновационных исследований, которое позволяет произвести революционные изменения в социальной и экономической жизни общества. Порой эти изменения не вполне очевидны: например, ясно, что альтернативные источники энергии могут пошатнуть экономическую и политическую ситуацию, а к чему могут привести возможность создавать трехмерный объект заданной формы и свойств или реализация управления приборами с помощью жестов, голоса и даже силы мысли? Новая рубрика «Тренды будущего» посвящена актуальным и модным тенденциям современной прикладной науки, а также развенчанию некоторых мифов.

3D-печать можно смело назвать технологией 2013 г. Кажется, уже нет такой сферы жизни, где она не нашла бы своего применения. Медицина, архитектура, робототехника, вооружение, дизайн... Сильно ли изменится мир с приходом возможности создавать трехмерные конструкции своими руками? Или, как в случае с «нано», 3D-печать погостит на первых полосах газет и научных отчетов на правах модного тренда, а потом мир пойдет своим путем, не забывая об открывшихся возможностях, но и не переоценивая их важность? Футурологи вносят трехмерную печать в список технологий, способ-

ных перевернуть существующий порядок жизни. Мне кажется, что порядок не очень любит переворачиваться, и на пути к прогрессу всегда будут стоять преграды — если не технические, то уж точно психологические и социальные.

САМУРАЙ БЕЗ МЕЧА ПОДОБЕН САМУРАЮ С МЕЧОМ. ТОЛЬКО БЕЗ МЕЧА

Для начала «определимся с терминологией», как любят говорить наши уважаемые преподаватели технических наук. Сейчас термин «трехмерная печать» объединяет методики,

ранее известные как технологии быстрого прототипирования. Собственно, 3D-печать была лишь одной из них. Также можно встретить термин «аддитивное производство», подчеркивающий отличие новых методов от традиционных: построение объекта осуществляется за счет добавления необходимого материала вместо удаления лишнего (как происходит, например, при фрезеровке). А если заглянуть в историю, то можно найти в патенте от 1984 г. термин «стереолитография», и он был определен Чарльзом Халлом (Charles Hall) как «система генерирования трехмерных объектов за счет послойного формирования», чем, по сути, и является сейчас 3D-печать.

Технологии трехмерной печати модифицируются буквально каждый день, то и дело возникают сообщения о том, что появился новый многообещающий метод, решающий очередную актуальную проблему... Но сегодня самые острые вопросы касаются не общих идей, а конкретной реализации. Выделять ли технологию, использующую несколько принципов 3D-печати? Под каким именем объединить схожие процессы? Конкретная реализация может оказаться весьма неожиданной.

БУМАЖНАЯ РАБОТА

Начну с самого очевидного подхода — ламинирования. В этой технологии слой трехмерной модели состоит из листового материала (обычно используется бумага или пластик), из которых вырезается сечение будущей модели, слои склеиваются друг с другом в определенном порядке, и по окончании процесса мы получаем трехмерную структуру. Изначное решение, не так ли? На деле все обстоит гораздо сложнее. Как нанести слой материала? Для достижения высокой точности необходимо использовать тонкие листы, и они должны ложиться ровно, с высокой точностью повторяя положение предыдущего листа. Для решения этой задачи было придумано использовать рулоны: есть подающая катушка, с которой сматывается лист, есть принимающая, на которую лист наматывается. Между ними — рабочая поверхность. После формирования слоя в ленте образуется дыра, принимающий ролик наматывает на себя этот участок, и на рабочей поверхности оказывается чистый лист (рис. 1).

Следующая проблема связана с удалением лишних участков. Оказывается, это не так-то просто: для этого весь материал, не относящийся к слою модели, необходимо нарезать на мелкие квадраты. Интересен также процесс склеивания слоев между собой. В стандартном варианте этой технологии клей нанесен на весь нижний слой материала и разогретый ролик проходит сверху, плотно прижимая новый слой к предыдущему. Но существует модификация этого способа, в которой клей наносится только на тот участок материала, которому соответствует очередное сечение модели (метод носит название «выборочное ламинирование»). Производителями утверждается, что эта модификация облегчает удаление лишнего материала, однако она предусматривает подключение еще одного крупного узла — системы избирательного нанесения клея. Кроме этого, есть множество нюансов в процессе резки, и основной рельеф по вертикальной плоскости приходится дорабатывать вручную (также из-за этих особенностей невозможно создание полых структуры). Итогом работы является довольно простая модель: ограничения накладываются на точность резки и необходимость дополнительной механической обработки после печати. Технологию нельзя использовать для создания функциональных прототипов, но она хорошо подходит для изготовления масштабных моделей и прототипов для оценки формы и внешнего вида изделия.

К существенным плюсам этой технологии следует отнести решение проблемы расходных материалов. В то время как другие подходы подразумевают использование дорогостоящих многокомпонентных композитов, технология ламинирования может работать с обычной бумагой.

АРХИТЕКТУРА — ЗАСТЫВШАЯ... ЖИДКОСТЬ

Стереолитография — одна из самых точных технологий трехмерной печати. Ее основой является процесс фотоинициированной полимеризации, переводящий участок подложки, подвергшийся облучению, из жидкого состояния в твердое (рис. 2).

Кратко опишу процесс создания трехмерной модели: на рабочее поле,

представляющее собой подвижную по вертикальной оси емкость, наносится тонкий слой фоточувствительной жидкости (о ней поговорим позже), затем осуществляется засветка поля иницирующим, например лазерным, излучением в соответствии с первым слоем трехмерной модели. Под действием излучения в жидкости образуются активные центры, которые инициируют рост полимерных цепей, и таким образом происходит селективное отверждение жидкого материала. Затем рабочее поле опускается, и следующий слой жидкого материала наносится на предыдущий. По окончании процесса объект подвергается облучению для окончательного отверждения.

Легко видеть, что при работе с этой технологией возникают сложности при формировании структур, подразумевающих увеличение площади слоев от нижнего к верхнему. В этом случае используется система подпорок, которые формируются на этапе создания компьютерной модели.

Еще один нюанс связан с рабочим материалом: фоточувствительные композиции — высокотехнологичный продукт, защищенный патентами и стоящий не так уж дешево. Пожалуй, на этом недостатки стереолитографии можно считать исчерпанными. Нет жестких требований для мощности иницирующего излучения ввиду высокой квантовой эффективности фотоиници-

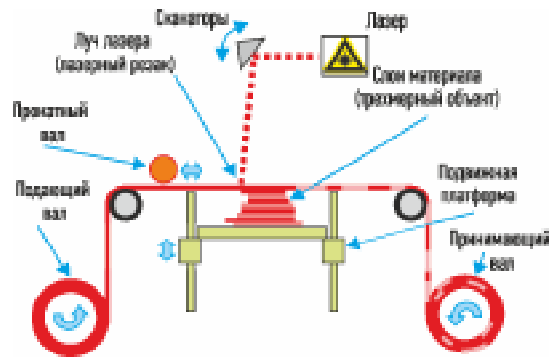


РИС. 1. Ламинирование

рованной полимеризации, и для большинства композиций процесс можно проводить при комнатной температуре и даже при дневном свете — ввиду высокой спектральной селективности процесса формирования активных центров.

Существует несколько различных комбинаций «материал—излучение», в которых варьируются длина волны излучения, длительность импульса и собственно материал, который обычно состоит из фотополимеризующей смолы, фотоиницирующей системы и различных добавок, включающих инертные и активные наполнители, регуляторы, стабилизаторы, ингибиторы, пластификаторы и др. Интересный нюанс: чем больше степень полимеризации исходного материала, тем меньше времени ему требуется для того, чтобы перейти

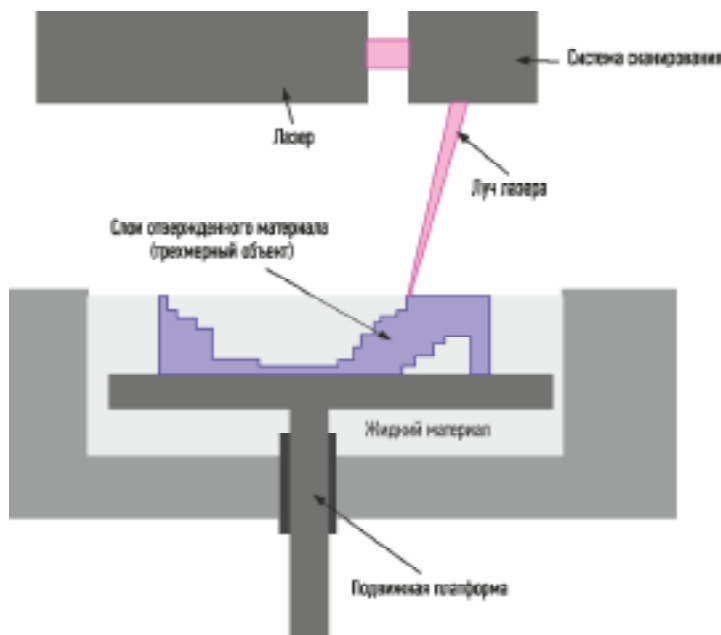


РИС. 2. Стереолитография

в твердое состояние, однако при этом он становится настолько вязким, что не способен создавать достаточно тонкий слой. Чтобы обойти эту проблему, используются щетки, разгоняющие материал по поверхности, не давая поверхностному натяжению формировать каплю.

Способы облучения материала можно разделить на две группы: сканирующий и широкоапертурный. В первом случае подразумевается наличие сфокусированного пучка, сканирующего поверхность по заданной траектории, во втором — засветка через маску-негатив. Стереолитографические установки нельзя назвать дешевыми, спектр рабочих материалов ограничен, но скорость формирования объекта и точность в сотые доли миллиметра зачастую оказываются более существенным фактором при выборе способа 3D-печати. Кстати, существует сообщество, посвященное созданию стереолитографических установок в домашних условиях, на сайте которого собрана информация по фотополимерам, излучателям, проекторам и сканаторам [1].

В ЖАРКОЙ ПЕЧКЕ ПО УТРАМ ВЫПЕКАЮТ БУЛКИ НАМ

Другой метод, не менее широко распространенный, тоже использует излучение (обычно лазерное) для формирования слоя (рис. 3). Метод называется селективное спекание,

и, в отличие от стереолитографии, в качестве рабочего материала в нем используется мелкодисперсный порошок. В остальном процессы очень схожи: из порошкового материала формируется слой, затем, с помощью сканирующего излучения, за счет спекания частиц порошка между собой создается сечение трехмерного объекта, после чего наносится следующий слой. По окончании процедуры готовый объект извлекается из толщи порошка.

Удобство метода заключается в том, что при его использовании нет необходимости в поддерживающих структурах: верхние слои просто опираются на ниже лежащий слой порошка. Однако использование порошкового материала имеет и недостатки. Первая проблема возникает уже при формировании слоя: мелкодисперсный порошок комкуется, электризуется, и нанесение слоя в сотню микрон становится непосильной задачей. Для решения проблемы используются разравнивающие и уплотняющие валики, подача напряжения на рабочее поле... или умелые руки. Следующая проблема связана с тем, что при спекании материала происходит существенная усадка, и при создании объемных моделей неизбежны неточности. Это обычно учитывается на этапе создания трехмерной модели, в большинстве программ автоматически. Кроме этого, есть множество нюансов, связанных с системой сканирования

излучения, шириной пучка (определяющей пространственное разрешение по осям x, y) и глубиной проникновения излучения, которая должна быть достаточной для спекания слоев друг с другом, но при этом обеспечивать хорошее пространственное разрешение по оси z .

Рабочий материал для селективного спекания может быть разным — от легкоплавкого пластика до керамики и металла. Разумеется, необходимо помнить о том, что материал должен поглощать рабочее излучение, однако это не накладывает серьезных ограничений: поглощения можно достичь добавлением в материал наноразмерных сенсбилизаторов. Существует, как и в стереолитографии, вариант широкоапертурного воздействия на материал: используется излучение инфракрасного диапазона и специальные маски для обеспечения селективности.

Метод селективного спекания долгое время оставался единственным, позволяющим работать с металлами. (Вообще сейчас существует еще одна модификация технологии трехмерной печати, использующая предварительное склеивание частиц металла с последующим отжигом, но она имеет существенные ограничения по точности). Его применяют в машиностроении, космонавтике, авиастроении, а в прошлом году появилось сообщение о том, что метод селективного спекания используют для создания индивидуальных титановых подков скаковым лошадям. Причуда австралийских конюхов? Утверждается, что титан, даже в сравнении с алюминием, существенно облегчает вес подковы (за счет его прочности можно создавать более тонкие конструкции), однако он крайне сложен в обработке, и готовое изделие не всегда можно подогнать под конкретную конфигурацию копыта. А вот подкова, изготовленная методом селективного спекания (несмотря на то, что еще требует закалки и полировки), подходит отлично — за счет того, что при ее создании использовалась трехмерная модель копыта, снятая с этой самой лошади [2]. Интересно, что эта же технология была использована в 2011 г. Маркусом Кайзером (Markus Kaiser) для создания солнечного 3D-принтера. В качестве рабочего материала

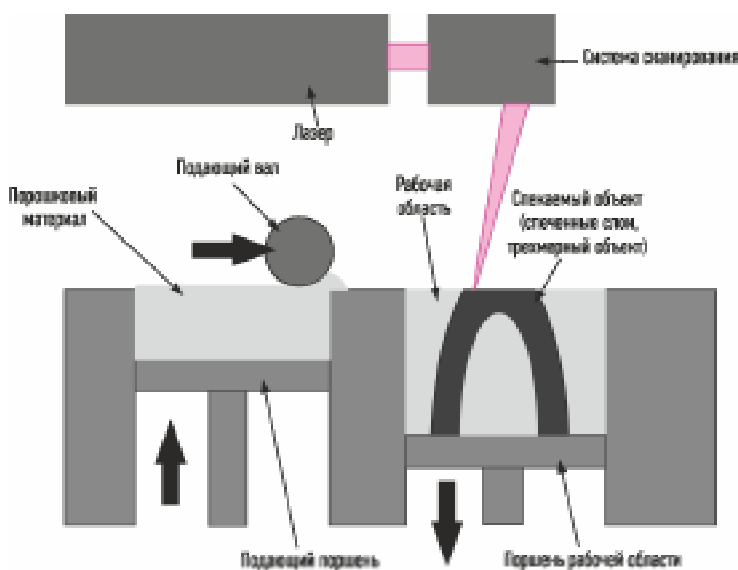


РИС. 3. ►
Схема процесса селективного спекания

он использовал песок, а в качестве излучения — солнце: линза Френеля концентрировала солнечные лучи в точку и направляла на рабочую поверхность. Примечательно, что координатная система принтера и компьютер в предложенной установке работают от солнечных батарей: автор вывез свое изобретение в пустыню, где за несколько часов создал из кварцевого песка стеклянную чашу [3]. Кстати, именно с помощью селективного спекания была создана полностью работоспособная модель пистолета Браунинга [4]. И это уже не пластиковые модели, рассчитанные на несколько выстрелов патронами небольшого калибра!

ИГРА В «КУЛИЧКИ» ПО-ВЗРОСЛОМУ

Следующую технологию можно назвать «порошковая печать», или собственно трехмерная печать (рис. 4). В качестве рабочего материала, так же как и в селективном спекании, используется мелкодисперсный порошок, но его частицы не спекаются под действием излучения, а склеиваются специальными чернилами. Введением клея решается проблема деформации материала, ведь можно подобрать такую композицию, которая бы не стягивала частицы порошка, образуя при этом зазоры, а заполняла бы пространство между частицами. Обычно технологическим узлом, наносщим клеевой состав, служит печатная головка, по своему строению схожая с печатающей головкой обычного принтера (а иногда, как в случае с принтерами компании Z-Corr, в работе используются коммерчески реализуемые головки для принтера HP). Не удивительно, что есть сообщения о самодельном принтере, работающем на этой технологии, где основой служит обычный двумерный принтер.

В качестве рабочего материала могут использоваться гипсы, полимеры, керамика, цементные композиции и даже металл. Но что же может быть клеем? Решая этот вопрос, мы сталкиваемся со множеством ограничений: чем меньше сопла печатающей головки, тем выше пространственное разрешение трехмерной модели, но для работы с маленькими соплами вязкость клеевого состава должна быть низ-

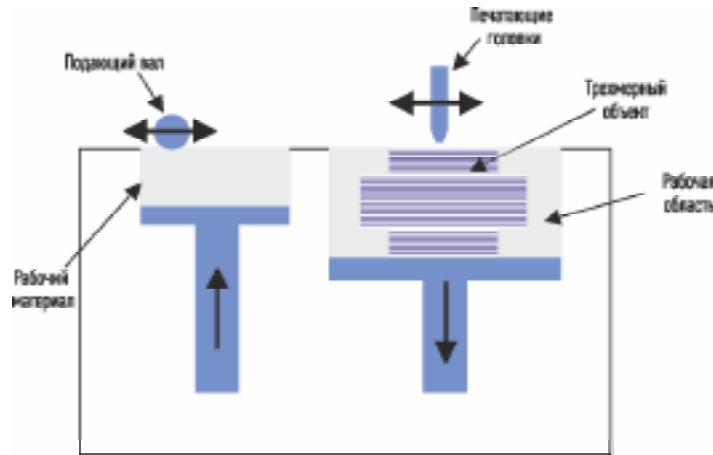


РИС. 4. Порошковая печать

кой. А при низкой вязкости вероятно расползание пятна и ухудшение разрешения. Также возникает проблема поверхностного натяжения капли, оказавшейся на поверхности рабочего материала. Можно было бы выпускать ее под давлением, но тогда вероятно нарушение слоя мелкодисперсного порошка... Эти проблемы были решены лидером трехмерной печати компанией Z-Corr путем подбора специальных составов рабочего порошка и клеевой композиции и в настоящее время охраняются патентами. К сожалению, это прямо сказывается как на стоимости материалов, так и на общей концепции «закрытого ящика». Результатом является невозможность самостоятельной диагностики возникающей проблемы, что, на фоне некомпетентности службы

поддержки в России, ведет к отказу от использования этой многообещающей технологии. В ряде случаев готовая структура подвергается дополнительной обработке: например, при печати металлами и керамикой после извлечения изделия из слоя порошка его отжигают при высокой температуре. Таким образом частицы, до того лишь склеенные между собой, оказываются прочно сплавленными. Также практикуется пропитка готовых изделий цианакрилатной композицией, что превращает довольно хрупкий объект в прочную структуру. Эта технология, пожалуй, единственная, способная предложить полноцветную печать трехмерных моделей (для этого, как на обычном струйном принтере, используются головки, печатающие разными цветами клеевой композиции).

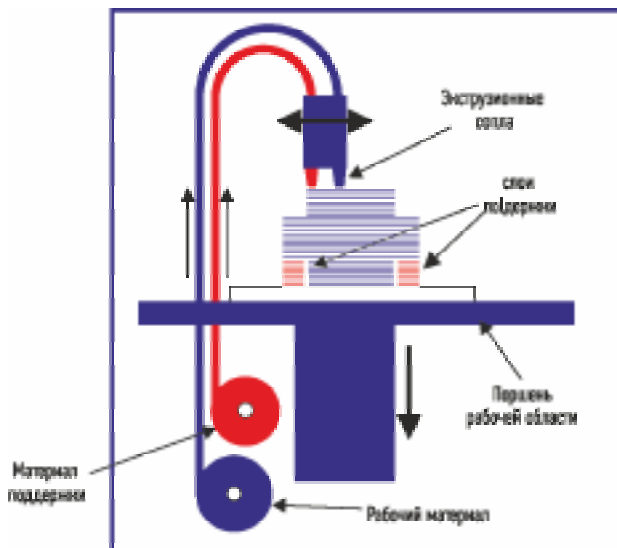


РИС. 5. Экструзионная печать полужидким материалом

ЧТО НАМ СТОИТ ДОМ ПОСТРОИТЬ

Напоследок остается самая дешевая, популярная и обсуждаемая технология. Она подразумевает экструзионную печать полужидким материалом. К этой технологии можно отнести методы послойного наплавления и многоструйного моделирования. Именно эта технология легла в основу создания знаменитого детища открытого проектирования — принтера RepRap [5]. Еще пару лет назад для самостоятельной сборки трехмерного принтера оставались барьеры, связанные с поиском валов, осей, шаговых двигателей и переводом чертежей в метрическую систему, но сегодня можно с уверенностью сказать, что они преодолимы (рис. 5).

Технология проста: из экструзионного сопла (сопел) материал подается на рабочую поверхность, при этом отверждаясь. Отверждение происходит либо за счет охлаждения горячего материала при комнатной температуре, либо за счет засветки специально подобранным излучением (в этом случае используется фоточувствительный материал, как в стереолитографии). При этом движение сопла относительно рабочей поверхности происходит за счет перемещения или сопла, или рабочей поверхности. Разные механизмы реализации этого процесса имеют свои достоинства и недостатки: чем больше передвигаемая масса, тем сложнее обеспечить точность, но такая схема может быть гораздо проще в реализации...

Интересна проблема закрепления детали на подложке — с одной стороны, деталь не должна смещаться и коробиться, а с другой — ее должно быть достаточно просто отделить по окончании процесса. Для решения этой проблемы используют различные клейкие ленты. Также важно, что скорость печати должна соответствовать скорости отверждения материала. Следует отметить, что, как и в случае стереолитографии, для сложных деталей необходима система поддержек. Но это можно решить путем использования двух сопел, печатающих разными материалами. Поддержки в этом случае удаляются в процессе финишной обработки (нагревом, при котором вспомогательный материал оплавляется, или помещением в жидкость, которая его растворяет). А если увеличить количество сопел в несколько сот раз, можно использовать сразу и технологию стереолитографии, и технологию многоструйного моделирования. В этом случае можно получить сложный трехмерный объект внутри прозрачного трехмерного объекта. Выглядит фантастично! Особенно интересно смотрится напечатанный белым пластиком скелет, заключенный в прозрачное тело.

Спектр материалов, которые могут быть использованы в данной технологии, велик, но в промышленных масштабах специальные катушки для заправки в принтер производят из пластика АБС (акрилонитрил-бутадиенстирол, ударопрочная техническая термопластическая смола

на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом) и ПЛА (полилактид — биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота). Эти материалы похожи по свойствам, и выбор зависит от конкретного назначения 3D-модели.

ПЕССИМИСТ — ЭТО ХОРОШО ИНФОРМИРОВАННЫЙ ОПТИМИСТ

Получился довольно внушительный список технологий, а сколько еще модификаций осталось «за кадром»? Казалось бы, любой материал можно использовать для печати, стоит только подобрать подходящий принтер... Вот только где принтеры нужны? Вроде бы на наших глазах воплощается очередная мечта человечества: автоматизация выходит на новый уровень, и один человек может контролировать работу целого «завода»... Но машины стоят дорого, обслуживать их должны квалифицированные специалисты, поэтому в производственном процессе оказывается выгоднее использовать традиционные методы и труд людей, да и зачастую владельцев скорее интересует больший оборот средств, чем реальная экономия.

Может быть, целесообразно использовать принтеры в обучающем процессе? Пожалуй, ни один кабинет биологии не отказался бы от полного набора наглядных пособий! Но ведь гораздо проще купить готовые экспонаты, чем приобретать трехмерный принтер, чтобы напечатать собственные... Прогрессивно настроенные учителя говорят о том, что появление технологии 3D-печати может вдохнуть новую жизнь в интересы школьников к конструированию. «Зачастую дремлющая в детях созидательная сила наталкивается на ограничения: даже придумав интересный механизм, сложно изготовить деталь нужного размера и формы, сложно получить доступ ко «взрослым» технологиям. Но вот появляется инструмент, который может использовать любой человек, даже с ограниченными способностями! Достаточно придумать механизм (пусть это будет очередной велосипед, не страшно) и, используя программы 3D-моделирования,



«Я разработал Printrbot как самый простейший принтер. Есть много отличных комплектов для самостоятельной сборки — Makerbot, Ultimaker, Prusa Mendel и другие, но ни один из них не является таким простым и миниатюрным, как мой. Они не только требуют многих часов для сборки, но и содержат сотни деталей и стоят дороже. Мой дизайн также избавляет от необходимости во множестве

калибровок, от которых страдают другие 3D-принтеры. Мы собираем электронику, печатающую головку, устанавливаем коннекторы на все компоненты — при сборке не требуется никакой пайки», — говорит Брук Драм (Brook Drumm), создатель нового бюджетного 3D-принтера.

уже через несколько часов получить физическое воплощение работы собственного мозга. Это очень важно для любого человека, и особенно для ребенка. Доступная трехмерная печать — блестящая возможность вернуть детей из виртуального мира в реальность», — считает преподаватель естественных наук Макушин А.А. Но для этого нужны программы трехмерного моделирования, ориентированные специально на детей. Между тем в серьезных программах, позволяющих создать действительно сложные трехмерные модели, не всякий взрослый разберется!

Может быть, использовать 3D-печать в искусстве? Многие художники с сомнением смотрят на эту пер-

спективу. Да, напечатать можно все, что угодно. Но это уже нельзя будет назвать искусством, у напечатанных изделий не будет души... Или будет?

Основная проблема, с которой сталкиваются люди, профессионально занимающиеся 3D-печатью в России, — отсутствие соответствующих специалистов. Ведь как бы ни был отлажен процесс печати, необходимо знать нюансы технологий и особенности строения аппаратов. Это нужно, чтобы подобрать способ трехмерной печати для конкретной задачи, правильно ориентировать объект в рабочем поле, сгенерировать поддерживающие конструкции, выбрать материал. Кроме того, необходимы квалифицированные

сервисные инженеры: дешевые и простые принтеры зачастую ненадежны и их легко вывести из строя, а профессиональные настолько сложны, что, не имея должной квалификации, проще по очереди менять технологические узлы, чем пытаться искать неисправность. ●



Список сайтов, ссылки на которые приведены в статье, можно найти в электронной версии журнала

КАК ВЫ ВИДИТЕ МИР, ГДЕ КАЖДЫЙ СМОЖЕТ СОЗДАТЬ ТРЕХМЕРНЫЙ ОБЪЕКТ?



АНТОН ФЕДОСЕЕВ, МЕНЕДЖЕР ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ AUTODESK:

Мир изменится сильно, и не только в области печати органов, а в первую очередь в бытовом плане. Ведь 3D-принтеры становятся все более доступными. Этот процесс приведет к тому, что в недалеком будущем мы будем покупать в магазине не продукт, а модель, которую сможем распечатать у себя дома. Если говорить о строительстве, то вскоре можно будет спроектировать здание, задать координаты его местоположения, и специальный сервис напечатает его по нашему макету. Другое направление — пищевая биопечать. Представьте себе трехмерный принтер, стоящий дома, запрограммированный специфическими ингредиентами: вы загружаете из Интернета рецепт, и принтер печатает вкусное блюдо, каждый день новое...



ЕЛЕНА ЛИПЕЦ, К. Б. Н., НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК ГНЦ РФ ТРИНИТИ:

Замена существующих технологий трехмерной печатью в конечном счете упирается в экономическую целесообразность: что будет дешевле и эффективнее — оставить все как есть или закупать новое оборудование, трансформировать технологический процесс, обучать персонал... Говоря о влиянии на человека, можно прогнозировать еще большее отчуждение труда. Если в создании объекта не будет принимать участие человек, а все будет напечатано машиной, то вполне вероятно, что произойдет обесценивание результата.



СЕРГЕЙ ГУДОШНИКОВ, К. Ф.-М. Н., НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК МИСИС:

Пока что сложно представить, как трехмерный принтер может повлиять на нашу работу. Если говорить о производстве приборов, то для нас выгоднее иметь дело со стандартными комплектующими. Даже корпус удобнее покупать стандартный и потом подстраивать под него начинку. При необходимости создания сложных трехмерных структур по чертежам можно использовать станок с ЧПУ — современные обрабатывающие центры способны работать практически с любым материалом, демонстрируя при этом поразительную точность. Разумеется, необходим грамотный специалист, и станки скорее ориентированы на серийное производство, нежели на разовую работу, зато надежность результата не вызывает сомнений.



ВИОЛЕТТА БОГДАНОВА, К. П. Н., ДОЦЕНТ КАФЕДРЫ ЭСТЕТИЧЕСКОГО ВОСПИТАНИЯ МПГУ:

Воздействие высокотехнологичных средств создания художественных образов на психику взрослых и детей велико. В настоящее время ученые работают над анализом изменений в способе мышления, восприятия, воображения (в частности, у детей дошкольного возраста), и сделан ряд выводов, позволяющих корректировать работу педагогов с учетом новых особенностей коммуникации и факторов, определяющих работу интеллекта. Это такие изменения, как повышение способности к образному мышлению, но затруднение восприятия объяснений на слух; ослабление концентрации произвольного внимания и способности к разглядыванию статичного объекта, но усиление комбинаторного воображения и умения действовать в нестандартных ситуациях. Если говорить о визуализации трехмерной модели, которую предоставляет 3D-печать, то, разумеется, эта технология открывает богатейшие возможности для создания спецэффектов и новой художественной выразительности, возможно даже нового языка искусства.