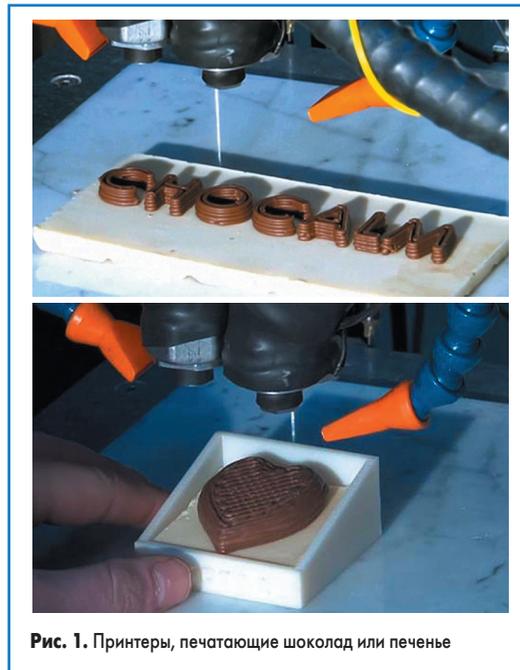


# 3D-принтеры: НЕВОЗМОЖНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

**В последнее время никого не удивишь 3D-принтерами, они уже прочно вошли в нашу жизнь, поэтому немного досадно, что за обыденностью потерялись безграничные возможности, которые открыли эти машины. Именно о них и пойдет речь в данной статье.**

**Николай Павлов**

Самые вкусные и доступные решения демонстрируются на большинстве выставок 3D-печати — принтеры, печатающие шоколад или печенье (рис. 1). Это, конечно, интересно,



**Рис. 1.** Принтеры, печатающие шоколад или печенье

но достаточно просто. Мы поговорим о 3D-печати в промышленности и электронике.

Все технологии 3D-печати можно разделить на две большие группы (на базе представленной в Википедии информации):

- лазерные методы печати:
  - лазерная стереолитография — метод засвечивания фотополимера лазерным лучом или ультрафиолетовой лампой;
  - лазерное сплавление — метод сплавления порошкового материала лазерным лучом;
  - ламинирование — склеиваемые тонкие слои материала подвергаются лазерной обработке (раскройке, резке и т. п.), с получением требуемого сечения.
- струйные методы печати:
  - застывание материала при охлаждении — формирование детали за счет склеивания капель наносимого материала при застывании;
  - застывание фотополимера при облучении ультрафиолетом — способ, аналогичный предыдущему, с той разницей, что застывание происходит под действием ультрафиолетового излучения;
  - склеивание или подплавление порошкообразного материала — нанесенный слой порошкового материала склеивается (плавится) в областях нанесения струйным методом связующего (клея, кислоты или другого растворителя);
  - нанесение густых смесей, застывающих самостоятельно;
  - биопринтеры — нанесение живых клеток на биосовместимый «каркас», дальнейший рост и размножение клеток обеспечивает формирование объекта.

Обзор технологий представлен в таблице 1.

Примеры 3D-печати поистине безграничны. Совсем недавно на сайте NakedScience появилась новость об изготовлении по такой технологии из композитной стали моста над одним из каналов Амстердама. Для печати моста будут задействованы роботы с несколькими рабочими осями, осуществляющими печать «в воздухе». Работы начнутся на одной стороне канала и с помощью технологических опор завершатся на другой стороне (рис. 2). Планируется, что подготовительные работы к строительству такого моста закончатся в 2017 году, а печать конструкции займет около двух месяцев. Точное расположение моста станет известно в сентябре 2015 года [1].



**Рис. 2.** Примеры 3D-печати

Таблица 1. Обзор технологий 3D-печати

Наименование технологии	Суть процесса	Преимущества	Недостатки
Струйная трехмерная печать (3DP)	Послойное построение объектов, контуры модели обрисовываются печатающей головкой слой за слоем, обеспечивая спекание слоев между собой	– не требуется построения опорных структур; – использование любого спекаемого порошкового материала	– прочность зависит от прочности связующего материала, соответственно, слабые механические характеристики готовой модели
Масочная стереолитография (SGC)	Послойное нанесение фотополимерной смолы с отверждением ультрафиолетом. Облучение проводится по фотошаблону	– не требуется построения опорных структур; – высокое разрешение по горизонтали; – возможность механообработки детали; – высокая производительность	– высокая шумность; – большое количество отходов
Многоструйное моделирование (MJM)	Используется оригинальная головка с матрицей сопел (количество может варьироваться от 96 до 448), печать производится термопластиками, смолами и фотополимерами. Каждый материал отверждается своим методом. По окончании печати воск выплавляется из модели	– высокая точность (сравнима с SLA); – высокая степень готовности деталей	– дороговизна и сложность, многостадийность процесса
Цветная струйная печать (CJP)	Связующий полимер покрывает слои порошкообразных материалов, наносимых с задаваемым шагом	– использование разноцветных связующих материалов; – достаточно высокая точность изготовления деталей; – позволяет использовать порошкообразные материалы с различными свойствами (имитирующие резину, ударопрочные пластики и т. п.); – не требуется построения опорных структур	– высокая стоимость процесса
Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Альтернативная SLA технология, использует цифровые светодиодные проекторы (DLP). Проецирует изображение сразу целого слоя для затвердевания полимерного материала	в связи с недавним появлением трудно оценить, но: – высокая точность, сопоставима с SLA; – широкий спектр используемых полимерных материалов; – не требуется построения опорных структур; – меньшая стоимость по сравнению с лазерными установками	– высокая стоимость расходных материалов
Выборочное лазерное спекание (SLS)	Последовательное спекание слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. Перед началом печати материал подогревается до температуры, близкой к температуре плавления, для облегчения спекания. Также для облегчения спекания могут использоваться композитный гранулированный материал с тугоплавким ядром и оболочкой с пониженной температурой плавления	– широкий диапазон материалов (включая пластики, металлы, керамику, стекло); – высокая универсальность применяемых материалов; – не требуется построения опорных структур; – изготовление функциональных деталей сложной геометрической формы	– при использовании композитных гранулированных материалов возможно формирование неоднородностей в теле детали; – высокая стоимость расходных материалов
Выборочная лазерная плавка (SLM)	Полная плавка порошковых материалов до образования гомогенной массы. Порошковый материал наносится слоями от 20 до 100 мкм	– возможность построения сложных функциональных деталей и объектов с тонкими стенками и полостями; – возможность комбинирования гомогенных и пористых структур; – почти не требуется финишная обработка готовых деталей; – экономия материалов, почти безотходное производство; – не требуется построения опорных структур	– высокая стоимость расходных материалов
Стереолитография (SLA или SL)	Облучение лазером жидкой фотополимерной смолы, полимеризация материала происходит в точке соприкосновения с лучом лазера. По завершении вычерчивания контура слоя лазером вся модель погружается в бак со смолой на заданную глубину (на толщину слоя 50–150 мкм). По окончании процесса и вымывания остатков фотополимера возможно отверждение в печи	– высокая точность и скорость печати (толщина слоя до 15 мкм); – готовые детали могут обладать различными свойствами, в зависимости от свойств фотополимера	– требуется использование поддерживающих структур; – требуется ручное удаление поддерживающих элементов; – возможна необходимость дополнительного отверждения готовой детали
Выборочное тепловое спекание (SHS)	Осуществляется послойное нанесение порошкового материала с последующим спеканием тепловым излучателем	– использование вместо лазерной головки теплового излучателя, что позволяет значительно снизить стоимость и габариты принтера; – не требуется построения опорных структур	– низкая энергетическая отдача; – возможна необходимость дополнительного отжига готовой детали
Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Материал (бумага, пластик, фольга) в тонких листах последовательно склеивается, с формированием контура лазерной резкой. Может применяться резка лезвием из карбида вольфрама. Также связующий материал может наноситься только в область формирования модели, а не по всей плоскости листа	– низкая себестоимость за счет общедоступности материалов; – возможно производство достаточно крупногабаритных деталей	– требуется дополнительная механическая обработка после печати
Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Спекание порошкового материала оптоволоконными лазерами высокой мощности	– высокая точность печати (около 20 мкм) геометрически сложных деталей; – не требуется построения опорных структур; – отсутствует необходимость в финишной механической обработке готовых деталей; – использование любых материалов и сплавов в порошковой форме	– по сравнению с литейными деталями показатели прочности ниже
Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF <sub>3</sub> )	Наплавление материала в форме проволоки с помощью электронных пусков высокой мощности в вакуумной камере	– возможно производство деталей в отсутствие гравитации; – экологичность; – отсутствует необходимость финишной механической обработки готовых деталей	– сложность работы с вакуумной системой
Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF, экструдирование)	Печать соплом расплавленного материала, подающегося нитью	– широкий спектр используемых полимерных материалов; – простота процесса; – быстрое прототипирование; – самый дешевый метод печати	– требуется использование поддерживающих структур
Прямое лазерное аддитивное построение (CLAD)	Металлический порошок напыляется на готовые детали с немедленной плавкой лазером, зачастую это ремонтная процедура	– возможность работы по любым плоскостям и под любым углом; – быстрое реагирование на нештатные ситуации при производстве; – работа с крупногабаритными деталями	– сложность технологии; – узкая специализация; – ремонт деталей в процессе производства (авиационных двигателей)

Ну а теперь вернемся к более близким радиоэлектронным применениям. Часть из представленных выше технологий, такие как принтеры термоотверждения (экструдеры) и фотоотверждения, уже достаточно много описаны, большинство имело опыт общения с ними в той или иной области, поэтому подробно на них останавливаться не стану. Скажу

лишь по собственному опыту, что для конструктора, технолога и производственника наличие такого принтера — большое подспорье. Как говорится, «гладко было на бумаге, да забыли про овраги». Возможность проверить новое решение или изменить старое на реальной модели — находка нашего времени. При этом:

- достаточно CAD-файла проекта;

- не требуется изготовления дорогостоящих макетов, пресс-форм, литников, матриц и т. п.;
- деталь дешева (а в некоторых случаях может быть вновь переплавлена для следующей печати, это зависит от материала);
- деталь быстро изготавливается настольной установкой (конечно, все зависит от размеров как детали, так и установки);

**Таблица 2. Возможность печати материалами**

Наименование материала	Условия обработки	Преимущества	Недостатки
АВС-пластик (акрилонитрил-бутадиенстирол)	температура плавления +180...+250 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– устойчив к влаге, кислотам и маслу;</li> <li>– имеет достаточно высокие показатели термостойкости (+90...+110 °С);</li> <li>– легко поддается окраске;</li> <li>– хорошая растворимость в ацетоне;</li> <li>– дешев</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– некоторые виды материала разрушаются под воздействием прямого солнечного света;</li> <li>– высокая степень усадки при охлаждении – до 0,8% объема;</li> <li>– низкая адгезионная способность к рабочей поверхности, может потребовать дополнительных средств для схватывания с рабочей поверхностью;</li> <li>– при нагревании пластика выделяются пары акрилонитрила – ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек и отравление</li> </ul>
Полиметил-метакрилат (оргстекло, акрил, ПММА)	температура плавления +160 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– очень быстро остывает и твердеет;</li> <li>– прочен;</li> <li>– влагоустойчив;</li> <li>– экологичен;</li> <li>– легко поддается склеиванию;</li> <li>– достаточно пластичен;</li> <li>– устойчив к воздействию прямого солнечного света</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– очень быстро остывает и твердеет;</li> <li>– в разогретом акриле появляется множество мелких воздушных пузырьков, которые могут вызвать визуальные искажения готового изделия</li> </ul>
Полилактид (PLA, ПЛА)	температура экструзии +160...+180 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низкая усадка;</li> <li>– экологичен, изготавливается из остатков биомассы, силоса сахарной свеклы или кукурузы;</li> <li>– отличный коэффициент скольжения материала</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– медленно застывает;</li> <li>– усадка имеет кумулятивный эффект при увеличении габаритов печатаемых моделей;</li> <li>– изготовленные из него модели недолговечны и постепенно разлагаются под действием тепла и света;</li> <li>– легко поглощает воду (высокая гигроскопичность);</li> <li>– относительно мягко;</li> <li>– не предназначен для функционального использования, а служит в качестве дизайнерских моделей, сувениров и игрушек</li> </ul>
Нейлон (Nylon)	нейлон-6, температура плавления +220 °С; нейлон-66, температура плавления +265 °С; Nylon-PA6 и Taulman 680, температура экструзии +230...+260 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая износоустойчивость;</li> <li>– низкий коэффициент трения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– необходимость откачки воздуха из экструдера из-за токсичности компонентов нейлона;</li> <li>– легко поглощает воду (высокая гигроскопичность);</li> <li>– плохо поддается склеиванию</li> </ul>
Поликарбонат (PC, ПК)	минимальная температура экструзии на скорости 30 мм/с +265 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– твердый пластик, способный сохранять свои физические свойства в условиях экстремально высоких и экстремально низких температур;</li> <li>– высокая ударная вязкость;</li> <li>– высокая светонепроницаемость</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– потенциальный риск для здоровья при печати: в качестве сырья зачастую используется токсичное и потенциально канцерогенное соединение бисфенол А;</li> <li>– высокая склонность к деформации;</li> <li>– легко поглощает воду (высокая гигроскопичность);</li> <li>– при печати в воздухе с высокой влажностью в теле модели образуются пузырьки</li> </ul>
Полипропилен (PP, ПП)	минимальная температура экструзии +220 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низкая удельная масса;</li> <li>– нетоксичен;</li> <li>– обладает хорошей химической стойкостью;</li> <li>– устойчив к влаге;</li> <li>– устойчив к износу</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая степень усадки при охлаждении – до 2,4%;</li> <li>– уязвим к активному кислороду;</li> <li>– деформируется при отрицательных температурах (ниже –5 °С);</li> <li>– уязвим к воздействию прямого солнечного света</li> </ul>
Полифенил-сульфон (PPSU)	температура плавления +370 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– практически не горит;</li> <li>– теллостоек;</li> <li>– высокая твердость, превосходит по прочности стекло при близких параметрах светопропускания;</li> <li>– высокая максимальная рабочая температура (выдерживает кратковременный нагрев до температуры +220 °С, температура изгиба под нагрузкой составляет 190 °С, температура стеклования +220...230 °С);</li> <li>– хорошая химическая стойкость, в том числе устойчивость к растворителям, кислотам и щелочам;</li> <li>– высокая ударпрочность;</li> <li>– физиологическая инертность;</li> <li>– хорошие диэлектрические свойства</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая прочность материала затрудняет его полировку после печати;</li> <li>– при механической обработке возникает риск растрескивания материала;</li> <li>– выделение вредных веществ при воздействии открытого пламени</li> </ul>
Поликапро-лактон (PCL)	температура плавления +60 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая пластичность материала;</li> <li>– низкая температура плавления;</li> <li>– быстро затвердевает;</li> <li>– хорошие механические свойства готовых изделий;</li> <li>– нетоксичен и биоразлагаем;</li> <li>– легко поддается окраске</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– не все 3D-принтеры можно настроить для работы при таких температурах, нагрев до привычных рабочих температур (около 200 °С) вызывает потерю механических свойств;</li> <li>– малопригоден для создания функциональных механических моделей ввиду вязкости;</li> <li>– низкая теплостойкость</li> </ul>
Полиэтилен высокой плотности (HDPE, ПНД)	температура плавления +130...+145 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– дешевизна и общедоступность</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– быстрое затвердевание материала при +100...120 °С, слои не успевают схватываться, что приводит к расслоению модели;</li> <li>– при плавлении полиэтилена происходит эмиссия паров вредных веществ</li> </ul>
Полиэтилен-терефталат (PET, ПЭТ)	температура плавления +260 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая химическая устойчивость к кислотам, щелочам и органическим растворителям;</li> <li>– высокая износоустойчивость;</li> <li>– широкий диапазон рабочих температур –40...+75 °С;</li> <li>– легко поддается механической обработке</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая степень усадки при охлаждении – до 2%;</li> <li>– для достижения прозрачности моделей необходимо быстрое охлаждение при прохождении порога стеклования, составляющего +70...+80 °С</li> </ul>
Ударопрочный полистирол (HIPS)	температура плавления +160...+220 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенная стойкость к действиям окружающей среды;</li> <li>– высокая пластичность, легкость формования;</li> <li>– повышенная влагостойкость и морозостойчивость;</li> <li>– благодаря добавкам (антипирены) обладает огнестойкостью;</li> <li>– легкость в переработке за счет высокой размерной стабильности;</li> <li>– светорассеивающая (некоторые виды материала) способность;</li> <li>– повышенная стойкость к химическим агентам (кислоты, щелочи, спирты), износам и разрывам</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– возможно выделение токсичных испарений;</li> <li>– непереносимость ультрафиолетовых лучей</li> </ul>
Поливиниловый спирт (PVA, ПВА)	температура экструзии +160...+175 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>– водорастворим (применим для создания опорных структур в принтерах с двойными экструдерами, после печати позволяет удалять опорные элементы простым опусканием в воду);</li> <li>– при низкой влажности пластик обладает высокой прочностью на разрыв;</li> <li>– при повышении влажности уменьшается прочность, но возрастает эластичность</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– легко поглощает воду (высокая гигроскопичность);</li> <li>– превышение температуры в +220 °С приводит к разложению пластика;</li> <li>– при повышении влажности уменьшается прочность, но возрастает эластичность</li> </ul>

Таблица 2 (окончание). Возможность печати материалами

Наименование материала	Условия обработки	Преимущества	Недостатки
Древесные имитаторы	о них немного рассказано далее в статье	– не подвержены деформациям при печати; – экологичны; – поддаются механической обработке: шлифовке, сверлению и пр.	– высокая стоимость
Имитаторы песчаника	температура экструзии +165...+190 °С	– высокая степень сходства с натуральным песчаником при температуре экструзии свыше +210 °С; – отсутствуют деформации при усадке	– высокая стоимость
Бумага		– модель формируется за счет вырезанных и склеенных слоев из листов бумаги	– модели непрочны
Гипс		– дешевизна	– модели недолговечны
Бетон	Используется усовершенствованный сорт бетона, формула которого на 95% совпадает с формулой обычного бетона		
Лед	В качестве материалов используются вода и метиловый эфир, подогретый до температуры +20 °С, печать при –22 °С		
Металл	Поскольку данные материалы наиболее интересны в радиоэлектронной отрасли, на них будет акцентировано внимание далее в статье		
Керамика			
Гидрогель			

• пластик ABS (наиболее распространенный) легко подвергается корректирующей деформации после нагрева теплым воздухом.

Такой принтер недорого стоит, прост в эксплуатации и настройке. Конечно, он не позволит выполнить деталь быстро и с высоким разрешением, но зачастую при разработке конструкции есть день-два в запасе. За неточное сопряжение в микронных посадках вряд ли оформят выговор, а вот когда по ошибке направляющие штыри-ловители не совпадут с ловушками, это грозит неприятностями. Проверить такие неточности вполне позволит довольно простой настольный принтер.

Существуют и более сложные системы. Причем усложнение касается не только точностей, скоростей изготовления и обработки моделей. Также сейчас на рынке можно найти принтеры, печатающие одновременно несколькими материалами, не обязательно пластиками. На сегодня подтверждена возможность печати материалами, приведенными в таблице 2.

Также известны пригодные для печати глиняные смеси, гипсы, известковые составы и порошки, органические клетчатые. Уверен, что есть и другие материалы, пригодные для печати, которые разработаны, испытываются и, возможно, появятся в самое ближайшее время, просто пока они не были представлены в открытом доступе. О том, что придумают инженеры и энтузиасты и какие материалы появятся в ближайшем будущем, остается лишь догадываться. Рассмотрим более подробно два направления печати, появившихся относительно недавно: печать металлов и печать керамики на 3D-принтерах.

### Печать металла

Честно говоря, впервые столкнувшись с демонстрацией возможностей промышленных принтеров, я был поражен не самой возможностью спекания порошка металла лазером, а веществом, спекаемым в машине. Многие из нас в детстве с помощью напильника получали алюминиевый или магниевый порошок, при добавлении к марганцовке (и другим составам) все это очень зрелищно вспыхивало с выделением клубов белого дыма, а порой и взрывалось. А здесь — чистые магниевые и алюминиевые сплавы плавятся лучом лазера, и ничего. В детстве за такую емкость с маг-

ниевым мелкодисперсным порошком Родину, конечно, не продали бы, но отдали бы многое. Это было, разумеется, первое, скорее ностальгическое впечатление.

Одна из машин, с которой мне довелось ознакомиться, использует инертную среду при работе лазера (сразу уточню: лазеров может быть несколько, что значительно увеличивает производительность). Принцип аналогичен песчаным и пластиковым принтерам: сепаратор насыпает слой материала минимальной толщины, после чего лазерный луч спекает частицы по требуемой геометрии. Естественно, такая технология позволяет получить детали с геометрией, которую невозможно достичь стандартными технологиями (литье, штамповка, ковка, сверловка, фрезеровка и т. д.). И точность более чем достаточная: десятки и единицы микрон, правильное расположение детали не позволит увидеть слойность.

Сразу возникает вопрос о надежности такой детали: насколько сопоставима литьевая де-

таль и выращенная на 3D-принтере? Фирмы-производители утверждают, что используемые NASA принтеры позволили изготовить детали для ракетных двигателей J-2X и RS-25 из никелевых сплавов (рис. 3).

Такие детали несколько уступают по плотности материала деталям, изготовленным литьем с последующей сваркой. При этом сварной шов — потенциальное место образования отказа, и минимизация лишних стыковочных или сварных мест — определенный плюс технологии.

Проводились исследования надежности напечатанных деталей и в нашей стране, такую информацию можно найти в открытом доступе на сайте Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) [2]. Был исследован высокохромистый жаропрочный сплав на никелевой основе ЭП648-ВИ собственного производства ВИАМ. Результаты показали, что полученные детали имеют объемную долю пористости 0,07% и высокие механические свойства, соответствующие (или превышающие) максимальные паспортные значения для литого материала. Снимки микрошлифов полученных кубических образцов приведены на рис. 4.

Даже неспециалисту в литье металлов, полагаю, видно, что зерна полученного лазерным сплавлением образца сопоставимы, а после отжига и вовсе меньше аналогичных у литого образца. Конкретные механические параметры образцов в сравнении с литой деталью после термической обработки приведены в таблице 3.

Особо обращаю внимание — это материал собственной разработки.



Рис. 3. Детали для ракетных двигателей J-2X и RS-25 из никелевых сплавов

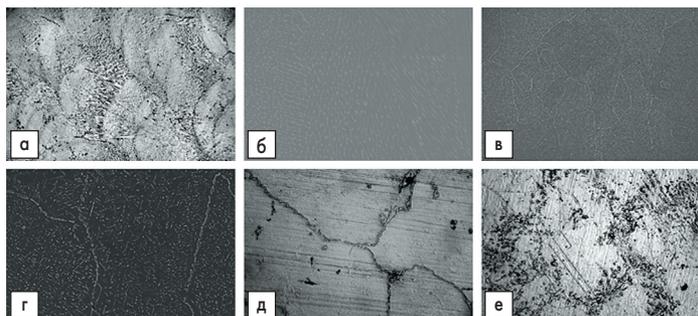


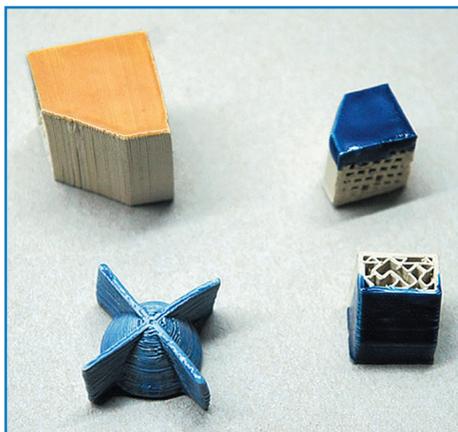
Рис. 4. Микрошлифы образцов по SLM-технологии. До термической обработки: а)  $\times 500$ , б)  $\times 3000$ ; после термической обработки: в)  $\times 600$ , г)  $\times 2500$ ; в сравнении с литым металлом: д)  $\times 500$ ; деформированным металлом после термической обработки: е)  $\times 500$

**Таблица 3.** Конкретные механические параметры образцов в сравнении с литой деталью после термической обработки

Состояние образца	$\sigma_a$	$\sigma_{0,2}$	$\delta_5$	$\psi$
	МПа		%	
SLM (N <sub>2</sub> )	840	695	10,4	7
SLM+TO	965	665	7	8
Литой с термической обработкой	785–880	585–690	4–7	4–7

С литьем более-менее ясно: быстрее, как минимум не хуже, минимальная финишная доработка. При фрезеровке неоспоримым преимуществом (наравне с сопоставимыми точностями обработки) является большая скорость, отсутствие постоянного контроля за инструментом. Потери рабочего материала минимальны: в сравнении с 40–90% материала, уходящими в стружку при фрезеровке, теряется только несколько процентов металлического порошка от исходной массы.

Еще одним неоспоримым преимуществом по сравнению с любым другим процессом металлообработки является существенное уменьшение массо-габаритных характеристик деталей. Согласно расчетам, переработка детали на 3D-принтере может дать до 40% экономии. Причем в отличие от композитов



**Рис. 5.** Получаемые детали максимально близки по свойствам к «классической» керамике

(где, кстати, экономия не превысила 15%) деградации со временем не происходит.

Возможности применения таких принтеров почти универсальны: техника и медицина (всевозможные импланты не «общего назначения», а выполненные конкретно по вашей кости, суставу и т. п.), архитектура и элементы декора, любые запчасти и даже поварешки на кухню — словом, все, что вы сумеете придумать и изобразить в CAD.

Ну и в заключение части, посвященной работе с металлами, отмечу, несколько таких машин поступили «на вооружение» ВС США. Они позволили заменить ангары запчастей на военных базах на две машины (принтер и высокопроизводительный фрезерно-токарный центр финишной обработки) и два рабочих места с архивом моделей. Везти и транспортировать любую деталь (при условии «наличия на складе») значительно дороже, чем изготовить ее на месте. И даже если не подойдет, исправленную деталь все равно быстрее распечатать вновь.

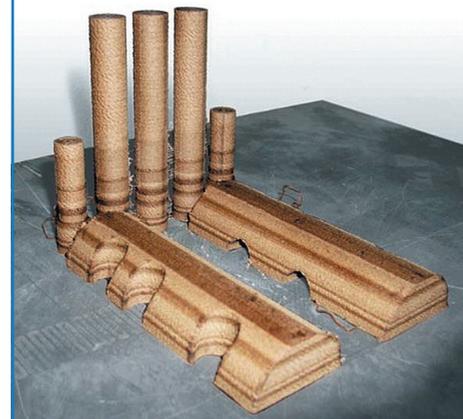
### Печать керамики

Возможность печати керамических деталей — тоже нововведение в 3D-печати. Существует авторская разработка изобретателя материалов Кая Парти, создавшего керамическое волокно LAYCeramic, состоящее из полимера и керамического порошка [3]. По окончании печати (экструзии) такой материал спекается при +1200 °С. Получаемые детали максимально близки по свойствам к «классической» керамике (рис. 5). Но при спекании происходит достаточно существенная усадка — порядка 20–25% от исходного объема изделия. Довелось видеть на выставке и более совершенные модели, визуально неотличимые от «классических», но, к сожалению, найти информацию по данной технологии не удалось.

За рубежом значительно развито направление экологичной электроники, не загрязняющей окружающую среду (нашу страну это направление затронуло в основном по директиве о бессвинцовой пайке). В дан-

ном ключе, по информации PopularScience, была разработана печать необычным материалом — целлюлозой, по сути, древесиной (рис. 6). Одной из первых проблем, с которыми столкнулись ученые из шведского университета Чалмерса, стала невозможность ее расплавления. Для решения данной проблемы волокна целлюлозы были смешаны с гелем на основе воды. Печать проводилась на биопринтере, используемом для выращивания клеток, имплантируемом пациенту. Следующей трудностью стала невозможность высушить или полимеризовать объект. Была придумана оригинальная технология заморозки, при которой удаляется вода. Еще одним оригинальным решением стала возможность интеграции в объект нанотрубок углерода, что позволило получить проводящие структуры. Возможности применения такого материала ограничены, пожалуй, только фантазией инженера [4].

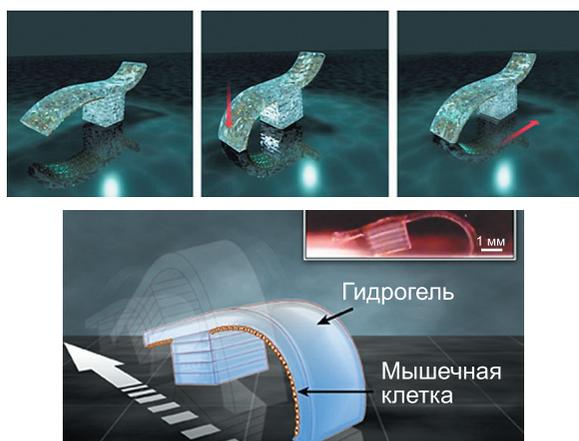
Другим примером «деревянного» материала, пусть и с пластиковыми присадками, может быть разработка уже упоминавшегося Кая Парти. Он разработал специальное деревянное волокно для 3D-печати. Волокно состоит из дерева и полимера и по своим свойствам похоже на полилактид (PLA). Комбинированный материал позволяет получить долговечные и твердые модели, которые внешне выглядят как деревянные изделия и имеют запах свежеспиленного дерева. При этом, варьируя температуру печати, можно получать различные оттенки дерева — от светлых до черных тонов. В комбинации все это предполагает создание моделей, имитирующих дерево не только по запаху и внешнему



**Рис. 7.** Модели, имитирующие дерево не только по запаху и внешнему виду, но даже и с годовыми кольцами на срезе



**Рис. 6.** Печать необычным материалом — целлюлозой



**Рис. 8.** Трамплин из подставки и небольшой планки, изгиб которой толкает всю конструкцию вперед

виду, но даже и с годовыми кольцами на срезе [5]. Примеры таких моделей приведены на рис. 7.

Все эти применения безусловно интересны и перспективны для меня как технолога, но есть область знаний, которая действительно поражает. Уже не нужно фантазировать, можно увидеть выращенные 3D-печатью биологические объекты:

- печень, клетки которой наносятся на глюкозный каркас, и лабораторная мышь живет три месяца с данной печенью [6];
- печать щитовидной железы лабораторной мыши;
- первые импланты кости [7] и зуба;
- напечатанная человеческая кожа [8];
- многие другие опытные работы в медицинском направлении.

Здесь намного больше проблем и ограничений, но есть искренняя надежда, что уже нынешнее поколение сможет воспользоваться всеми преимуществами 3D-печати в медицине.

Приведу еще один пример удивительных возможностей, находящийся на стыке техники и медицины, — синтетической биологии. В Иллинойском университете (США) ученым удалось разработать биоробота. Суть разработки заключается в том, что на конструкцию из гидрогеля нанесли сердечные клетки лабораторной мыши. Конструкция (рис. 8) представляет собой трамплин из подставки и небольшой планки, изгиб которой толкает всю конструкцию вперед. Длина всей конструкции составляет примерно 7 мм, а максимальная скорость передвижения — 236 мкм/с. Более подробно аналогичную разработку можно посмотреть по ссылке [9].

Все приведенные в статье классификации технологий и используемых материалов, примеры конкретных и перспективных реализаций говорят только об одном: мы стоим на пороге изменений не только самого процесса изготовления изделий, но и самого подхода к проектированию. Нужно учиться по-другому задумывать само изделие, ведь теперь существует только одно ограничение — ваша фантазия. ■■■■

## Литература

1. [www.phys.org/news/2015-06-mx3d-3d-print-steel-bridge-amsterdam.html](http://www.phys.org/news/2015-06-mx3d-3d-print-steel-bridge-amsterdam.html)
2. [viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=772](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=772)
3. [www.3dindustry.ru/article/2149/](http://www.3dindustry.ru/article/2149/)
4. [www.popsci.com/now-you-can-3d-print-things-out-biodegradable-cellulose](http://www.popsci.com/now-you-can-3d-print-things-out-biodegradable-cellulose)
5. [www.n3d.biz/3d-materialy/kaj-parti-vyshel-na-rynok-3d-pechati-s-novym-materialom-laywood-flex.html](http://www.n3d.biz/3d-materialy/kaj-parti-vyshel-na-rynok-3d-pechati-s-novym-materialom-laywood-flex.html)
6. [www.hi-news.ru/technology/uchenye-iz-mit-sozdali-na-3d-printereminiatyurnuyu-pechen-dlya-proverki-novykh-lekarstv.html](http://www.hi-news.ru/technology/uchenye-iz-mit-sozdali-na-3d-printereminiatyurnuyu-pechen-dlya-proverki-novykh-lekarstv.html)
7. [www.vesti.ru/doc.html?id=1433978&cid=2161](http://www.vesti.ru/doc.html?id=1433978&cid=2161)
8. [www.hi-news.ru/technology/loreal-i-organovo-sobirayutsya-pechatatkozhu-cheloveka-na-3d-printere.html](http://www.hi-news.ru/technology/loreal-i-organovo-sobirayutsya-pechatatkozhu-cheloveka-na-3d-printere.html)
9. [www.gizmag.com/walking-bio-robot-spinal-muscle/32804](http://www.gizmag.com/walking-bio-robot-spinal-muscle/32804)