

УДК 621.9.06, 67.02

Матюшкин Л. Б., аспирант, ассистент

Пермяков Н. В., аспирант, ассистент

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»

# Применение технологии 3D-печати в обеспечении профессионально ориентированной подготовки кадров в интересах nanoиндустрии<sup>1</sup>

Ключевые слова: материаловедческая лаборатория, прототипирование, 3D-принтер.

Keywords: material science lab, prototyping, 3D printer.

*Представлен обзор российской и зарубежной литературы по вопросам 3D-принтеров и описаны основные методы трехмерной печати. Особое внимание уделено экструзионной технологии. Приведены физико-химические характеристики материалов для этой технологии. Рассмотрены вопросы модернизации 3D-принтера Prusa Mendel и примеры его использования в современной учебно-научной материаловедческой лаборатории. Методами атомно-силовой микроскопии исследованы процессы изменения морфологии пластика ABS при воздействии ацетона.*

## Введение

3D-печать стремительно набирает популярность, появляются все более доступные 3D-принтеры, каждый день в средствах массовой информации публикуются сообщения о новых достижениях, организуются научно-технические симпозиумы, конференции и семинары [1]. Имеющиеся на сегодня возможности печати трехмерных объектов емко описаны в публикации [2], существенно дополненной в русском переводе [3]. Быстрое развитие направления требует систематизации накопленных

данных. Настоящая статья представляет обзор современного состояния вопроса, приведены примеры использования данной технологии в лаборатории «Наноматериалы» кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

Сегодня технология 3D-печати активно используется в следующих областях:

- **изготовление прототипов** моделей и объектов для дальнейшей доводки, прототипирование в целях более быстрой реализации идеи, снижения затрат на освоение и производство новой продукции, уже применяются в дизайне [4, 5];
- **создание демонстрационного материала**, применяемого в учебной практике (например, макетов для курса истории развития механических блоков и устройств [6]) или визуализация работы механизма «изнутри» при использовании прозрачных материалов, например для изучения тока масла в трансмиссии автомобиля;
- **организация мелкосерийного производства** деталей, изготовление корпусов экспериментальной техники (автомобили, телефоны, радиоэлектронное оборудование);
- **изготовление моделей и форм для литейного дела**, применяемых энтузиастами для литья металла, с пластиковых моделей [7];
- **формирование эластичных деталей для «мягкой» робототехники** [8], создание динамически перестраивающихся моделей и 4D-печать, в которой роль четвертого измерения играет время [9];
- **изготовление имплантатов и протезов** из биосовместимых материалов, синтетическое замещение костного материала [10, 11], ортопедия и стоматология;
- **биопечать**: из капель с двойным липидным слоем были созданы материалы сложной структуры,

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашения № 14.132.21.1697, 14.132.21.1703), проекта по программе «УМНИК» и программы стратегического развития университета СПбГЭТУ «ЛЭТИ» «Развитие междисциплинарных исследований и инструментально-технологической базы как основа непрерывно инженерного образования по приоритетным направлениям российской экономики на 2012–2016 годы».

близкой по физическим свойствам к биологическим тканям [12], ведутся эксперименты для разработки технологии печати стволовых клеток для донорских органов [13, 14];

- создание продуктов пищевого производства, синтезаторы пищевых продуктов [15, 16];

- формирование частей зданий и сооружений для ускорения процесса их постройки [17].

Распространение идей трехмерной печати во многом обусловлено бурным ростом интернет-ресурсов, где размещены бесплатные базы моделей. Благодаря им можно за считанные минуты загрузить и распечатать модель, а также поделиться собственными моделями и идеями новых моделей. Наиболее активно развиваются сайты Thingiverse [18], GrabCAD [19] и др. [20, 21], в том числе русский сайт [22].

Для материаловедческих лабораторий особый интерес представляют возможности изготовления собственного лабораторного оборудования и специализированной посуды [23]. На сайте Thingiverse имеются готовые модели деталей орбитального шейкера [24], оптического микроскопа [25], центрифуги [26], колориметра [27], держателя пробирок Эппендорфа [28] и многих других готовых к печати устройств [29]. Материаловедческой лаборатории 3D-принтеры позволяют сэкономить существенные средства в сравнении с использованием промышленных установок — сотни и тысячи долларов [30].

Стоит отметить, что значительная доля производителей 3D-принтеров пока ориентирована на промышленный сектор. Инициатива RepRap [31] направлена на изготовление самореплицируемых настольных 3D-принтеров, собираемых из частей, напечатанных такими же принтерами, а также легкодоступных и широко распространенных конструкционных и радиоэлектронных деталей. Рассматриваемая в данной работе модель Prusa Mendel [32] является наиболее популярным примером данной стратегии.

### Основные направления технологии трехмерной печати

В основе всех технологических подходов к созданию объемных объектов на 3D-принтерах лежит принцип послойного воспроизведения компьютерной модели. Модель объекта разбивается на множество двухмерных слоев с одинаковой толщиной слоя (шагом печати), на который после создания слоя перемещается либо сам объект, либо часть принтера, формирующая этот слой. Приведем наиболее общее описание основных направлений технологии трехмерной печати:

- **Лазерная стереолитография (stereo laser lithography, SLA):** объект формируется из жидкого фотополимера, затвердевающего под воздействием лазерного луча. После того как на подложке формируется первый слой разрабатываемого объекта, объект погружается в фотополимер на толщину одного слоя, чтобы приступить к формированию следующего.

- **Лазерное спекание порошков (selective laser sintering, SLS):** объект формируется из порошкового пластика, металла или керамики. Тонкий слой материала спекается лазерным лучом. Аналогично методу лазерной стереолитографии платформа опускается на толщину одного слоя и на нее вновь наносится порошкообразный материал. Такая технология не предполагает поддержку элементов, не имеющих опоры, так как пустоты между опорой и элементом заполнены порошком. Температура рабочей камеры обычно поддерживается на уровне чуть ниже точки плавления рабочего материала. Для предотвращения окисления процесс проводится в бескислородной среде.

- **Электронно-лучевая плавка (electron beam melting, EBM):** объект формируется путем плавления металлического порошка электронным лучом. Технология очень близка к лазерному спеканию порошков.

- **Экструзионная печать или технология послойного наплавления материала (fused deposition modeling, FDM):** объект формируется путем послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, металл, воск). Термопластичный материал выдавливается через разогретое сопло экструдера на неподвижную платформу, имеющую меньшую, чем сопло, температуру, формируя слой объекта. После этого головка поднимается на толщину одного слоя для нанесения следующего. Последующие слои ложатся на предыдущие, затвердевают и соединяются между собой. В промышленных принтерах участвуют две рабочие головки: одна — для рабочего материала, другая — для материала поддержки.

- **Ламинирование листовых материалов (laminated object manufacturing, LOM).** Объект формируется послойным склеиванием тонких пленок рабочего материала, например бумаги, с вырезанием с помощью лазерного луча соответствующих контуров каждого слоя.

Точность изготовления объектов с применением разных методов и различных установок находится в диапазоне 25–300 мкм. Наилучшим разрешением пока обладает метод лазерной стереолитографии.

### Характеристики материалов, используемых в экструзионной 3D-печати

В связи с выбранной нами моделью 3D-принтера особое внимание мы уделим экструзионной печати. История развития направления и происхождение конкретных моделей принтеров из других экструзионных принтеров рассмотрены в работе [33]. Теоретические исследования особенностей процесса экструзии частично представлены в работе [34]. В общих чертах процесс экструзионной печати описан выше, однако следует иметь в виду особенности конкретной реализации принтера и печатаемых моделей.

Изготовление сложных моделей требует наличия элементов, поддерживающих конструкцию в про-

Физические и химические свойства материалов и особенности процесса печати					
Название	Химическая формула	Температура экструзии $T_3, ^\circ\text{C}$	Температура подложки $T_n, ^\circ\text{C}$	Материал подложки	Особенности материала и печати
Акрилонитрилбутадиенстирол	$((\text{C}_8\text{H}_8)_x \cdot (\text{C}_4\text{H}_6)_y \cdot (\text{C}_3\text{H}_3\text{N})_z)_n$ (смесь трех компонентов)	180–250	90–110	Каптон	Наиболее широко распространенный, относительно дешевый, растворяется в ацетоне
Полилактид	$(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3)_n$	160–220	20–60	Акрил, каптон	Биоразлагаемый, относительно дорогой
Поливиниловый спирт	$(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$	180–200	50	Акрил, каптон	Растворимый в воде, применяется в качестве материала поддержки
Полипропилен	$(\text{C}_3\text{H}_6)_n$	130–180	20–60	Скотч	Химически инертный, необходима низкая скорость движения экструдера

цессе печати и предотвращающих провисание нагретого материала. В промышленных принтерах для этого обычно используется материал поддержки, который можно легко удалить, не повредив основной материал. В качестве первого наиболее часто используется водорастворимый поливиниловый спирт, в качестве второго — пластики ABS или PLA.

Пластик ABS традиционно применяется для корпусов электронных бытовых приборов, мебели, канцелярских изделий, детских конструкторов, смарт-карт и т. п. Отчет о токсичности пластика ABS был представлен в 1989 году [35]. Пластик представляет собой смесь трех компонентов, поэтому материалы разных производителей слегка различаются, что также приходится учитывать в процессе печати.

В таблице представлены характеристики трех наиболее распространенных материалов для экструзионной печати, а также химического инертного полипропилена.

При дополнительной модификации 3D-принтера возможно использование легкоплавких сплавов Розе, Вуда и др., нейлона [36, 37], полиэтилентерефталата, фарфоровой глины и даже шоколада [38, 39]. Для жидких веществ и паст предлагается изменение конструкции — замена экструзионного механизма на мотор, выдавливающий материал из шприца [40].

### Модернизация 3D-принтера Prusa Mendel

Модель Prusa Mendel была выбрана с учетом следующих качеств:

- простоты конструкции, легкости замены деталей и модификации;
- большого числа вариантов исполнения и обширного сообщества пользователей;
- открытого программного и аппаратного обеспечения.

Внешний вид принтера показан на рис. 1 и 2. Несущая конструкция представляет собой треугольную призму. Перемещение подвижных элементов осуществляется при помощи четырех шаговых дви-

гателей, а именно одной двойной винтовой передачи (перемещение по оси  $z$ ) и двух реечных передач (перемещение по осям  $x$  и  $y$ ). Подложка перемещается по оси  $y$ , печатающая головка — по осям  $x$  и  $z$ . Еще один шаговый двигатель по мере печати производит подачу прутка материала в сопло экструдера.

Принтером управляет подключенный к компьютеру микроконтроллер Arduino Mega с платой расширения RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield). К плате расширения подключен блок питания ATX, обеспечивающий питание шаговых двигателей и нагревательных элементов подложки (20–110 °C) и сопла экструдера (20–250 °C). К этой же плате подсоединены три концевых выключателя, определяющих положение начала координат, а также датчики температуры подложки и экструдера.

Как же происходит процесс печати? При помощи специализированного программного обеспечения для проектирования трехмерных моделей, будь то профессиональные проприетарные пакеты (Компас 3D, Solidworks, AutoCAD) или свободно распространяемые продукты (OpenSCAD, SketchUp, Blender), создается модель в формате STL. Эта модель загружается в программу, которая в соответствии с текущими настройками разбивает модель на слои и для каждого слоя пишет инструкцию с параметрами печати — последовательностью команд, которые выполнит принтер. В качестве текущих настроек оператор задает диаметр прутка материала, высоту слоя, скорость перемещения, отношение заполнения к общему материалу к общему объему (коэффициент заполнения), температуры сопла и подложки.

Далее подготавливается к работе сам принтер, включаются нагреватели, оператор проводит проверку точности перемещения подвижных частей, в частности перемещения экструдера по оси  $z$ , количество подаваемого материала, качество прижима сопла экструдера к текущему слою.

Принтер начинает печать в точке, соответствующей началу координат, причем особенно важно точно задать исходное положение экструдера относительно оси  $z$ . Далее формируется «юбка»: рас-

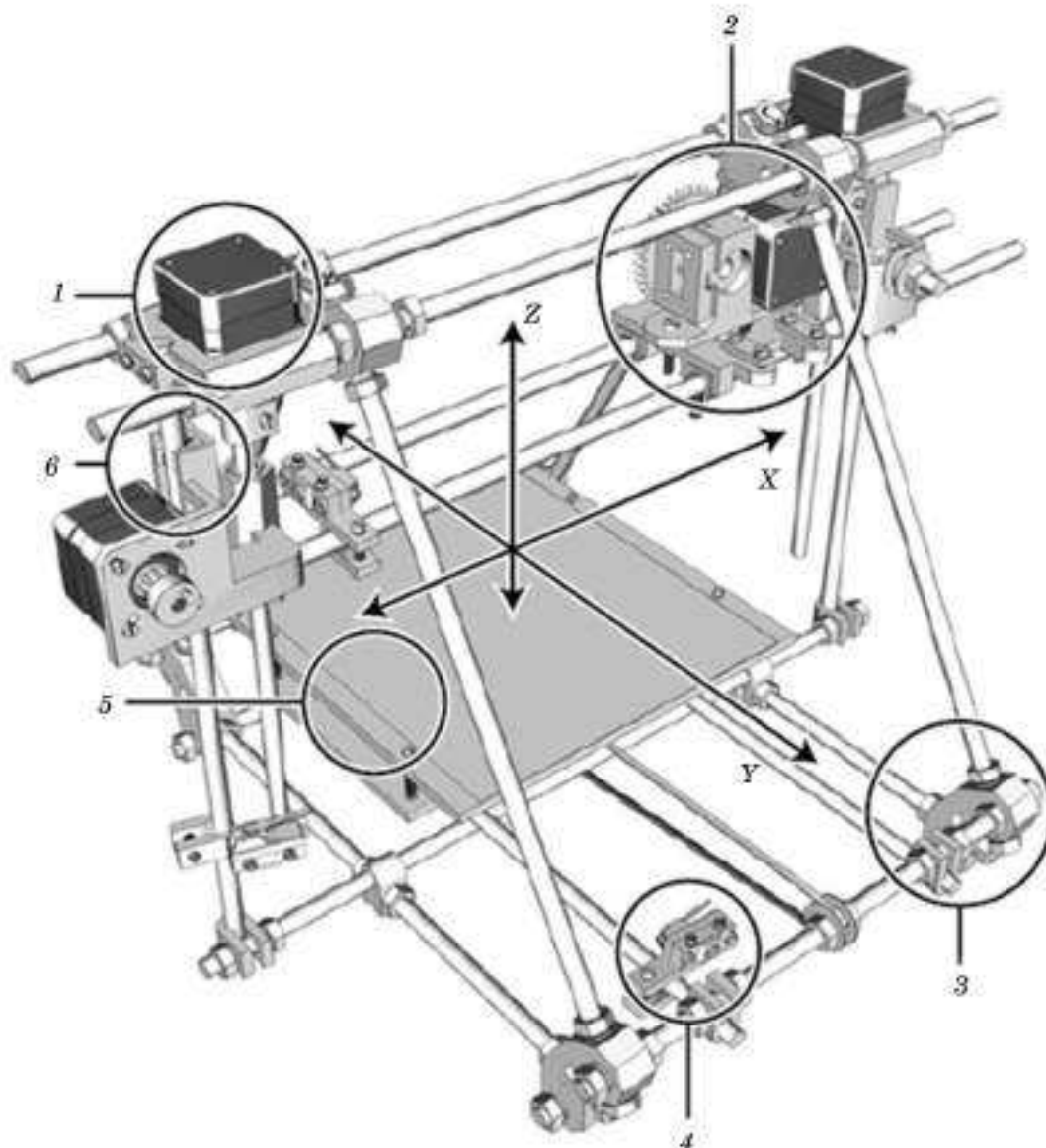


Рис. 1 3D-принтер Prusa Mendel:  
1 — шаговый двигатель; 2 — экструдер; 3 — рама; направляющие; 4 — концевой выключатель; 5 — подложка (рабочая поверхность); 6 — направляющие [41]

плавленным пластиком, вытекающим из сопла экструдера, на некотором расстоянии от будущей детали создается концентрическая линия, по которой оператор определяет, хватает ли зазора между соплом экструдера и подложкой, чтобы напечатать слой. Если эта проверка проходит успешно, он приступает к созданию первых адгезионных слоев со сплошным заполнением. Для последующих слоев вначале печатается периметр, потом проводится заполнение внутренней части с заданным ранее коэффициентом заполнения. После окончания печати экструдер отводится от детали, и, как только деталь остывает до комнатной температуры, ее снимают с подложки.

В ходе работы было предложено несколько конструктивных решений, реализованных при помощи самого принтера и позволивших улучшить

качество и точность печати. Так были изготовлены детали для подстройки расположения подложки и элементы, благодаря которым можно более точно задать положение экструдера по оси  $z$ . Для решения проблемы вогнутой поверхности нагреваемой плиты было использовано боросиликатное стекло, закрепляемое относительно подложки при помощи зажимов, позволяющих легко снимать стекло и заменять поверхностный слой подложки (каптон или скотч).

Максимальные размеры печатаемой модели —  $20 \times 20 \times 12$  см, линейное разрешение минимального элемента — 300 мкм. Хотя описанные выше материалы, из которых изготавливаются модели, являются безопасными, нежелательно вдыхание молекул полимерного материала в расплавленном и паро-

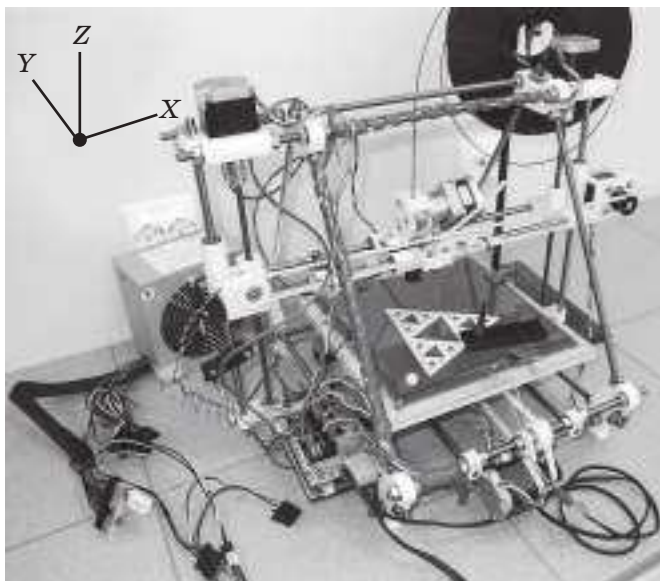


Рис. 2 3D-принтер Prusa Mendel вместе с электронными компонентами, мотком пластика ABS и примерами печати на подложке

образном состоянии. Для изоляции принтера была составлена конструкция (рис. 3): принтер находится в полипропиленовом боксе (130 л, Samla, Швеция), подсоединенном к системе вытяжки помещения лаборатории. Дополнительное создание тяги внутри бокса обеспечивается двумя вентиляторами, встроенными в крышку бокса, получающими питание от того же блока, что и принтер внутри него. Тяга также обеспечивает равномерное охлаждение печатаемой детали. Кроме того, в боксе размещена bobина с прутком материала. В нерабочее время бокс служит удобным контейнером для хранения сопутствующих деталей, материалов и простой транспортировки прибора.

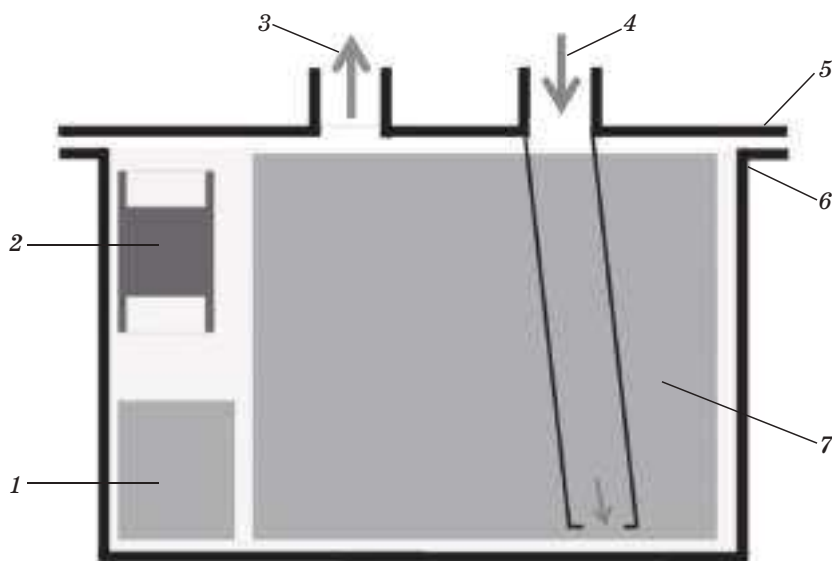


Рис. 3 Схема размещения 3D-принтера в полипропиленовом боксе с использованием вытяжной системы: 1 — блок питания АТХ; 2 — bobина с прутком; 3 — к вытяжке; 4 — входной вентилятор; 5 — крышка; 6 — бокс; 7 — принтер

Примеры использования технологии трехмерной печати в научно-учебной лаборатории

**Визуализация предметных моделей.** Лаборатория активно занимается диагностикой и модификацией наноматериалов методами сканирующей зондовой микроскопии и готовит специалистов в данной области [42]. На рис. 4, а приведена модель чувствительного элемента атомно-силового микроскопа. От размера и аспектного соотношения острия зависят методика сканирования и качество результата. Модель используется для наглядности описания особенностей процесса сканирования во время лекций и лабораторных работ, а также на встречах с абитуриентами.

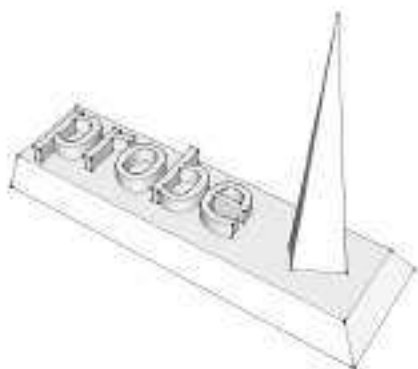
Наибольшая наглядность подобных моделей достигается при использовании нескольких цветов. Для создания цветных моделей используются:

- покраска модели после изготовления;
- замена прутка в процессе печати либо окрашивание мотка с прутком помещением его части в раствор с краской (обеспечивается периодическая смена цвета при печати модели);
- использование экструдеров сложного типа, в которых два вида прутка или более подаются в промежуточный объем для перемешивания и плавного изменения цвета при выдавливании смеси.

Аналогичным образом фрактальные представления [43–45] и модели иерархического построения наноматериалов [46, 47], используемые в материаловедении газочувствительных сенсоров, показаны на примере классических математических фракталов (рис. 4, б). Такие макеты позволяют проводить переход от математической модели с бесконечной рекурсией к физическим фракталам, обладающим естественными ограничениями.

а)

I

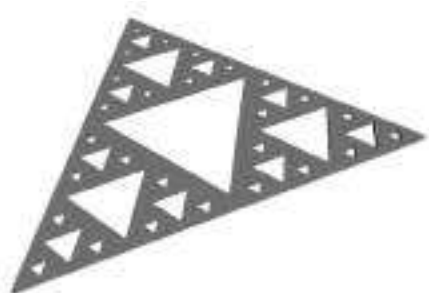


II

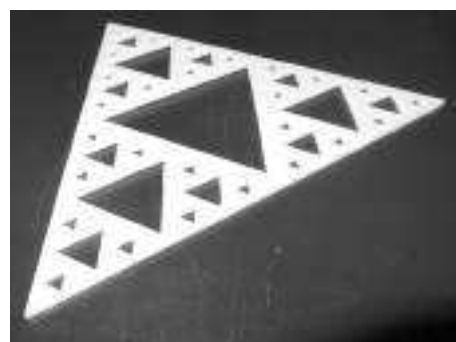


б)

I



II



в)

I



II



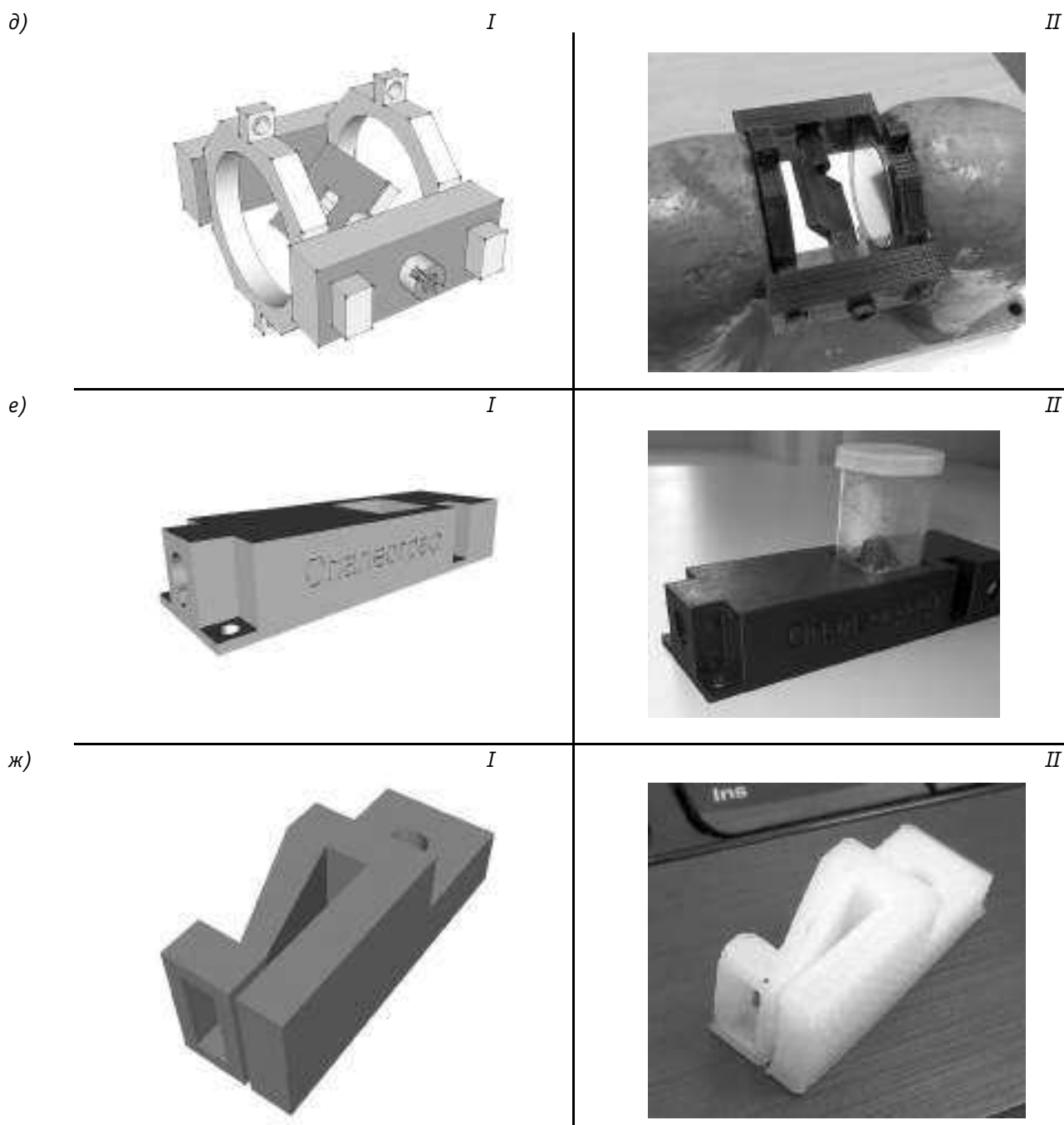
г)

I



II





**Рис. 4** Примеры печати различных моделей из пластика ABS (черный) и полипропилена (светлый): а — модель зонда атомно-силового микроскопа; б — модель фрактала; в — держатель твердых образцов для спектрофотометра ПЭ-5400УФ; г — держатель пробирок для размещения в термостате или ультразвуковой ванне; д — детали стенда для измерения изменения сопротивления в магнитном поле; е — корпус прибора для проведения турбидиметрического анализа коллоидных растворов; ж — химически инертный держатель подложек: I — модель; II — результат печати

**Расширение возможностей специализированного оборудования.** Используемый для проведения оптических измерений спектрофотометр ПЭ-5400УФ в стандартной комплектации не оснащается держателем твердых образцов. Необходимость таких измерений обусловлена исследованиями спектров поглощения разрабатываемых в лаборатории газочувствительных материалов на основе оксидов металлов [48–50] и пористых мембран оксида алюминия [51].

Изготовленный для этих целей держатель (рис. 4, в) имеет две щели: одну — для размещения исследуемой пластины и другую, перпендикулярную ей, — для прохождения оптического луча через пластину.

Держатель пробирок для циркуляционного термостата и ультразвуковой ванны показан на рис. 4, г. Данная конструкция решает проблему фиксации пробирок и обеспечения меньшей по сравнению с металлическим держателем теплопроводности при



Рис. 5 | Поперечные срезы печатаемых моделей с различными внутренними заполнениями слоя

минимальном объеме конструкции. Пластик ABS не размягчается под воздействием паров воды, обладает пластической гибкостью и позволяет удерживать пробирки за счет упругих сил, возникающих при деформации пластика.

**Создание конструкционных частей экспериментальных установок.** Лаборатория также активно занимается синтезом и исследованием магнитных материалов [52–53]. Конструкция установки для измерения магнетосопротивления (рис. 4, д) состоит из нескольких подвижных относительно друг друга элементов для закрепления образца, электрический контакт и угол относительно линий магнитного поля, обеспечивая измерение сопротивления в поле, создаваемом постоянным магнитом.

**Корпусирование экспериментальных приборов.** Существенные усилия лаборатории направлены на освоение методик синтеза коллоидных полупроводниковых нанокристаллов [54]. На рис. 4, е представлен корпус прибора для динамических измерений оптической плотности растворов методом турбидиметрии. Корпус обеспечивает закрепление и строго заданное относительное положение основных деталей: лазера, фотосопротивления, радиодеталей и кюветы с исследуемым коллоидным раствором.

**Изготовление компонентов приборов из химически инертных материалов.** Еще одним важным направлением работы лаборатории является получение пористых слоев кремния электрохимическим способом [55–57]. Для этих целей в лаборатории была разработана специальная электрохимическая ячейка [58]. Данное направление, как и получение пористых мембран из оксида алюминия, требует деталей, изготовленных из химически инертных материалов, в чем также может оказать содействие технология трехмерной печати.

В данном случае использование пластика ABS неприемлемо, поэтому нами была освоена печать полипропиленом. Результаты поисков режимов печати приведены в таблице. На рис. 4, ж представлен полипропиленовый держатель подложек для автоматизированной установки, работающей с химически агрессивными средами.

#### Особенности внутреннего строения и рельефа поверхности моделей

Стоит отметить следующие особенности внутреннего строения получаемых моделей и возможности модификации их поверхности. Как было описано выше, только внешние поверхности детали печатаются

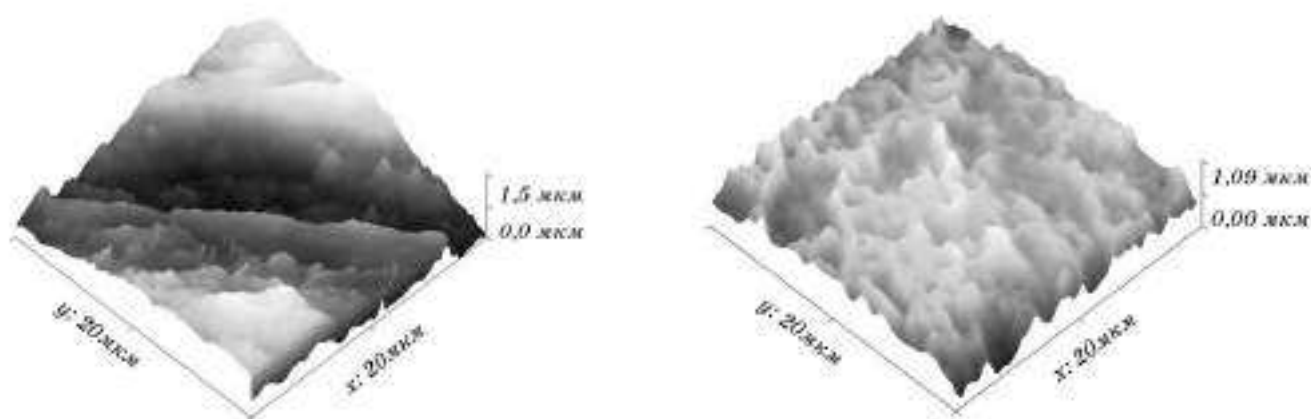


Рис. 6 | Изображения полученные атомно-силовым микроскопом рельефа поверхности детали до (а) и после (б) обработки ацетоном



сплошными, для внутреннего объема слоев задается некоторый коэффициент заполнения (рис. 5). Чем ближе он к единице, тем более плотно заполнен слой. Прочность и вес детали зависят от коэффициента заполнения и количества краевых слоев, число которых обычно задается равным трем. Малые коэффициенты заполнения позволяют изготавливать очень легкие модели и экономно расходовать печатный материал.

Разбиение на слои обуславливает еще одну особенность деталей — ступенчатый рельеф поверхности, заметный на готовых моделях. Для сглаживания получаемых деталей может использоваться метод, описанный в работе [59]. Объект помещается в объем, наполненный ацетоном, который нагревается до 90 °С. Под действием образующихся паров в течение 5–10 мин поверхность подтравливается и сглаживается. На рис. 6 показана рельефная поверхность объекта до и после воздействия капли ацетона. Подтравливание ацетоном также применялось нами для склейки крупногабаритных деталей, размеры которых выходили за границы области печати принтера.

### Заключение

Трехмерная печать является конкурентоспособной технологией организации мелкосерийного производства, где она может применяться для создания наглядных макетов, прототипирования и корпусирования изделий. В медицине технологии 3D-печати уже находят применение как средство изготовления имплантатов и протезов для стоматологии и ортопедии. В данной работе нами предложены решения некоторых задач учебно-научной лаборатории, которые, конечно, не исчерпывают возможные применения 3D-принтеров в данной области. Дана классификация методов 3D-печати, описана конструкция и принцип работы 3D-принтера Prusa Mendel, приведены характеристики используемых материалов, описан метод сглаживания рельефа поверхности.

### Литература

1. Первое мероприятие по 3D печати в Нидерландах // Habrahabr. URL: <http://habrahabr.ru/post/131460/>.
2. 3D Printing in 2012: Year In Review // 3D printer and 3D printing news. URL: <http://goo.gl/GxEYW>.
3. 3D принтеры. Обзор достижений за 2012 год // Habrahabr. URL: <http://habrahabr.ru/post/169437/>.
4. Серова В. Н. Получение полимерных изделий с применением лазерных технологий на примере лондонского Университета Метрополитан // Вестник Казанск. технол. ун-та. 2012. № 6. С. 76–78.
5. Серегин М. Ю. Краткий обзор современных материалов и технологий для прототипирования // Перспективы науки. 2012. № 6. С. 77–79.
6. Lipson H., Moon F. C., Hai J. et al. 3-D Printing the History of Mechanisms // Journal of Mechanical Design. 2005. Vol. 127. P. 1029–1033.
7. Литье по моделям напечатанным на 3D-принтере // Habrahabr. URL: <http://habrahabr.ru/post/154021/>.
8. Ilievski F., Mazzeo A.D., Shepherd R.F. et al. Soft Robotics for Chemists // Angew. Chem. 2011. Vol. 123. P. 1930–1935.
9. Скайлар Тиббитс: появление 4D печати // TED. URL: <http://goo.gl/c7rS5>.
10. Leukers B., Gulkan H., Irsen S. H. et al. Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing // Journal of materials science: Materials in medicine. 2005. N 16. P. 1121–1124.
11. Baby's life saved with groundbreaking 3-D Printed Device that restored his breathing // Science Daily. URL: <http://goo.gl/Q1Mci>.
12. Villar G., Graham A. D., Bayley H. A Tissue-Like Printed Material // Science. 2013. Vol. 340, N 6128. P. 48–52.
13. Jones A.F., Greenhough S., King J. A. et al. Development of a valve-based cell printer for the formation of human embryonic stem cell spheroid aggregates // Biofabrication. 2013. Vol. 5. P. 015013.
14. Composite tissue-engineered intervertebral disc with self-assembled annular alignment: United States Patent Application WO 20130079881 A1 / L. J. Bonassar, R. Hartl, R. D. Bowles et al.; Cornell University. N PCT/US2010/033752, filling date 5.05.2010, date of publ. 10.11.2010.
15. Hadhazy A. Will 3D Printers Manufacture Your Meals? // Popular Mechanics. URL: <http://goo.gl/TmKh7>.
16. Peckam M. NASA-Funded 3D Food Printer: Could It End World Hunger? // Time. News feed. URL: <http://goo.gl/CIqV>.
17. Khoshnevis B. Contour Crafting: Automated Construction // TED. URL: <http://tedxtalks.ted.com/video/TEDxOjai-Behrokh-Khoshnevis-Con/>.
18. Thingiverse // Thingiverse. URL: <http://www.thingiverse.com>.
19. GrabCAD // GrabCAD. URL: <http://grabcad.com>.
20. 3D ContentCentral // 3D ContentCentral. URL: <http://www.3dcontentcentral.com>.
21. 3D Warehouse // 3D Warehouse. URL: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>.
22. Сервис индустрии 3D печати // 3Dmarket. URL: <http://3dmarket.org>.
23. Homegrown labware made with 3D printer // Nature. URL: <http://goo.gl/oHvdD>.
24. Open Source Orbital Shaker // Thingiverse. URL: <http://www.thingiverse.com/thing:5045>.
25. A Fully Printable Microscope // Thingiverse. URL: <http://www.thingiverse.com/thing:77450>.
26. El-cheapo tabletop minifuge // Thingiverse. URL: <http://www.thingiverse.com/thing:33818>.
27. Colorimeter V0.0 // Thingiverse. URL: <http://www.thingiverse.com/thing:45443>.
28. Eppendorf tube 1.5 ml rack snap-together module // Thingiverse. URL: <http://www.thingiverse.com/thing:49398>.
29. Lab-equipment search results // Thingiverse. URL: <http://www.thingiverse.com/search?q=lab-equipment>.
30. Pearce J. M. Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware // Science. 2012. Vol. 337. P. 1303–1304.
31. RepRap // RepRap. URL: [http://reprap.org/wiki/Main\\_Page](http://reprap.org/wiki/Main_Page).
32. Prusa Mendel // RepRap. URL: [http://reprap.org/wiki/Prusa\\_Mendel](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel).