

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Синьков, В. Н. Тышкевич

Технология

3D сканирования и 3D печати

Электронное учебно-методическое пособие



Волжский
2019

УДК 004(07)
ББК 32.973.202я73
С 388

Рецензенты:

профессор кафедры «Фундаментальные дисциплины» филиала ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»» в г. Волжском,
доктор физико-математических наук
Кульков В. Г.,
директор ООО «КБ «Мин»», к.т.н., доцент
Моисеев Ю. И.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Синьков, А. В.

Технология 3D сканирования и 3D печати [Электронный ресурс]:
учебно-методическое пособие / А. В. Синьков, В. Н. Тышкевич; ВПИ
(филиал) ВолгГТУ, – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 3,2 МБ). –
Волжский, 2019. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул.
экрана.

ISBN 978-5-9948-3465-7

Содержит сведения по технологии 3D сканирования и 3D печати. Рассмотрены основные методы трехмерной печати. Особое внимание уделено технологии моделирования методом послойного наплавления *FDM (FFF)* и использованию *FDM 3D* принтеров на практике. Приводятся сведения по практическому использованию 3D сканеров для получения виртуальных моделей.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Компьютерная графика», обучающихся по направлениям бакалавриата: 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.04 «Программная инженерия» и других.

Ил. 69, табл. 3, библиограф.: 16 назв.

ISBN 978-5-9948-3465-7

© Волгоградский государственный
технический университет, 2019

© Волжский политехнический
институт, 2019

Содержание

1. Введение.....	4
2. История развития аддитивных технологий	5
3. Аддитивные технологии, их классификация и отличительные особенности.....	10
3.1. Технология моделирования методом послойного наплавления (<i>FDM</i>).....	12
4. Аппаратурная база аддитивных технологий, классификация, принцип действия, особенности эксплуатации.....	15
5. Особенности печати по <i>FDM</i> технологии.....	18
6. Материалы для <i>FDM</i> печати.....	23
7. Особенности подготовки модели к <i>FDM</i> печати.....	44
7.1. Настройка программы-слайсера <i>KISSlicer</i> для 3D принтера	46
8. Технология трехмерного сканирования.....	62
9. Лабораторная работа «Печать виртуальных трехмерных моделей на 3D принтере».....	67
Список использованной литературы.....	79

1. Введение

Широкое развитие методов компьютерного трехмерного моделирования, попросту *CAD* технологий, существенно повлияло на развитие новых средств для создания физических моделей на основе трехмерных цифровых. Все это можно именовать как технологии быстрого прототипирования или трехмерной печати. Они базируются на преобразовании электронных *CAD*-моделей в твердотельные физические формы с помощью специальных устройств- *3D* принтеров.

Аддитивное производство, или *3D* печать, началось с идеи быстрого прототипирования в 1980-е годы. Инженеры хотели найти быстрое решение для своих идей, быстро увидеть то, что придумали. С 1980-х годов эта технология улучшилась, появились новые техники, но самая первая была стереолитография. С того времени началась разработка новых технологий *3D*-печати, появились новые решения и возможность использовать для печати новые материалы.

По мнению Генерального директора Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ), академика РАН Е. Н. Каблова, доминантой национальной технологической инициативы должны стать аддитивные технологии, которые позволят промышленности перейти к производственным технологиям нового поколения. По его словам, для развития аддитивных технологий в нашей стране требуется тесная кооперация науки, промышленности и бизнеса. Необходимо объединить усилия проектных, творческих команд и динамично развивающихся компаний, которые готовы впитывать передовые разработки, подключить ведущие университеты, исследовательские центры, Российскую академию наук, крупные деловые объединения страны. ВИАМ является одним из ведущих центров развития аддитивных технологий в нашей стране и ведет большую координационную работу в этом направлении.

Говоря о мировом опыте, руководитель ВИАМ отметил рост рынка аддитивных технологий на 20%, при этом доля России составляет всего 1,7%. По его словам, главная задача – создать условия, чтобы промышленность более активно использовала возможности, которые предоставляют эти технологии. Как отметил Е. Каблов, пока в нашей стране реально работают лишь два уровня реализации аддитивных технологий: вспомогательное производство и изготовление демонстраторов, прототипов деталей и элементов конструкций без обеспечения требований конструкторской документации. Третий уровень, представляющий изготовление опытных и серийных партий деталей, лишь начинает развиваться. В 2015 году специалисты ВИАМ впервые в России по аддитивной технологии с применением отечественной металлопорошковой композиции изготовили завихритель фронтального устройства камеры сгорания перспективного авиационного двигателя ПД-14, отвечающий всем требованиям конструкторской документации.

В ВИАМ был организован замкнутый цикл аддитивного производства деталей сложных технических систем. Созданная инфраструктура позволяет в сжатые сроки разрабатывать технологии и изготавливать детали, отвечающие требованиям нормативной документации.

Важной задачей является и вопрос подготовки кадров. С этой целью был создан научно-производственного консорциума "Новые материалы и аддитивные технологии", в который вошли ВИАМ и ряд вузов. Для подготовки кадров кроме лабораторно-производственной базы необходимо и наличие учебно-методической литературы, которой сейчас явно недостает. В определенной степени издание настоящего пособия направлено на решение этой задачи.

В пособии рассмотрены следующие вопросы. Во втором разделе пособия приводятся исторические сведения развития аддитивных технологий и 3D печати. В третьем разделе представлена классификация аддитивных технологий и даны их отличительные особенности. В четвертом разделе приведена классификация, принцип действия и особенности эксплуатации аппаратной базы, используемой в аддитивных технологиях. В пятом разделе рассмотрены особенности печати по *FDM* технологии. Шестой раздел посвящен материалам для *FDM* печати на 3D принтерах. В седьмом разделе рассмотрены особенности подготовки модели к *FDM* печати. Восьмой раздел посвящен основам 3D сканирования. В девятом разделе приведена лабораторная работа по 3D печати, в которой отрабатываются основные навыки работы по подготовке виртуальных моделей к печати на 3D принтерах, работающих по технологии *FDM (FFF)*.

2. История развития аддитивных технологий

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х гг. XX в. [3]. Пионером в этой области являлась компания *3D Systems*, которая разработала первую коммерческую стереолитографическую машину – *SLA – Stereolithography Apparatus* (1986 г.). До середины 90-х гг. она использовалась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (*SLA*-машины), затем порошковые (*SLS*-машины), были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов – весьма скромный. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (*CAD*), моделирования и расчетов (*CAE*) и механообработки (*CAM*) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы 3D-принтеры.

Цифровые 3D-технологии открыли уникальные возможности воспроизведения сложнейших пространственных форм, объектов и инженерных конструкций, механизмов. Сначала эти технологии назывались «техноло-

гиями быстрого прототипирования» (от английского *RapidPrototyping*), однако термин *RP*-технологии довольно быстро устарел и в настоящее время не отражает в полной мере реальной сути технологии. Методами «быстрого прототипирования» сейчас изготавливаются коммерческие изделия, которые уже нельзя назвать прототипами – имплантаты и эндопротезы, инструменты и литейные формы, детали самолетов и спутников и многое другое.

Аддитивные технологии (от английского *Additive Fabrication*) или *3D* печать – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или *CAD*-модели) методом послойного добавления (*add*, англ. – добавлять, отсюда и название) материала. Получение изделия происходит послойно, путем формирования слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения *CAD*-модели. *3D* печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала.

Модельные (строительные) материалы могут быть жидкими (фотополимерные смолы, воски и др.), сыпучими (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов (полимерные пленки, листы бумаги и др.), а также в виде полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения.

При использовании *AF*-технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации находятся в единой технологической среде, где каждая технологическая операция выполняется в цифровой *CAD/CAM/CAE*-системе. Практически это означает реальный переход к «безбумажным» технологиям.

Аддитивные технологии охватывают все новые сферы деятельности человека. Дизайнеры, архитекторы, археологи, палеонтологи и представители других профессий используют *3D*-принтеры для реализации различных идей и проектов. Активно создаются роботизированные комплексы для «печати» быстротвердеющими бетонными смесями.

Аддитивные технологии – наиболее динамично развивающаяся отрасль. По мнению *Troy Jensen*, аналитика инвестиционного банка *Piper-Jaffray*, к 2020 г. ожидается увеличение рынка продаж *3D*-принтеров и услуг до 5,0 млрд. долларов. По данным *WohlersAssociates*, 38% мировой индустрии аддитивных технологий приходится на США, на втором месте Япония с 9,7%, за ней следует Германия с 9,4% и Китай с 8,7%.

Российский рынок составляет менее 0,5 % мирового, и в течение следующих пяти лет его темпы роста не увеличатся, отмечают в *Research.Techart*. Неудивительно, ведь развитие аддитивных технологий в России находится в зачаточном состоянии, основной причиной ситуации,

по мнению экспертов, является отсутствие поддержки со стороны государства. Для развития технологии необходима работа сразу в нескольких направлениях: и подготовка квалифицированного персонала, и формирование новых стандартов, и принятие новых нормативных документов. Не менее важной проблемой является отсутствие в России серийного производства порошков. Тем не менее, какие-то точечные действия в этом направлении предпринимаются как отдельными чиновниками, так и учеными. Западные аналитики рассматривают степень внедрения *AF*-технологий в материальное производство как надежный индикатор реальной индустриальной мощи государства.

Предшественниками современных *AF*-технологий считают две оригинальные технологии, появившиеся в XIX в. В 1890 г. *Josef E. Blanthier* предложил способ изготовления топографических макетов 3-х мерных карт поверхности местности. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались друг на друга в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой (рис. 2.1).

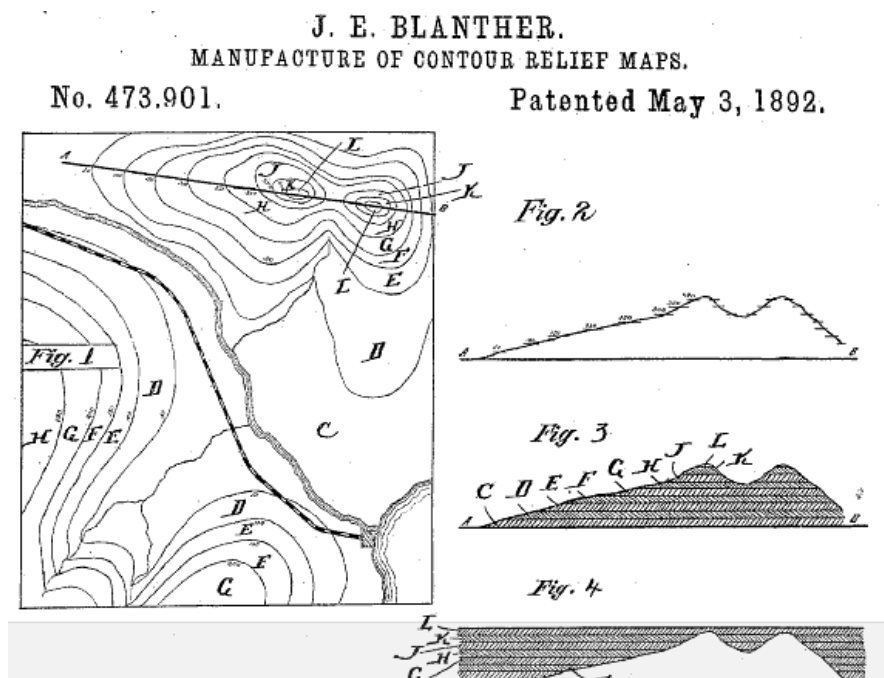


Рис. 2.1. Блантер Дж. Патент США 473901, выдан 03.05.1892 г.

Практическое применение эта идея нашла в *ЛОМ*-технологии – *Lamination Object Manufacturing* - послойном ламинировании или склеива-

нии тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051-0,25 мм. В 1979 г. профессор *Nakagawa* из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов.

Вторая технология – фотоскульптура (*Photosculpture*) была предложена французом *François Willème* в 1890 г. Суть ее состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры (*Willème* использовал 24 камеры с шагом 15 градусов) и производили одномоментное фотографирование на все камеры. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину – в соответствии с профилем текущего контура. Для уменьшения трудоемкости процесса *Willème* немец *Carlo Baese* в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – экспозиции (Пат. США 774549, *Photographic process for there production of plastic objects*, 08.11.1904). В 1935 г. *Isao Morioka* предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру. Этот способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набора контуров. Контурные затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким образом формировался трехмерный образ объекта. Или же, как и у *François Willème*, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трехмерного образа с помощью режущего инструмента.

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея *OttoMunz* (1956 г.), который предложил способ селективной (послойной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве платформы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установленный в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень перемещали на определенную величину (т.е. с определенным шагом) и сверху наносили слой эмульсии, проецируя на него изображение, после чего наносили слой фиксирующего реагента. И так каждый шаг: поршень перемещали вниз, наносили фотоэмульсию, засвечивали, наносили слой фиксирующего реагента и т.д.

Фиксирующий состав наносился на весь слой: и на засвеченные участки, и на не засвеченные, в результате внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, оказывался заключенным образ трехмерного объекта (рис. 2.2). На патент (Пат.США № 2775758) *OttoMunz*, как на предшественника современной стереолитографии, ссылаются практически все авторы новых изобретений в области аддитивных технологий.

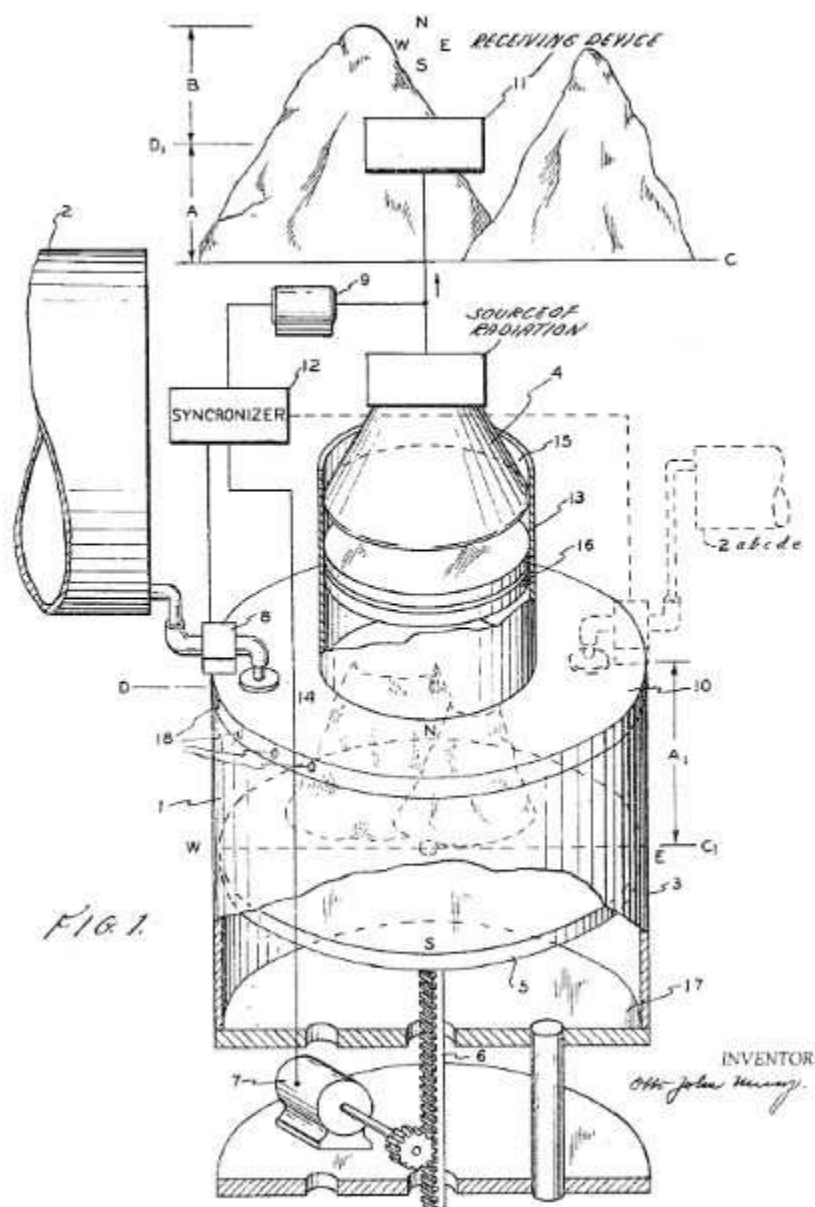


Рис. 2.2. Фото-символ записи. Пат. США № 2775758, выдан 25.12.1956 г.

В 1977 г. *Wyn Kelly Swainson* (Пат. США № 4041476) предложил способ получения трехмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов (*P.A. Ciraud*, 1972).

В 1981 г. *R.F. Housholder* (Пат. США № 4247508) предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала путем нанесения его на плоскую платформу. Далее производилось разравнивание до определенной величины с последующим спеканием слоя. В том же году *Hideo Kodama* опубликовал результаты работы с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. была опубликована работа *A.J. Herbert* по созданию трехмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал.

Процесс патентования новых технических решений по *AF*-технологиям приобрел лавинообразный характер. В 1986 г. *Charles W. Hull* предложил способ послойного синтеза посредством ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввел в оборот термин «стереолитография».

Charles W. Hull стал основателем фирмы *3D Systems* – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза. С этого момента началась новая эпоха в индустрии – эпоха *AF*-технологий.

3. Аддитивные технологии, их классификация и отличительные особенности

Существуют разные процессы изготовления по средствам аддитивных технологий, но всех их объединяет то, что прототип изготавливается путем послойного наложения композитного материала. Основное преимущество аддитивных технологий состоит в том, что прототип создается за один прием, а исходными данными для него служит непосредственно геометрическая модель детали. Таким образом, отпадает необходимость в планировании последовательности технологических процессов, специальном оборудовании для обработки материалов, транспортировке от станка к станку и т. д. Однако по сравнению с обработкой на станке с ЧПУ этот процесс имеет существенный недостаток – ограниченность выбора материалов. Физические объекты, изготовленные методом 3D печати, используются главным образом в качестве прототипов или шаблонов для других производственных процессов.

В основе своей процессы 3D печати состоят из трех шагов: формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта, послойное наложение этих сечений и комбинирование слоев. Таким образом, чтобы создать физический объект, этим процессам требуются данные лишь о поперечных сечениях; кроме того, исчезают следующие проблемы, часто возникающие в связи с другими производственными процессами.

В международном сообществе так же, как и в России, устоявшаяся классификация аддитивных технологий пока не принята. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным (модельным) материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т.д.);
- по наличию или отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т.д.);
- по методам формирования слоя.

Также существует классификация по технологии 3D-печати. Их можно разделить технологии по основным направлениям.

Экструзионная печать. Сюда входят такие методы, как послойное наплавление (*fdm*) и многоструйная печать (*mjm*). В основе этого метода лежит выдавливание (экструзия) расходного материала с последовательным формированием готового изделия. Как правило, расходные материалы состоят из термопластиков либо композитных материалов на их основе.

Плавка, спекание или склеивание. Этот подход основывается на соединении порошкового материала в единое целое. Формирование производится разными способами. Наиболее простым является склеивание, как в случае со струйной трехмерной печатью (*3 dp*). Подобные принтеры наносят на рабочую платформу тонкие слои порошка, которые затем выборочно склеиваются связующим материалом. Порошки могут состоять из практически любого материала, который можно измельчить до состояния пудры.

Наиболее популярными же в данной категории стали технологии лазерного спекания (*sls* и *dmls*) и плавки (*slm*), позволяющие создавать целнометаллические детали. Как и в случае со струйной трехмерной печатью, эти устройства наносят тонкие слои порошка, но материал не склеивается, а спекается или плавится с помощью лазера. Лазерное спекание (*sls*) применяется для работы как с пластиковыми, так и с металлическими порошками, хотя металлические гранулы обычно имеют более легкоплавкую оболочку, а после печати дополнительно спекаются в специальных печах. *Dmls* – вариант *sls* установок с более мощными лазерами, позволяющими спекать непосредственно металлические порошки без добавок. *Slm*-принтеры предусматривают уже не просто спекание частиц, а их полную плавку, что позволяет создавать монолитные модели, не страдающие от относительной хрупкости, вызываемой пористостью структуры. Как правило, принтеры для работы с металлическими порошками оснащаются вакуумными рабочими камерами либо замещают воздух инертными газами. Подобное усложнение конструкции вызывается необходимостью работы с металлами и сплавами, подверженными окислению – например, с титаном.

Стереолитография. Стереолитографические принтеры используют специальные жидкие материалы, называемые «фотополимерными смолами». Термин «фотополимеризация» указывает на способность материала затвердевать под воздействием света. Как правило, такие материалы реагируют на облучение ультрафиолетом. Смола заливается в специальный контейнер с подвижной платформой, которая устанавливается в позиции возле поверхности жидкости. Слой смолы, покрывающий платформу, соответствует одному слою цифровой модели. Затем тонкий слой смолы обрабатывается лазерным лучом, затвердевая в точках соприкосновения. По окончании засветки платформа вместе с готовым слоем погружается на толщину следующего слоя, и засветка производится вновь.

Ламинирование. Слои материала наклеиваются друг на друга и обрезаются по контурам цифровой модели с помощью лазера или лезвия.

Такие установки хорошо подходят для макетирования и могут использовать очень дешевые расходные материалы, включая обычную офисную бумагу. Тем не менее, сложность и шумность таких принтеров вкупе с ограниченными возможностями изготавливаемых моделей ограничивают их популярность.

Наиболее популярными методами 3D-печати, применяемыми в быту и в офисных условиях, стали моделирование методом послойного наплавления (*fdm*) и лазерная стереолитография (*sla*).

Рассмотрим более подробно наиболее распространенную технологию моделирование методом послойного наплавления (*fdm*).

3.1. Технология моделирования методом послойного наплавления (*FDM*)

Моделирование методом послойного наплавления (англ. *Fused Deposition Modeling (FDM)*) – технология аддитивного производства, широко используемая при создании трехмерных моделей, при прототипировании и в промышленном производстве.

Технология *FDM* подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели (рис. 3.1). Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков.



Рис. 3.1. Принцип *FDM* печати

Технология *FDM* была разработана С. Скоттом Трампом в конце 1980-х и вышла на коммерческий рынок в 1990 году.

Оригинальный термин «*Fused Deposition Modeling*» и аббревиатура *FDM* являются торговыми марками компании *Stratasys*. Эн-

тузиасты 3D-печати, участники проекта *RepRap*, придумали аналогичный термин «*Fused Filament Fabrication*» («Производство методом наплавления нитей») или *FFF* для использования в обход юридических ограничений. Термины *FDM* и *FFF* эквивалентны по смыслу и назначению.

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате *STL* делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать разные материалы во время одного производственного цикла. Например, возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати. Альтернативно, возможна печать разными цветами одного и того же вида пластика при создании единой модели (рис. 3.2). Изделие, или «модель», производится выдавливанием («экструзией») и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия (рис. 3.3). Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое, в свою очередь, плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла наоборот охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала.

Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях под контролем алгоритмов, аналогичных используемым в станках с числовым программным управлением. Сопло перемещается по траектории, заданной системой автоматизированного проектирования («САПР» или «*CAD*» по англоязычной терминологии).

Модель строится слой за слоем, снизу вверх. Как правило, экструдер (также называемый «печатной головкой») приводится в движение шаговыми двигателями или сервоприводами.

Наиболее популярной системой координат, применяемой в *FDM*, является Декартова система, построенная на прямоугольном трехмерном пространстве с осями *X*, *Y* и *Z*. Альтернативой является цилиндрическая система координат, используемая так называемыми «дельта-роботами».

Технология *FDM* отличается высокой гибкостью, но имеет определенные ограничения. Хотя создание нависающих структур возможно при небольших углах наклона, в случае с большими углами необходимо исполь-

зование искусственных опор, как правило, создающихся в процессе печати и отделяемых от модели по завершении процесса.



Рис. 3.2. Примеры моделей, полученных методом *FDM*: *а* – резьбовая крышка из АБС пластика; *б* – трехцветная ваза из *PLA* пластика

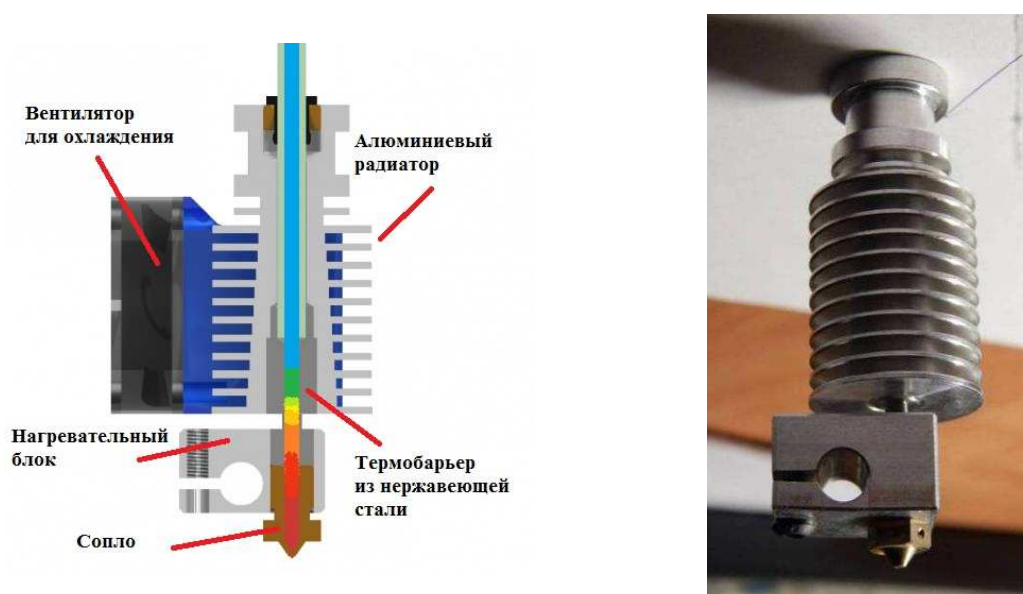


Рисунок 3.3. Экструзионная головка принтера *FDM*

В качестве расходных материалов используются различные термопластики и композиты, включая *ABS*, *PLA*, поликарбонаты, полиамиды, полистирол, лигнин, полифенилсульфон, полиэфиримид и многие другие. Некоторые производные полиэфиримида обладают высокой огнеупорностью, что делает их пригодными для использования в аэрокосмической отрасли. Как правило, различные материалы предоставляют выбор баланса между определенными прочностными и температурными характеристиками.

Моделирование методом послойного наплавления (*FDM*) применяется

для быстрого прототипирования и быстрого производства. Быстрое прототипирование облегчает повторное тестирование с последовательной, пошаговой модернизацией объекта. Быстрое производство служит в качестве недорогой альтернативы стандартным методам при создании мелкосерийных партий.

FDM является одним из наименее дорогих методов 3D печати, что обеспечивает растущую популярность бытовых принтеров, основанных на этой технологии. В быту 3D-принтеры, работающие по технологии *FDM*, могут применяться для создания самых разных объектов целевого назначения, игрушек, украшений и сувениров.

4. Аппаратурная база аддитивных технологий, классификация, принцип действия, особенности эксплуатации

3D печать развивается быстрыми темпами и находит применение не только в области дизайна и машиностроения, но и в аэрокосмической промышленности, медицине, строительстве и многих других областях. Рассмотрим классификацию оборудования для быстрого прототипирования по уровню применяемости.

Потребительский уровень. Тип принтеров, который предназначен, в основном, для личного использования. Поставляется в виде отдельных узлов или в собранном виде. Подавляющее большинство моделей принтеров такого типа являются производной от *open source* проекта RepRap. Устройство и характеристики таких принтеров не сильно отличаются друг от друга.

Системы управления принтерами потребительского уровня оснащены простым и интуитивно понятным интерфейсом. Печатают, как правило, *ABS* и *PLA* пластиком. Такие принтеры могут производить объекты низкой и средней сложности с невысокой точностью. Ценовой диапазон: 500\$ - 3500\$. Принтеры потребительского уровня ориентированы на дизайнеров, художников, изобретателей, для домашнего использования.

Персональный уровень. Пограничный класс принтеров, который является домашним, но в то же время относится к нижней ступени промышленных принтеров для бизнеса. Эти устройства имеют много общего с принтерами потребительского класса, но обладают более высоким качеством и точностью печати. Появление таких принтеров, это скорее реакция крупных производителей на растущий рынок домашних систем. Учитывая низкую точность потребительского класса, вендоры предложили уменьшенные модели профессиональных систем с близкими к ним показателями. Управлять принтерами этого класса также просто и сводится к загрузке образа модели и нажатию кнопки «пуск». В то же время это ограничивает возможности в плане различных дополнительных параметров печати. Ценовой диапазон принтеров персонального уровня: 7000\$ - 40 000\$. Ориентированы на малый бизнес с небольшим бюджетом, у которого есть по-

требность в периодическом использовании 3D печати. Это могут быть инженерные компании, дизайн студии, маркетинговые агентства.

Профессиональный уровень. Системы этого класса уже не выглядят компактными и имеют более внушительные размеры. В профессиональных принтерах используют передовые разработки в области технологии 3D печати. Предназначение профессиональных систем может быть очень разным, от прототипирования до полномасштабного производства, что, в свою очередь, делает их отличным вариантом как для крупного бизнеса, так и для высокотехнологичных компаний с малым штатом сотрудников.

В отличие от принтеров более низкого класса, профессиональные принтеры, ввиду большого количества режимов и дополнительных опций, требуют наличие персонала высокой квалификации. Такие принтеры устанавливаются в специальных помещениях с хорошей вентиляцией.

Профессиональные принтеры представляют собой комплексы, которые обеспечивают высокое качество печати и увеличенные, по сравнению с младшими классами, области печати. Такие принтеры могут оснащаться несколькими печатающими головками и иметь термостатичные камеры для печати полимера, имеющими высокую термическую усадку.

Ценовой диапазон профессиональных принтеров: 30 000\$ - 750 000\$. Принтеры ориентированы на компании, у которых присутствует постоянная потребность в прототипировании, моделировании, изготовлении различного рода объектов с высокими показателями качества и точности.

Производственный уровень. Название класса говорит само за себя. Эти машины являются совокупностью точности и качества профессиональных принтеров, большой площадью печати, высокого уровня автоматизации и контроля процессов. На них, как и на профессиональных установках, можно печатать не только прототипы, но и конечный потребительский продукт.

Производственные принтеры устанавливаются в специально оборудованных цехах и используются в высокотехнологичном производстве, которое может быстро менять профиль выпускаемой продукции и использовать в качестве материалов не только полимеры, но и металлы. Ценовой диапазон производственных принтеров: 300 000\$ - 1 000 000\$. Применение таких принтеров ориентировано на компании с потребностью в производстве высокоточных продуктов большого размера, либо на компании с потребностью в производстве большого количества менее объемных предметов с высокой точностью и высоким уровнем качества.

3D ручка. Отдельно можно вынести дизайнерское оборудование, к которому относится 3D-ручка. Первенцем нового направления развития 3D печати стала ручка *3Doodler* от компании *Wobbleworks*. Команда обратилась к площадке *Kickstarter* для сбора средств, необходимых для воплощения проекта в жизнь. Поставив целью собрать \$30 000, компания *Wobbleworks* сумела получить более двух миллионов долларов к моменту

окончания кампании, что говорит о высоком интересе публики. На фоне успеха *3Doodler* прокатилась конкурентная волна. На данный момент ассортимент *3D*-ручек включает в себя фактические клоны *3Doodler* - такие, как *3DYAYA* или *SwissPen*, а также более оригинальные разработки, включая *Dim3W* и *LIX*. Основной принцип работы всех этих устройств одинаков, но имеются и некоторые конструктивные особенности, направленные на совершенствование достаточно молодой концепции.

В сущности, *3D*-ручка есть не что иное, как ручной экструдер. В роли ЧПУ станка выступает сам пользователь. Основные элементы *3D* ручки: сопло, механизм подачи пластиковой нити, нагревательный элемент, вентилятор для охлаждения верхней части сопла и ручки в целом, микроконтроллер для управления работой вентилятора, механизма подачи и нагревательного элемента. Так как практически все программные функции выполняет сам пользователь, *3D* ручки не требуют соединения с компьютером или создания цифровых моделей. Требуется лишь электропитание. Как правило, используются обычные блоки питания с преобразователем напряжения 12В. Как и в *FDM* принтерах, нагрев сопла занимает несколько минут, после чего ручка готова к печати. Подача материала осуществляется при нажатии соответствующей кнопки. Некоторые модели, например *Dim3W*, оснащаются регулятором скорости печати.

Также возможно наличие реверса протягивающего механизма. Эта функция позволяет быстро извлекать пластиковую нить из ручки и заменять ее материалом другого цвета.

На данный момент в качестве материалов для *3D*-ручек используются два самых популярных пластика в *FDM 3D* печати – *ABS*-пластик и органический, биоразлагаемый полилактид (*PLA*-пластик). Возможно применение и других материалов – поликарбоната, нейлона и т.д. В то же время существующие модели не дают возможности точной регулировки температуры сопла, важной при переходе на другие материалы. Температурные характеристики заложены в прошивке. В будущем можно ожидать большего разнообразия ассортимента материалов и возможность точной настройки температуры.

Как и полноценные *FDM* принтеры, *3D*-ручки используют термопластиковые нити диаметром 1,75 или 3 мм. Для удобства работы с ручкой, нити, как правило, поставляются в виде обрезков, а не катушек, но в конечном итоге все зависит от выбора пользователя.

3D-ручки позиционируются, как средство для творческой работы, трехмерного рисования. Хотя устройства действительно могут выполнять такую роль, создание качественных моделей требует серьезной сноровки.

Изначально *3D*-ручки задумывались совсем для другой цели, аналогичной с целью своих прародителей – термоклеевых пистолетов. Речь идет о ремонте. Дело в том, что некоторые виды пластиков, используемых в *FDM3D*-печати (например, весьма популярный *ABS*-пластик), имеют вы-

сокую степень усадки и склонность к деформациям при неравномерном охлаждении. Все это зачастую приводит к растрескиванию изготавливаемых моделей. 3D-ручки должны были стать инструментом для ручного ремонта напечатанных моделей. Эти устройства позволяют заполнять пропущенные слои или разломы.

Особенно хороших результатов можно добиться при аккуратной обработке трещин ацетоном, растворяющим ABS-пластик. Размягченная таким образом поверхность будет хорошо схватываться со свеженанесенным с помощью 3D-ручки пластиком. Поверхность отремонтированного участка можно выровнять за счет шлифовки и аккуратной обработки тем же ацетоном. Аналогичным образом можно подвергнуть ремонту и бытовые изделия – многие из них выполняются из того же ABS-пластика, получившего широкое распространение в промышленности. Что же касается применения в художественных целях, 3D ручки придутся по душе тем, кто любит рисовать и желает перейти с двухмерных зарисовок к трехмерным физическим моделям.

Основная сложность заключается в человеческих ограничениях – любое нежелательное движение руки отразится на качестве исполнения модели, особенно при рисовании модели «в воздухе».

Одним интересным способом повышения качества стало деление моделей на составные части с использованием зарисовок на бумаге в качестве шаблонов. Готовые же детали просто склеиваются вместе.

Весьма многообещающей является возможность применения разновидности 3D ручек в медицине.

Такие устройства, называемые «биоручками» (*BioPen*) испытываются в качестве инструментов для нанесения слоев живых клеток, смешанных с биополимерами, выполняющими роль поддерживающих матриксов и содержащих необходимые питательные вещества.

Оригинальная 3D-ручка *BioPen* была разработана австралийскими учеными из ASEC и предназначена для ремонта хрящевых и костных тканей.

При хирургическом вмешательстве *BioPen* позволяет врачам «закрашивать» поврежденные участки костной или хрящевой ткани, стимулируя восстановительный процесс.

5. Особенности печати по FDM технологии

Интерес к 3D печати растет большими темпами, большинство людей приобретают 3D принтеры для дома либо собирают их самостоятельно на основе проекта *RepRap*. Практически все домашние принтеры основаны на FDM технологии, которая обладает своими особенностями.

Не важно, какой 3D принтер имеется – собранный дома или на предприятии, сразу подключить его и напечатать модель не получится, необходимо иметь некоторые навыки подготовки модели к печати и работы с материалами для печати. К тому же 3D печать по FDM технологии имеет

свои ограничения. После ознакомления с устройством 3D принтера, предметно поговорим об особенностях, достоинствах и недостатках 3D печати.

Размеры и разрешение модели

Далеко не все изделия можно напечатать, так как печать ограничена размерами области печати и разрешением печати. Разрешение зависит от конструкции принтера, технологии *FDM* и от установленного сопла экструзионной головки. Минимально возможные для печати на данный момент времени сопла с диаметром 0,2 мм. Не все конструкции принтеров позволяют печатать минимальными слоями, распространенная минимальная толщина слоя 0,05 мм. При настройках принтера на минимальную толщину слоя на процесс печати затрачивается очень большое количество времени.

Перегрев модели

В технологии *FDM* подача пластичной массы осуществляется при температурах 180 - 260 °С. При печати одной детали небольших размеров происходит перегрев и искривление модели, поэтому необходимо охлаждать (обдувать) область печати. Для этих целей в принтере должна быть предусмотрена специальная система охлаждения. Возможно обойтись без такой системы – размещать две (или более) небольших модели на значительном расстоянии друг от друга, чтобы нанесенный слой пластика успевал полимеризоваться (остывать) перед нанесением на него следующего слоя. Пример такой неудачной печати представлен на рисунке 5.1.

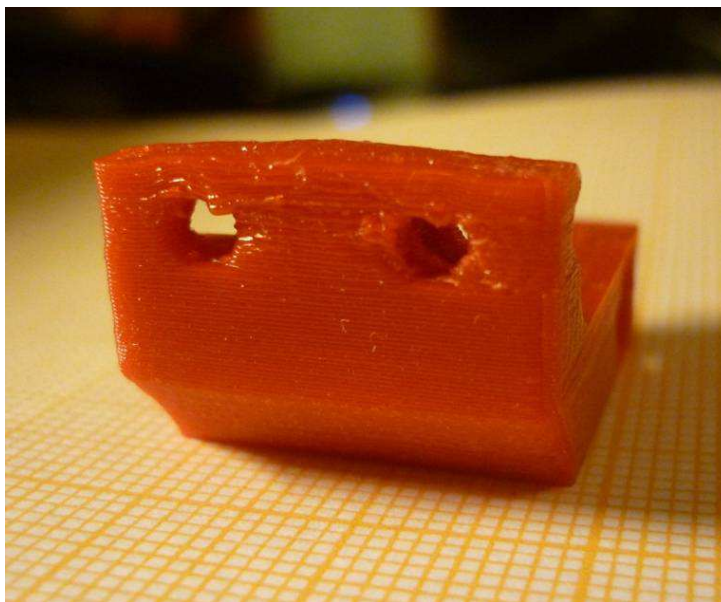


Рис. 5.1. Перегрев модели малых размеров при 3D печати

Для создания миниатюрных деталей используют другой принцип печати, к примеру, *SLA*.

Поддержки

Одним из ограничений 3D-печати является невозможность «печати по воздуху», что осложняет создание навесных элементов. Такие технологии, как выборочное лазерное спекание (*SLS*), решают эту проблему за счет использования порошковых материалов распределяемых по всей площади рабочей камеры – неизрасходованный материал одного слоя служит поддержкой для элементов следующего слоя.

В технологии *FDM* печати материал наносится выборочно. Соответственно, навесные элементы могут не иметь достаточной опоры – все зависит от угла отклонения и разрешения печати, но даже при оптимальном разрешении печать горизонтальных элементов большой длины (так называемых «мостов») возможна только в ущерб качеству или невозможна вообще. В таких случаях создаются искусственные временные конструкции, называемые «опорами», «поддержками» или «supports», которые удаляются по завершении печати.

Поддержки иногда моделируют при дизайне модели, чаще они генерируются в программе-слайсере.

Пример поддержек для нависающих элементов детали представлен на рисунке 5.2.

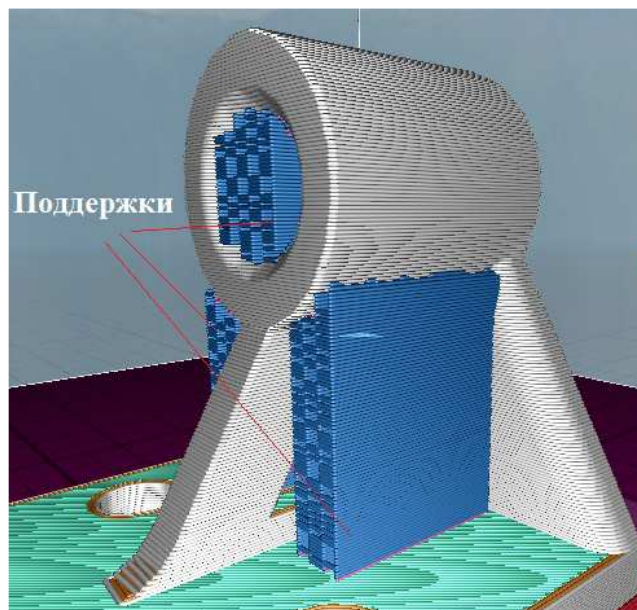


Рис. 5.2. Поддержки для нависающих элементов детали

К поддержкам есть определенные требования: они должны удерживать пластик, а затем без особых проблем отделяться. Если печатать модель и поддержки из одного материала, то после печати поддержки необходимо удалить механически.

К сожалению, механическое удаление таких конструкций оставляет следы на готовой модели, что приводит к необходимости последующей механической (опиливание, шлифование) и/или химической обработки. В

худшем же случае, опоры могут вообще оказаться вне досягаемости механических инструментов. Последнее возможно при создании моделей со сложной открытой внутренней структурой [2].

Если печатать модель и поддержки из разных материалов, то можно удалять поддержки с помощью химической обработки. При этом поддержки должны печататься из растворимого материала. Такими материалами являются пластики *PVA* (растворимый в воде) или *HIPS* (растворимый в лимонене). После печати модель с поддержками погружается в растворитель, в котором растворяется только материал поддержки. После растворения, деталь получается без дефектов от поддержек.

Бrimы и рафты

Еще одна проблема *FDM* принтеров – неровная платформа и плохая адгезия пластика к платформе. Эта проблема может быть частично решена с помощью дополнительных элементов, прилегающих к модели, которые называют бrimы (*brim*) и рафты (*raft*). Об особенностях их использования говорится в главе 7 настоящего пособия.

Цветная *FDM* печать

FDM 3D принтеры имеют ограничения по созданию моделей из пластиков разных цветов одновременно. Большинство моделей печатается пластиком одного цвета. Имеются принтеры, оснащенные двумя (рис. 5.3) реже тремя и более экструзионными головками.

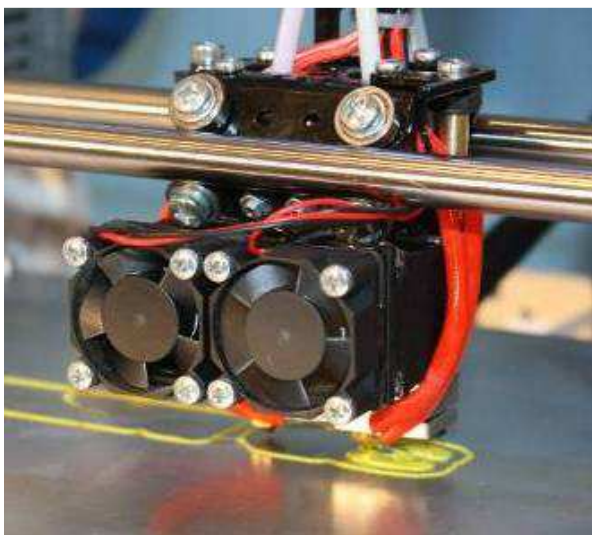


Рис. 5.3. Экструзионный узел «3D Life», снабженный двумя головками

В таких конструкциях возможна печать с количеством цветов, равным количеству экструзионных головок. Пример многоцветной *FDM* печати представлен на рисунке 5.3 справа. Многоцветная печать возможна также на принтере, оснащенном одной головкой. Сначала модель печатается од-

ним цветом, делается пауза в печати, производится замена филамента на другой цвет и продолжается печать до следующей замены филамента или до окончания печати.

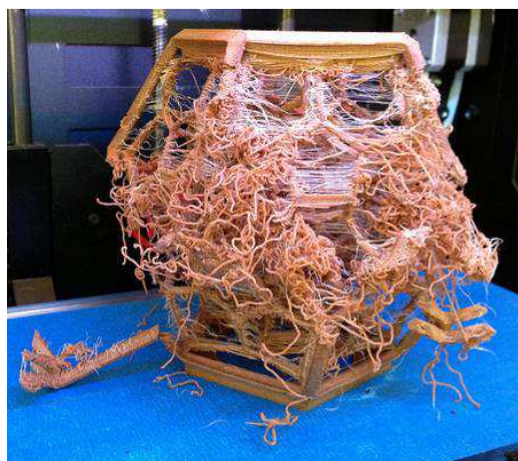
Есть конструкции экструзионных головок с одним соплом, к которому подводится несколько филаментов различных цветов. В таких конструкциях возможно производить смешение цветов подаваемого пластика.

У экструзионных узлов, снабженных несколькими головками, имеется возможность печатать разными материалами. К примеру, можно печатать поддержки из водорастворимого *PVA* пластика, а основную деталь из *ABS*. В том случае отпадает необходимость механической обработки готовой модели по удалению поддержек, так как их можно растворить в теплой воде, а модель из основного пластика остается неповрежденной.

Качество и точность изготавливаемой детали зависит от технических характеристик принтера и настроек печати (высота слоя, скорость печати и другие).

Неверные настройки печати приводят к некачественной печати. Ошибки, допущенные при настройке печати, могут проявляться в мягкой и грубой формах. В мягкой форме ошибки проявляются в небольших отклонениях размеров (см. рис. 5.1) между напечатанным объектом и его виртуальной моделью. Ошибки печати такого рода могут быть исправлены с помощью последующей механической и (или) химической обработки объекта.

При грубых ошибках печати (рис. 5.4) форма объекта искажается очень сильно или происходит сбой печати. Ошибки печати такого рода, как правило, не могут быть исправлены.



а



б

Рис. 5.4. Ошибки печати: *а* – неправильная настройка или отсутствие поддержек; *б* – сдвиг печати по одной оси

На качество изделия также влияет используемый материал для трехмерной *FDM* печати, так каждый вид материала имеет свои свойства и особенности при печати.

6. Материалы для *FDM* печати

Существует большое число материалов, которые применимы для трехмерной *FDM* печати. На сегодняшний день основную роль в этой нише занимают два пластика – *ABS* и *PLA*, они являются самыми распространёнными в области *FDM* печати. Оба материала являются термопластичными при определенных температурах. Однако существует немало различных термопластов, которые применимы в этой технологии, и ассортимент их постоянно расширяется [4-12].

Пластики для *FDM* печати в основном выпускаются в виде прутка (филамента) диаметром 1,75 мм, намотанного на пластиковую катушку (рис. 6.1). Масса катушек от 0,2 до 1 кг.



Рис. 6.1. Пруток (филамент) диаметром 1,75мм *ABS* пластика

Рассмотрим свойства некоторых пластиков.

***ABS* пластик**

ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) – это термопластическая ударопрочная техническая смола, сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирол. Название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров. Пропорции могут варьироваться от 15 до 35 % акрилонитрила, от 5 до 30 % бутадиена и от 40 до 60 % стирола. *ABS* пластик может быть повторно переработан.

ABS пластик стал популярным в системах быстрого прототипирования благодаря своей температуре стеклования – достаточно высокой, чтобы не возникало нежелательных деформаций при небольшом нагреве в бытовых условиях, но достаточно низкой для безопасной экструзии с помощью 3D принтеров. *ABS* применим в большей мере для создания технических деталей. Имеет большое разнообразие в цветовой палитре. Оптимальная температура печати данным материалом 230-250 С.

Легко обрабатывается механически, есть возможность сглаживать химическими веществами, к примеру, ацетоном. Распространена обработка данного материала парами ацетона, в так называемой «ацетоновой бане». Результат такой обработки представлен на рисунке 6.2.

Для печати данным материалом необходима подогреваемая платформа, а также термостатичная камера, так как из-за неравномерности температуры окружающей среды возможны расслоения между слоями материала вследствие усадки при полимеризации пластика.



Рис. 6.2. Ацетоновая обработка ABS пластика

Приведем свойства *ABS*:

- обладает более высокой стойкостью к ударным нагрузкам по сравнению с полистиролом, превосходит его по механической прочности и жесткости;
- хорошая износостойкость;
- нетоксичность в нормальных условиях;
- стоек к влаге, щелочам, смазочным маслам, растворам неорганических солей и кислот, углеводородам, жирам, бензину;
- растворяется в ацетоне, эфире, бензоле, этилхлориде, этиленхлориде, анилине, анизоле;
- не стоек к ультрафиолетовому излучению;
- характеризуется ограниченной устойчивостью против атмосферных воздействий и пониженными электроизоляционными свойствами и по сравнению с полистиролом;
- выдерживает кратковременный нагрев до 90-100 °C (до 113 °C у модифицированных марок);
- максимальная температура длительной эксплуатации: 75 – 80 °C;
- широкий диапазон эксплуатационных температур (от –40 °C до +90 °C);

– пригоден для нанесения гальванического покрытия, для вакуумной металлизации.

Таблица 6.1. Физико-механические свойства АБС-пластика

Наименование	Значение
Плотность	1,02-1,08 г/см ³
Прочность при растяжении	35-50 МПа
Прочность при изгибе	50-87 МПа
Прочность при сжатии	46-80 МПа
Относительное удлинение	10-25 %
Усадка (при изготовлении изделий)	0,4-0,7 %
Влагопоглощение	0,2-0,4 %
Модуль упругости при растяжении при 23 °С	1700 - 2930 МПа
Ударная вязкость по Шарли (с надрезом)	10-30 кДж/м ²
Твердость по Бринеллю	90-150 МПа
Теплостойкость по Мартенсу	86-96 °С
Температура размягчения	90-105 °С
Максимальная температура длительной эксплуатации	75-80 °С
Диапазон технологических температур	200-260 °С
Диэлектрическая проницаемость при 106 Гц	2,4-5,0
Тангенс угла диэлектрических потерь при 106 Гц	(3-7)·10 ⁻⁴
Удельное объемное электрическое сопротивление	5·10 ¹³ Ом/м
Электрическая прочность	12-15 МВ/м
Температура самовоспламенения	395 °С

***PLA* пластик**

PLA (Polylacticacid), Полилактид (ПЛА) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза, сахарный тростник, сахарная свёкла, пшеница. Популярный материал для 3D печати. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов. Полилактид применяется для производства экологически чистой биоразлагаемой упаковки, одноразовой посуды, средств личной гигиены. Биоразлагаемые пакеты из полилактида используются в таких крупных торговых сетях как *Wal-Mart*, *Stores* и *Kmart*. Ввиду своей биосовместимости, полилактид широко применяется в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов, а также в системах доставки лекарств.

Самый крупный производитель *L-ПЛА* — американская компания *Nature Works* (140 000 тонн/год). Также ПЛА производится компанией *Toyota* (Япония), *Hitachi* (Япония), *DuPont* (США), *Galactic* (Бельгия), *Hisun Biomaterials* (Китай), а основной производитель *L,D-ПЛА* - компания

PURAC (Нидерланды). С 2015 года в России налажено производство медицинского высокочистого *PLA* на мощностях АО "ВНИИСВ".

Таблица 6.2. Физико-механические свойства *PLA* пластика

Величина	Значение
Температура печати	200-220 °С
Температура плавления	173-178°С
Температура размягчения	50°С
Твердость (по Роквеллу)	R70-R90
Относительное удлинение при разрыве	3,8%
Прочность на изгиб	55,3 МПа
Прочность на разрыв	57,8 МПа
Модуль упругости при растяжении	3,3 ГПа
Модуль упругости при изгибе	2,3 ГПа
Температура стеклования	60-65°С
Плотность	1,23-1,25 г/см ³
Минимальная толщина стенок	1 мм
Точность печати	± 0,1%
Размер мельчайших деталей	0,3 мм
Усадка при изготовлении изделий	нет
Влагопоглощение	0,5-50%

Примеры печати из *PLA* пластика представлены на рисунке 6.3.



Рис. 6.3. Примеры объектов из *PLA* пластика

PLA пластик имеет большое разнообразие в цветовой палитре. Применяем в основном для печати различного рода изделий дизайнерского исполнения (скульптуры, фигуры, вазы и т.п.). Для создания механических деталей тоже применим, в особенности для скользящих втулок (подшипники скольжения), так как обладает малым коэффициентом трения.

PLA пластик не токсичен, поэтому из него можно делать игрушки для детей. Отлично подходит для печати больших и маленьких объектов. Хорошо сочетается с *ABS* пластиком как поддерживающий материал.

Достоинства *PLA* пластика в том, что это экологичный материал, не требует подогреваемой поверхности стола, а при печати довольно быстро охлаждается, что снижает деформации модели при застывании. Для улучшения охлаждения применяют воздушный обдув с помощью вентиляторов.

Основные недостатки *PLA* пластика – биологически разлагаемый, малый срок службы в районе 2-х лет (активно процесс разложения происходит при повышенных влажности и температуре), имеет трудности при обработке, так как более плотный материал по сравнению с *ABS*.

Нейлон (*Nylon*) –полиамид

Полиамид (ПА) – крупнотоннажный термопластичный полимер конструкционного назначения. Наиболее распространен полиамид-6 на основе капролактама. Свойства полиамидов хорошо изучены и описаны.

ПА – это инженерные пластики. Они обладают высокими прочностью и ударной вязкостью в широком диапазоне температур; морозостойкость – 60°C. ПА – хорошие антифрикционные материалы. По износостойкости они превосходят ПТФЭ и СФД. Пленки из ПА прозрачны и не накапливают электростатических зарядов.

Основным недостатком ПА является большое водопоглощение. ПА не являются хорошими диэлектриками. Свойства и размеры изготовленных из них изделий зависят от влажности окружающей среды и, следовательно, нестабильны. ПА нестойки к УФ-излучению, горючи.

ПА применяют для изготовления корпусных деталей, а также деталей, работающих в узлах трения, под нагрузкой: режущие – кабельной изоляции.

Технология печати с использованием нейлона схожа с печатью *ABS*-пластиком, но с некоторыми отличиями. Как и *ABS*-пластик, нейлон склонен к закручиванию и деформациям при неравномерном охлаждении, что требует использования подогреваемой платформы и термостатичной камеры.

Слои нейлона прекрасно схватываются, что минимизирует вероятность расслоения моделей. Прочность моделей из нейлона, полученных с помо-

щью 3D принтера, находится на уровне аналогов, изготовленных традиционным методом литья под давлением.

Нейлон практически не поддается склеиванию, что затрудняет изготовление крупногабаритных деталей из составных частей. Как вариант, возможно соединение нейлоновых деталей за счет плавки соединяемых поверхностей. Нейлон поддается окрашиванию с помощью красителей на кислотной основе.

Нейлон не схватывается со стеклом и другими гладкими поверхностями, поэтому при печати рекомендуется нанесение на рабочий столик малярного скотча, либо использование подложки из древесины.

Изделия из нейлона, напечатанные 3D принтером показаны на рис. 6.4.



Рис. 6.4. Изделия из нейлона, напечатанные 3D принтером

Ввиду высокой гигроскопичности нейлона (способности впитывать влагу) рекомендуется просушка нейлоновых нитей непосредственно перед печатью. В противном случае возможно выделение водяного пара из сопла, что может повлиять на качество печати [1].

Температура печати от 235 до 280 °С. Оптимальная температура на большинстве скоростей печати: 240 – 250 °С.

Скорость печати зависит от принтера. Печать со скоростью от 28 до 34 мм/с в большинстве случаев дает хороший результат.

Поликарбонат

Поликарбонат – термопластик, в соевом виде широко использующийся в качестве прочного заменителя обычного стекла. Кроме того, поликарбонат нашел применение в качестве материала для изготовления компакт-дисков, контактных линз, защитного снаряжения (например, велосипедных шлемов или очков). Комбинация прозрачности поликарбоната и высокой прочности (порядка 250 раз выше, чем у обычного стекла), позволяет изготавливать даже пуленепробиваемые стекла.

ПК выпускается под марками ПК, дифлон и ДАК в виде прозрачных гранул (бесцветных или желтоватых), стабилизированным. За рубежом ПК имеет названия макролон (Германия), лексан, мерлон (США), пепплайт, юпилен, тоуфлон (Япония).

ПК устойчив к действию растворов кислот и слабых щелочей; растворяется в хлорированных углеводородах, фенолах, кетонах, тетрагидрофуране, диметилформамиде, диоксане, частично растворим в ароматических углеводородах; разлагается в сильных щелочах, аминах и низших спиртах; водо-, масло- и бензостоек. ПК нетоксичен, инертен к физиологическим средам, широко применяется для изготовления медицинских изделий и тары для пищевых продуктов.

ПК относится к термопластам инженерно-технического назначения. Это теплостойкий жесткий прочный материал, отличающийся высокой стойкостью к удару, стабильностью свойств и размеров в широком диапазоне температур (морозостойкость ниже –100°С). Стоек к УФ- и ионизирующим излучениям. Это хороший диэлектрик, самозатухающий материал.

Несмотря на высокую вязкость, ПК перерабатывается литьем под давлением, экструзией, пневмоформованием. Тонкие пленки и волокна получают поливом из раствора, они хорошо склеиваются и свариваются. ПК применяется для изготовления прецизионных, оптически прозрачных, ударостойких изделий в электротехнической, медицинской промышленности, в приборостроении и др.

Еще одним достоинством поликарбоната служит высокая устойчивость к высоким и низким температурам – от -40 до 120°C. Кроме того, поликарбонат склонен к затуханию при воздействии открытого огня, способствуя пожарной безопасности, и устойчив к воздействию кислот.

Среди недостатков поликарбоната можно выделить достаточно высокую гигроскопичность. Катушки с нитью рекомендуется хранить в сухих местах и, желательно, в вакуумной упаковке. Кроме того, поликарбонат несколько уязвим к ультрафиолетовому свету, что со временем приводит к потере прочности, и уязвим к воздействию нефтепродуктов и органических растворителей.

Его лучше печатать в разогретой камере, но и для печати небольших объектов подогреваемая площадка также допустима.

Поликарбонат имеет температуру стеклообразования примерно от 150 °C, далее при нагреве он размягчается и при температуре 300°C он течет.

Экспериментально было отмечено, чем больше скорость и выше температура, объект, в конечном результате, был напечатан более четким, и цвет был ближе к белому, а не прозрачному.

Поливиниловый спирт или PVA пластик

Поливиниловый спирт (ПВС, международное *PVOH*, *PVA* или *PVAL*) – искусственный, водорастворимый, термопластичный полимер.

Основные температурные показатели:

- температура стеклования: 85 °C;
- температура плавления: 220 – 232 °C;
- температура деструкции: около 230 °C.

В настоящее время промышленный синтез ПВС осуществляют путем полимераналогичных превращений, в частности, с использованием в качестве исходных полимеров простых и сложных поливиниловых эфиров, таких как ПВА. К основным способам получения ПВС можно отнести различные варианты омыления ПВА в среде спиртов или в воде в присутствии оснований и кислот.

Поливиниловый спирт, полученный из поливинилацетата, является тактическим полимером. Кристалличность ПВС обусловлена наличием большого числа гидроксильных групп в полимере. На кристалличность полимера также оказывают влияние предыстория получения полимера, разветвленность, степень гидролиза и тип распределения остаточных ацетатных групп. Чем выше степень гидролиза, тем выше кристалличность образца ПВС. При термической обработке полностью омыленного продукта его кристалличность повышается и приводит к снижению его растворимости в воде. Чем выше число остаточных ацетатных групп в ПВС, тем меньше образование кристаллических зон. Исключением для растворимости является аморфизованный ПВС. Ввиду малой исходной кристаллично-

сти, полимер (независимо от молекулярной массы) превосходно растворяется в воде [11].

Поливиниловый спирт или «PVA пластик» – уникальный расходный материал, существенно расширяющий возможности 3D-печати при использовании принтеров с двойным экструдером. PVA растворим в воде, что делает его совершенно непригодным для создания долговечных изделий, но позволяет использовать в качестве опорного материала при печати моделей сложной геометрической формы (рис. 6.5).

Поддерживающие опоры из PVA пластика легко растворяются в теплой воде, оставляя прекрасную поверхность объекта и упрощая процесс удаления опор (обычно довольно утомительный). Температура печати приблизительно 170°C и не должна превышать 200°C.



Рис. 6.5. Гильбертов куб, напечатанный ABS-пластиком (серый) и PVA (белый)

HIPS – ударопрочный полистирол

Ударопрочный полистирол (УПС) – непрозрачный бесцветный материал, продукт привитой сополимеризации стирола с бутадиеновым или бутадиен-стирольным каучуком, имеющий двухфазную структуру.

Процесс сополимеризации с каучуком проводят в растворе стирола в присутствии пероксидных инициаторов и регуляторов. $M = 70 \div 100$ тыс. При этом одновременно проходят гомополимеризация стирола и привитая сополимеризация стирола с каучуком. Доля сополимера – около 15%.

Марочный ассортимент определяется способом получения и назначением ударопрочного ПС. При полимеризации в массе буквенное обозначение марки – УПМ, при суспензионной полимеризации – УПС, при механическом методе (компаундирование) – УПК. Марки группируются по величине ударной прочности от сверхударопрочных (например, УПС-1104, УПМ-523) до марок с низкой ударной прочностью (например, УПК-675). За рубежом он имеет названия симак, дилен, люстрекс, амоко РН, стирекс,

стокофлекс, стико (США), каринекс, дистрен, стиросел (Англия), стиромал (Германия). Выпускается стабилизированным в виде белых гранул. Первые две цифры четырехзначного номера марки и первая цифра трехзначного номера соответствуют минимальному значению ударной вязкости с надрезом в Дж/м', последняя цифра – удесятеренное максимальное содержание остаточного мономера.

Этот материал можно считать композиционным, содержащим матрицу жесткого ПС ($M = 70 - 100$ тыс.), с частицами каучука размером 1–5 мкм, окруженными тонким слоем привитого сополимера. Несмотря на низкую молекулярную массу полистирольной матрицы, благодаря присутствию каучука вязкость ударопрочного ПС близка по величине к вязкости ПС общего назначения ($ПТР=1,5-15$ г/10 мин). Плотность – $1040-1070$ кг/м³.

Наличие эластичных частиц, химически связанных с жесткой матрицей, повышает ударную прочность и эластичность этого материала по сравнению с ПС. По химическим свойствам он близок к ПС.

Непрерывная фаза (матрица) образована полистиролом. Дискретная фаза (микрогель) – частицами каучука овальной формы с размерами 2-5 мкм. Каучуковые частицы окружены тонкой пленкой привитого сополимера стирола на каучуке, а внутри частиц содержится также окклюдированный полистирол, в результате чего увеличивается эффективный объем каучуковой фазы. От объема последней во многом зависят свойства ударопрочного полистирола. Ударопрочный полистирол выпускается стабилизированным, в виде белых гранул. Основные методы переработки – литье под давлением и экструзия листа с последующим пневмо- или вакуумформованием.

Условное обозначение ударопрочного полистирола в соответствии с ГОСТ 28250-89 состоит из букв УП – ударопрочный, сразу за которыми указывается метод синтеза полистирола: М – полимеризацией в массе, Э – полимеризацией в эмульсии, С – полимеризацией в суспензии. Далее через тире две цифры обозначают ударную вязкость. Следующие две цифры указывают удесятеренное содержание остаточного мономера. Кроме того, в марку может включаться буква, означающая предпочтительный способ переработки.

Пример условного обозначения ударопрочного полистирола, полученного полимеризацией в массе с ударной вязкостью 7 кДж/м² и остаточным содержанием мономера 0,3 %, предназначенного для переработки экструзионным методом: УПМ-0703 Э.

HIPS (ударопрочный полистирол) – пластмассовая нить, растворяющаяся в лимонене, иногда используется для создания поддерживающих структур (особенно для *ABS*), которые могут быть легко удалены без механического воздействия. Лимонен – это естественный растворитель, извлекаемый из корки лимонов и других цитрусовых. Температура печати *HIPS* приблизительно 230°C.

***PET* – полиэтилентерефталат**

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) – сложный полиэфир этиленгликоля и терефталевой кислоты (лавсан).

ПЭТФ получают из диметилтерефталата и этиленгликоля через реакцию переэтерификации с последующей поликонденсацией дигликольтерефталата в расплаве в присутствии катализатора (например, ацетата цинка) в токе азота. ПЭТФ выпускается в виде квадратных гранул в стабилизированном виде. За рубежом ПЭТФ имеет названия майлар, дакрон (США), мелинекс, терилен (Англия), хостафан (Германия), эстар, терфан (Франция), монтивел (Италия), лумиррор (Япония).

ПЭТФ – слабополярный полимер с низким водопоглощением, однако перед переработкой его необходимо сушить. Он растворяется при нагревании в фенолах, трифторуксусной кислоте, метиленхлориде, циклогексаноне. Нестоек к щелочам и концентрированным кислотам, бензо-и маслостоек; нетоксичен.

Закристаллизованный ПЭТФ является термопластом конструкционного назначения. Он обладает высокой прочностью (в том числе при ударных нагрузках) и жесткостью в широком диапазоне температур. Его морозостойкость ниже – 100°С. Прочность пленок значительно повышается при ориентационной вытяжке. Высокие диэлектрические характеристики позволяют использовать его для производства тонких конденсаторных пленок и деталей электротехнического назначения.

ПЭТФ – антифрикционный материал с высокой износостойкостью. Он стоек к действию УФ- и ионизирующих излучений, является самозатухающим материалом.

ПЭТФ имеет малую вязкость расплава и хорошо перерабатывается литьем под давлением и экструзией (пленки). Используется для производства корпусных, электротехнических деталей.

Все больше широкое применение находит близкий по химической структуре и свойствам к ПЭТФ полибутилентерефталат (ПБТФ) – сложный эфир бутиленгликоля и терефталевой кислоты.

Прорыв ПЭТФ на мировой рынок произошел в 70-х гг. прошлого века. Материалы на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) используются за рубежом для упаковки пищевых продуктов уже более 30 лет. Основным направлением использования ПЭТФ является применение полимера при изготовлении бутылочной тары, где он быстро вытесняет такой традиционный материал, как стекло. Бутылки из ПЭТФ занимают сегодня лидирующее положение среди упаковок для растительного масла, газированных напитков и питьевой воды, так как ПЭТФ обладает высокими барьерными свойствами к воздействию кислорода и углекислого газа. Настоящий прорыв ПЭТФ совершил в 90-х гг., когда в бутылки из него начали разливать пиво.

PET (полиэтилентерефталат) представляет собой бесцветную нить с очень высоким уровнем прозрачности. Материал легкий и ударопрочный. Предназначен для печати прозрачных моделей.

Для печати используются настройки аналогичные настройкам *PLA*:

- температура печати 210 - 220 °С;
- температура платформы 65 °С;
- скорость печати 20 - 40 мм/с;
- температура стеклования 60 °С;
- плотность 1,38 кг/дм³.

При 100 % заполнении модели достигается максимальная прозрачность.

Поливинилхлорид (ПВХ) для 3D-печати

ПВХ – полимер винилхлорида. Международное обозначение – *PVC* (от англ. *Polyvinyl chloride*).

ПВХ получают радикальной полимеризацией винилхлорида в присутствии пероксидных или азоинициаторов. В промышленных условиях полимеризацию осуществляют в основном в суспензии (в водной среде), а также в массе и в эмульсии.

Марочный состав определяется способом получения ПВХ, а также величиной средней молекулярной массы полимера, характеризуемой константой Фикентчера K_{ϕ} , которая соответствует вязкости раствора полимера. Для промышленных марок константа Фикентчера изменяется от 50 до 80, при этом степень полимеризации и практически линейно растет от 450 до 1750: $n \approx 40(K_{\phi}-40)$.

Марки ПВХ, полученного полимеризацией в суспензии, имеют буквенное обозначение ПВХ-С, в эмульсии – ПВХ-Е, в массе – ПВХ-М. Первые две цифры после буквенного обозначения указывают на минимальную величину K_{ϕ} . Буквы после цифр определяют возможное применение ПВХ данной марки. Так, буква М – ПВХ для мягких изделий, Ж – для жестких изделий, П – для паст. Например, ПВХ-С 7058 М – это суспензионный ПВХ с $K_{\phi} \geq 70$ (средняя степень полимеризации – 1200), рекомендуемый для изготовления мягких изделий.

ПВХ выпускается в виде порошка с размером частиц 100–200 мкм.

ПВХ характеризуется очень широким молекулярно-массовым распределением. Степень полимеризации для различных фракций полимера одной и той же марки может изменяться в несколько десятков раз. Разветвленность макромолекул составляет 2–5 на 1000 атомов углерода основной цепи и зависит от способа получения полимера.

При нагревании до температур более 150–170° С при переходе в вязкотекучее состояние ПВХ начинает разлагаться с выделением большого количества тепла и хлороводорода с образованием сопряженных двойных связей. Это вызывает уже на начальных стадиях деструкции (до заметного изменения физико-механических характеристик) потемнение полимера.

Выделяющийся хлороводород ускоряет процесс разложения, что делает невозможной переработку ПВХ обычными методами, без термостабилизации.

Большое содержание хлора в ПВХ делает его самозатухающим материалом. ПВХ – это полимер общетехнического назначения. На практике имеют дело с винипластами, пластикатами и пластизолями ПВХ.

Хотя большинство материалов, используемых в 3D-печати, заимствуются из ассортимента уже существующих промышленных полимеров, поливинилхлорид не находил применения в аддитивном производстве.

Из поливинилхлорида выпускают большой ассортимент продукции: пластиковые трубы, заменители кожи, защитные пленки на моющихся обоях и натяжных потолках, грампластинки и т.п. Поливинилхлорид обладает массой заманчивых свойств: он прочен, дешев, устойчив к воздействию внешней среды и даже огня. Благодаря этому ПВХ занимает третье место среди термопластов по объему промышленного использования. Почему же ПВХ не нашел своего места в 3D-печати?

Все дело в токсичности. Хотя в стабильном виде этот пластик не представляет опасности, при сгорании он выделяет букет токсичных и канцерогенных хлорорганических соединений, включая фосген (газ удушающего действия, использовавшийся в качестве химического оружия в Первую мировую войну) и диоксины (вызывают нарушения обменных процессов в организме человека), что усложняет утилизацию. Кроме того, в промышленный ПВХ зачастую добавляются свинец (в качестве стабилизатора) и фталаты (в качестве пластификаторов). Последние накапливаются в готовом продукте и в течение некоторого времени выделяются в газообразной форме. Токсичные вещества, входящие в состав термопластов применяются и в других видах полимеров. Например, ABS (акрилонитрилбутадиенстирол), символ «S» в обозначении полимера означает стирол – химическое вещество, поражающее нервную систему человека. То же самое касается и полистирола (HIPS). Поликарбонат может стать источником канцерогенного бисфенола А: это вещество используется в качестве отвердителя, а в готовых изделиях может присутствовать в относительно небольших остаточных объемах, выделяясь при нагревании. Именно поэтому и не рекомендуется использовать поликарбонат для изготовления контейнеров для горячей еды или напитков.

Хотя концентрации вредных веществ в воздухе при 3D печати в большинстве случаев достаточно малы, многие из них имеют кумулятивный эффект, накапливаясь в организме. Потому помещения, в которых производят 3D печать, должны оснащаться хорошей вентиляцией. Относительно безопасными полимерами, используемыми для 3D печати, являются полилактид и поликапролактон.

Акрил

Акрил – тип пластмассы (из группы синтетических производных одной из ненасыщенных органических кислот) с короткой цепочкой.

Изменяя реагенты и методы формовки, можно получить продукт либо твердый и прозрачный, либо мягкий и упругий, либо жидкий. Прозрачность, прочность и стабильность размеров получаемых изделий делают акрилы полезными для изготовления деталей способом литья в формах, линз, клеев и красок.

Акрил – обиходное определение для группы синтетических материалов на основе производных акриловой и метакриловой кислот и полимерных композиций из них.

Акрил используется в 3D печати для создания прозрачных моделей (рис. 6.6).

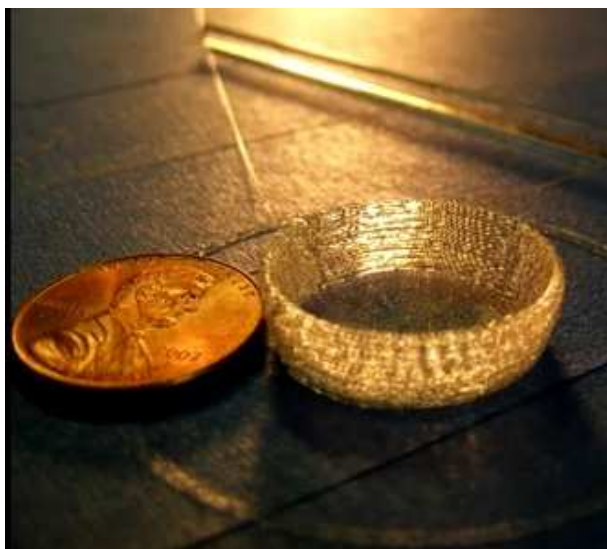


Рис. 6.6. Изделия, напечатанные из акрила

При использовании акрила необходимо учитывать следующие особенности: для данного материала нужна более высокая температура плавления, чем для АВС-пластика, и он очень быстро остывает и твердеет. В разогретом акриле появляется множество мелких воздушных пузырьков, которые могут вызвать визуальные искажения готового изделия.

Поликапролактон (*PCL*)

Поликапролактон близок по свойствам к биоразлагаемым полиэфирам. Это один из самых популярных расходных материалов для 3D печати. Он имеет низкую температуру плавления, быстро затвердевает, обеспечивает прекрасные механические свойства готовых изделий, легко разлагается в человеческом организме и безвреден для человека. Кроме того, он может применяться сразу в нескольких технологиях 3D печати: *SLS*, *ZCorp* и *FDM*.

Полипропилен (PP)

Полипропилен – наиболее легкий из всех известных жестких полимеров, отличающийся высокой прочностью на разрыв и твердостью. Благодаря своей кристаллической структуре ПП сохраняет форму и механические свойства вплоть до температуры плавления и может подвергаться обычной стерилизации. По прочности ПП превосходит ПЭ, однако уступает по морозостойкости.

Марочный ассортимент определяется способом получения и показателем текучести расплава полимера (от 0,3 до 23 г/10 мин). В названиях базовых марок содержится пять цифр. Две первые цифры определяют способ получения ПП, три последние цифры соответствуют удесятеренному значению ПТР. Так, ПП 21090 имеет ПТР, равный 9 г/10 мин. Выпускается в виде гранул, отмытым от катализаторов и атактической фракции и стабилизированным. Нестабилизированный порошкообразный ПП имеет буквенное обозначение марок (А, Б и В).

За рубежом ПП имеет названия профакс, полипро, олеформ (США), моплен (Италия), гостален (Германия), пропатен (Англия), данлай, донбанд (Япония).

ПП является неполярным полимером. Растворяется при повышенных температурах в ароматических и гидроароматических, а также хлорированных углеводородах, маслостоек, стоек к кислотам и щелочам.

Наличие третичного углерода в молекулярной цепи делает его менее стойким к термоокислительной деструкции ($T_{\text{дестр}} \geq 300^\circ\text{C}$) и действию ионизирующих излучений.

ПП относится к полимерам общетехнического назначения. Он обладает высокой химической и водостойкостью, имеет хорошие электроизоляционные характеристики. Имеются марки, допущенные к контакту с пищевыми продуктами.

К недостаткам ПП следует отнести низкую морозостойкость (-15°C); он горюч, плохо склеивается, способен накапливать электростатические заряды.

ПП хорошо перерабатывается всеми основными методами переработки термопластов. Он используется в медицине, пищевой промышленности, в электротехнике (в том числе в виде ориентированных конденсаторных пленок) и так далее. При его переработке следует учитывать возможность ухудшения механических свойств при неправильном выборе режима охлаждения изделий.

Полипропилен – это самая лёгкая из всех ныне существующих пластических масс. По сравнению с полиэтиленом низкого давления хуже плавится и лучше противостоит истиранию. При этом уязвим к активному кислороду и деформируется при отрицательных температурах.

Полифенилсульфон, *PPSU*, *PPSF*

Полифенилсульфон (*PPSF* или *PPSU*) является одним из видов формовочного пластика. Полифенилсульфон является тепло- и химически стойким материалом. Он используется в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Полифенилсульфон практически не имеет температуры плавления, благодаря своей аморфной природе, и предполагает прочность на разрыв до 8000 фунтов на квадратный дюйм (или 551,58 Бар). Его коммерческое название является RadelR. Обладая деформационной теплостойкостью 207°C, материал может работать в условиях высокой температуры и при этом выдерживать ударные нагрузки. Полимер обладает природной негорючестью и великолепной химической стойкостью.

Основные особенности материала:

- температура отклонения под нагрузкой 207 °C;
- непревзойденная ударная прочность;
- великолепная гидролитическая стабильность;
- великолепная химстойкость;
- окрашиваемость.

Данный материал пришёл в 3D печать из авиапромышленности. Он практически не горит, характеризуется теплостойкостью, высокой твёрдостью. Напоминает обычное стекло, но превосходит его по прочности. Используется в технологиях 3D печати: *SLS* и *FDM*.

PPSF от компании *Stratasys* сертифицирован для аэрокосмического и медицинского применения. Позиционируется как сырьё для производства вспомогательных медицинских приспособлений, может быть стерилизован в паровых автоклавах. Применяется в производстве деталей для лабораторных установок в химической промышленности.

Полиэтилен низкого давления (*HDPE*)

Это самый распространённый вид пластмассы в мире, из которого изготавливают ПЭТ-бутылки, канистры, трубы, плёнки, пакеты и т.д. В 3D печати полиэтилен низкого давления является непревзойдённым лидером. Данный материал может быть использован в любой технологии 3D печати [16].

В зависимости от условий полимеризации получают марки ПЭ, различающиеся по разветвленности и содержанию сомомера, вводимого для регулирования степени кристалличности.

Марочный состав определяется способом получения, плотностью (от 910 до 935 кг/м³) и показателем текучести расплава ПТР (от 0,3 до 20 г/10 мин).

В названиях базовых марок содержится восемь цифр. Четыре первые цифры указывают на способ получения, пятая соответствует группе плотности, три последние через дефис – удесятеренному значению среднего показателя текучести расплава полимера. Так, например, марка ПЭ 15803–

020 принадлежит ПЭНП (до 930 кг/м^3), имеющему показатель текучести расплава 2 г/10 мин. В обозначении композиций сохраняются лишь три первые цифры базовой марки. ПЭНП выпускается стабилизированным в виде гранул, реже – в виде порошка.

За рубежом ПЭНП имеет названия: петротен (США), алкатен (Англия), хостален *LD* (Германия), стафлен (Япония), лотрен (Франция), фертен (Италия).

Комплекс свойств ПЭНП, полученного радикальной полимеризацией, определяется разветвленной структурой его макромолекул – 15-25 ответвлений на 1000 атомов углерода цепи. Молекулярная масса $M = 30 \div 500$ тыс.

ПЭНП способен кристаллизоваться. Наличие разветвлений ограничивает степень кристалличности (менее 60%). Температура плавления составляет $108-110^\circ\text{C}$. Высокая скорость кристаллизации делает величину степени кристалличности и, следовательно, свойства ПЭ мало зависящими от режима охлаждения. Температура деструкции – 320°C .

ПЭ является неполярным полимером. При нормальных условиях вследствие кристалличности он не растворяется в известных органических растворителях; при нагревании выше 80°C растворяется в алифатических и ароматических растворителях и их галогенопроизводных. Стоек к кислотам и щелочам, нестойк к сильным окислителям.

ПЭНП относят к термопластам общетехнического назначения. Он отличается сравнительной дешевизной и технологичностью, морозостоек, сохраняет эластичность до -70°C , обладает высокой химической стойкостью, что позволяет использовать его в изготовлении тары для агрессивных жидкостей: имеет малое водопоглощение. ПЭ инертен к физиологическим средам и пищевым продуктам, кроме жиров. Он является прекрасным электроизоляционным материалом и используется для низко- и высокочастотной изоляции.

ПЭНП радиационностоек, может сшиваться при воздействии ионизирующих излучений, имеет низкую газопроницаемость.

К недостаткам этого полимера следует отнести низкие предельные температуры эксплуатации (невозможность стерилизации), низкие прочностные характеристики и твердость, горючесть, способность накопления электростатических зарядов.

ПЭНП перерабатывается всеми основными методами переработки термопластов, не склеивается без специальной обработки поверхности. Низкая стоимость позволяет использовать его для изготовления тары и изделий культурно-бытового и медицинского назначения. Более половины производимого ПЭНП перерабатывается в пленки для упаковки и нужд сельского хозяйства.

Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)

Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) получают полимеризацией на катализаторах типа Циглера–Натта, протекающей по ионно-координационному механизму при температуре 80°C и давлении 0,3–0,5 МПа.

Обозначение марок ПЭВП аналогично обозначению марок ПЭНП, но начинается с цифры «2». Плотность изменяется от 945 до 955 кг/м³, а ПТР – от 0,1 до 17 г/10 мин.

Выпускается стабилизированным в виде гранул или порошка.

За рубежом ПЭВП имеет названия бакелит (США), карлон (Англия), хостален *G* (Германия), хей-жекс (Япония), манолен (Франция), монлен (Италия).

ПЭ хотя и имеет хороший комплекс свойств, но практически теряет текучесть (высокомолекулярный полиэтилен). Предел прочности при растяжении превышает 40 МПа.

Низкая разветвленность приводит к высокой степени кристалличности, которая составляет 70–80%, а температура плавления – 120–125°C. ПЭВП обладает большей стойкостью к растворителям, чем ПЭНП, растворяется при повышенной температуре в алифатических и ароматических растворителях и их галогенопроизводных. Стоек к кислотам и щелочам, нестойк к сильным окислителям.

Вследствие более высокой степени кристалличности ПЭВП имеет более высокие прочностные показатели: теплостойкость, жесткость и твердость. Он имеет высокую морозостойкость, химическую и радиационную стойкость. Наличие остатков катализаторов не позволяет использовать его в контакте с пищевыми продуктами (требуется отмывка от катализаторов). Несколько хуже, чем у ПЭНП (из-за остатков катализаторов), высокочастотные электрические характеристики, однако это не ограничивает применения ПЭВП в качестве электроизоляционного материала.

ПЭВП перерабатывается в изделия всеми основными методами, наиболее часто – литьем под давлением. Хорошо сваривается. Он используется для изготовления тары, листов, труб, ориентированных лент и различных изделий технического назначения.

Полиэтилен среднего давления (высокой плотности) – ПЭСД – получают полимеризацией в растворителе в присутствии оксидов *Co*, *Mo*, *V* при 130–170°C и давлении 3,5–4 МПа.

По большинству эксплуатационных и технологических свойств он близок к ПЭВП, однако большая упорядоченность надмолекулярной структуры делает его более прочным, жестким и теплостойким. При сополимеризации этилена с небольшими количествами α -олефинов – пропилена, бутилена и других (0,2–3% мол.) – можно получать линейные полиэтилены средней (930–940 кг/м³) и низкой (менее 930 кг/м³) плотности (ПЭСП и ЛПЭНП). Эти модификации ПЭ в настоящее время получают все более

широкое применение, так как совмещают положительные качества ПЭНП и ПЭВП. Так, пленка из ЛПЭНП, сохраняя эластичность, характерную для пленок из ПЭНП, имеет большую прозрачность. Экструзионные пленки, изготовленные из ПЭСП, по внешнему виду подобны бумаге (шероховатость, мутность), а прочностные характеристики их такие же, как у пленок из ПЭВП, однако они более эластичны.

Высокотемпературные *FDM*-пластики для промышленной 3D-печати

К инженерным пластикам применяется ряд требований, связанных с устойчивостью к высоким и низким температурам, огнестойкостью, механической прочностью. Как правило, все сразу. Так что «плывущий» при взаимодействии с окружающей средой *PLA* или отлично горящий *ABS* в промышленности, где требуются вышеуказанные свойства, не подходят.

Филаменты с поликарбонатом и на основе полиамида мы рассмотрели выше. Детали из таких материалов могут работать при температурах 100 °С и немного выше.

Работать с поликарбонатом или полиамидом можно на обычном 3D-принтере.

Описанные ниже филаменты требуют других экструдеров и поддержания температурного режима в рабочей камере, то есть нужно специальное оборудование для печати высокотемпературными пластиками.

Полиэфирэфиркетон, *PEEK*

Рабочая температура изделий из *PEEK* достигает 250°С, возможен кратковременный нагрев до 300 °С. Это пластик самозатухающий, термостойкий, химически инертный. Из *PEEK* производится медицинское оборудование и импланты, стойкость к истиранию позволяет печатать из него детали механизмов. Недостатков у *PEEK* два: высокая цена и умеренная ударопрочность.

Полиэфиримид, *PEI (Ultem)*

Это семейство пластиков разработано компанией *SABIC*. Характеристики *PEI* скромнее показателей *PEEK*, но стоимость заметно ниже. Основные марки для печати функциональных деталей: *Ultem 1010* и *9085*. *PEI* востребован в аэрокосмической отрасли – его масса значительно меньше, в сравнении с алюминиевыми сплавами. Рабочие температуры изделий, в зависимости от модификации материала, достигают 217°С.

Преимущества у *PEI* те же, что и у *PEEK* – химическая и температурная стойкость, механическая прочность. Именно этот материал компания *Stratasys* продвигает как частичную замену металлу в аэрокосмической отрасли, для беспилотников, изготовления оснастки для формовки, быстрой печати функциональных деталей в опытном производстве.

Полисульфон, PSU

Менее распространен по сравнению с *PPSU*, обладает схожими физическими характеристиками, химически инертный, самозатухающий. Рабочая температура – 175 °С, до 33% дешевле по сравнению с *PPSU*.

Большинство материалов для *FDM*-печати имеют композитные версии. Если говорить о *PLA*, то в него добавляют порошки металлов или дерева, для изменения эстетических свойств. Инженерные филаменты армируются углеволокном для увеличения жесткости детали. Влияние таких добавок на свойства пластика зависит не только от их количества, но и от размера волокон. Если мелкодисперсный порошок можно считать декоративной присадкой, то волокна уже значительно изменяют характеристики пластика. Само по себе слово *Carbon* в названии материала еще не означает выдающихся свойств, нужно смотреть результаты испытаний. Например: *Stratasys Nylon12CF* обладает почти вдвое большей прочностью на разрыв, при испытании вдоль слоев, чем *Nylon12*.

Еще один интересный вариант – реализация непрерывного армирования от *Markforged*. Компания предлагает армирующий филамент для совместной *FDM*-печати с другими пластиками.

Рассмотренные высокотемпературные пластики отличаются от привычных материалов высокой температурой печати, что требует применения специального оборудования и серьезной термостойкостью и механической прочностью изготовленных деталей. Для работы с такими филаментами нужны 3D принтеры с рабочей температурой экструдера от 350 °С и термостабилизированной рабочей камерой.

Получение полимерных материалов с заданной структурой методами аддитивных технологий

Появление 3D принтеров открывает принципиально новые возможности в компьютерном дизайне полимерных материалов. Появилась возможность непосредственно реализовать различные структуры в полимерных материалах посредством 3D печати [13-15]. В Волжском политехническом институте (филиале) ВолгГТУ спроектированы 3D модели и напечатаны на изготовленных в институте 3D-принтерах на основе различных полимеров материалы со сложной микроструктурой. На рис. 6.7, 6.8 и 6.9 приведены некоторые примеры прототипирования микропористых и самоармированных полимерных материалов.

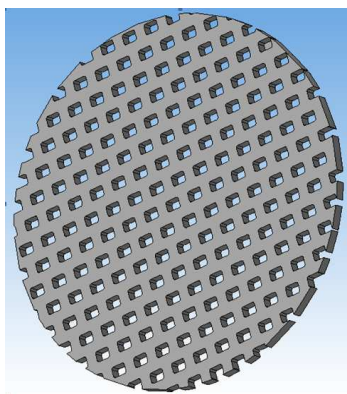


Рис. 6.7. Материал из АБС-пластика с прямоугольными микропорами (3D-модель). Характеристики образца: - диаметр диска 10 мм; - толщина диска 0,3 мм; - размер ячейки 0,3 x 0,4 мм; толщина стенки между ячейками 0,3 мм.

Необходимо отметить, что можно получить чрезвычайно большое разнообразие макро- и микрогетерогенных структур с элементами практически любой формы. В настоящее время изучаются механические и физико-химические свойства таких материалов, в том числе, в экстремальных условиях эксплуатации.

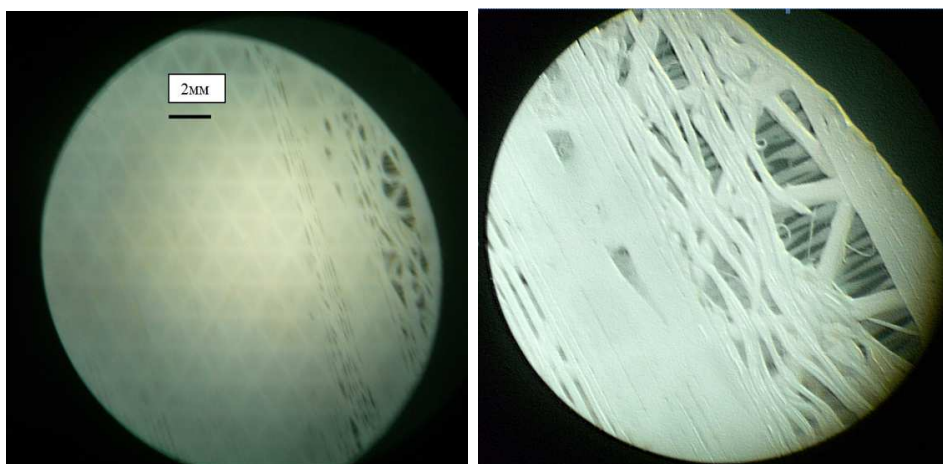


Рис. 6.8. Материал из АБС- пластика с самоармированием - полигональные и волокнистые структуры (напечатано на 3D-принтере ВПИ «3DLife»)



а)

б)

Рис. 6.9. Образцы из АБС- пластика с заданной структурой материала самоармированием (полигональные и пористые структуры (напечатано на 3D-принтере ВПИ «3DLife»). а) - двусторонняя «лопатка» для механических испытаний; б) диск с заданной пористой структурой

Кроме того, ведется изготовление методом 3D-печати изделий сложной геометрической формы с диаметром до 800мм и толщиной до 40мм. Метод позволяет отказаться от изготовления чрезвычайно дорогостоящих металлических прессформ и добиться существенного снижения материалоемкости изделия за счет создания силовых гетероструктур в изделии.

7. Особенности подготовки модели к FDM печати

Рассмотрев основные виды материалов, следует приступить к особенностям подготовки модели к печати. Прежде чем приступать к основам подготовки модели, необходимо дать несколько определений.

Слайсер (*Slicer*) – программное обеспечение, необходимое для перевода цифровой 3D модели в управляющий код для 3D принтера (*G-code*). Формат файла трехмерной модели в основном *.stl* либо *.obj*.

Слайсеров существует довольно много, самые распространенные – это *CraftWare*, *Kisslacer*, *Slic3r*, *Skineforge*, *Cura* и др., каждый из них имеет свои особенности. В слайсере выставляются все настройки необходимые для печати – температуры печати, размеры, слои, размер экструзии, заполнение и др.

Модель обрабатывается в программе по слоям. Каждый слой состоит из периметра или заливки (рис. 7.1). Модель может иметь разный процент заполнения заливкой, также заливки может и не быть (пустотелая модель с различной толщиной стенок). Все параметры задаются программно.

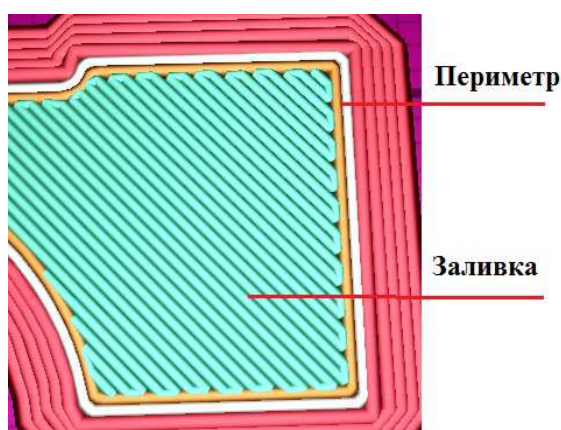


Рис. 7.1. Периметр и заливка модели

Процентное соотношение заливки модели представлено на рисунке 7.2.

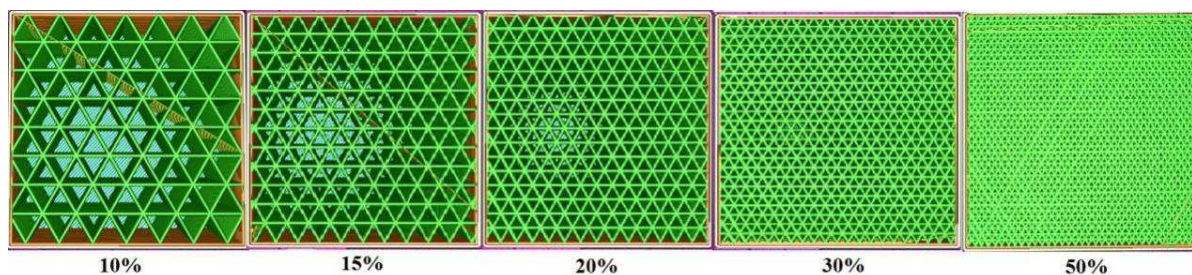


Рис. 7.2. Процентное заполнение модели при размере отверстия сопла 0,42 мм (Слайсер *CraftWare*)

При печати из *ABS* пластика необходимо плоское основание у модели для хорошей адгезии (прилипания) первых слоев, чтобы в дальнейшем модель была устойчива и не отлипала от поверхности платформы. Если деталь имеет не плоское основание, то деталь дополнительно устанавливают на подложку из пластика, так называемый *raft* (рис. 7.3).

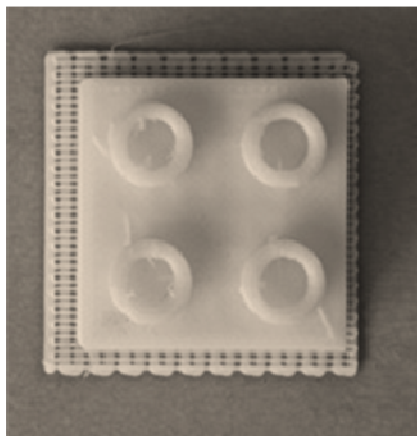


Рис. 7.3. *Raft* для модели

Рафт (*raft*) – подложка, конструкция, которая строится под моделью. Она не однородная, строится в виде сеточки. Рафт исправляет незначительные неровности платформы и обеспечивает прочное сцепление первого слоя модели с платформой. Рафт после печати требует удаления с помощью механической обработки. Это портит основание модели.

Также для устранения отлипания детали делают дополнительное основание – *brim* (указан красным цветом на рисунке 7.1).

Брим (*brim*) – кайма вокруг модели, состоящая из дополнительных первых слоев. Брим удобен для лучшей адгезии в случае отклеивания краев или их деформации. Кроме этого, очень полезная вещь, если основание у модели очень маленькое, неустойчивое. После печати брим обрезается. В отличие от рафта, брим не деформирует первый слой модели.

Для печати из *PLA* пластика *brim* и *raft* не нужны.

Есть еще одна полезная функция в слайсере, которая используется для удобства печати – *Skirt*.

Skirt (скирт, скёрт, юбка) – это тонкий ободок пластика вокруг периметра модели. Он не связан с моделью и не влияет на качество печати модели. *Skirt* позволяет контролировать работу экструдера непосредственно перед началом печати модели и насколько хорошо пластик прилипает к поверхности платформы. Skirt может печататься в один или несколько слоев.

При печати необходимо правильно располагать модель, так как зависимости точки приложения нагрузки, прочность модели будет разная, если вдоль слоев нагрузка, то модель не стойка к воздействиям, если поперек, то прочность модели увеличивается во много раз.

На рисунке 7.4 представлен пример модели, обработанной в слайсере *CraftWare*.

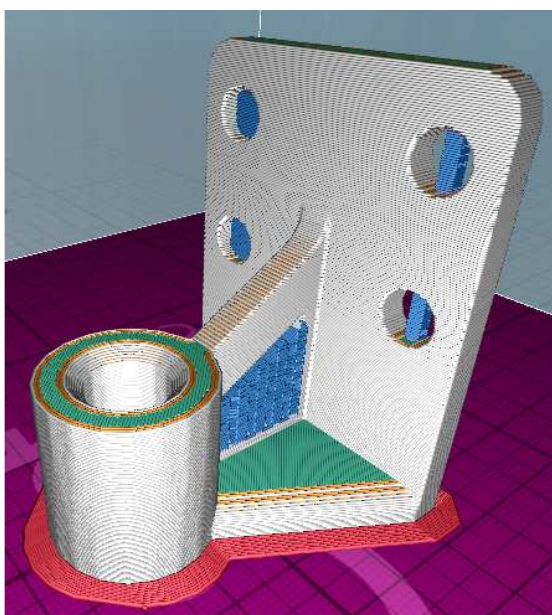


Рис. 7.4. Пример модели, обработанной в слайсере *CraftWare*

7.1. Настройка программы-слайсера *KISSlicer* для 3D принтера

Программное обеспечение *KISSlicer* позволяет подготовить 3D модели к печати на 3D принтере. Общий вид оболочки программы *KISSlicer* показан на рис. 7.5

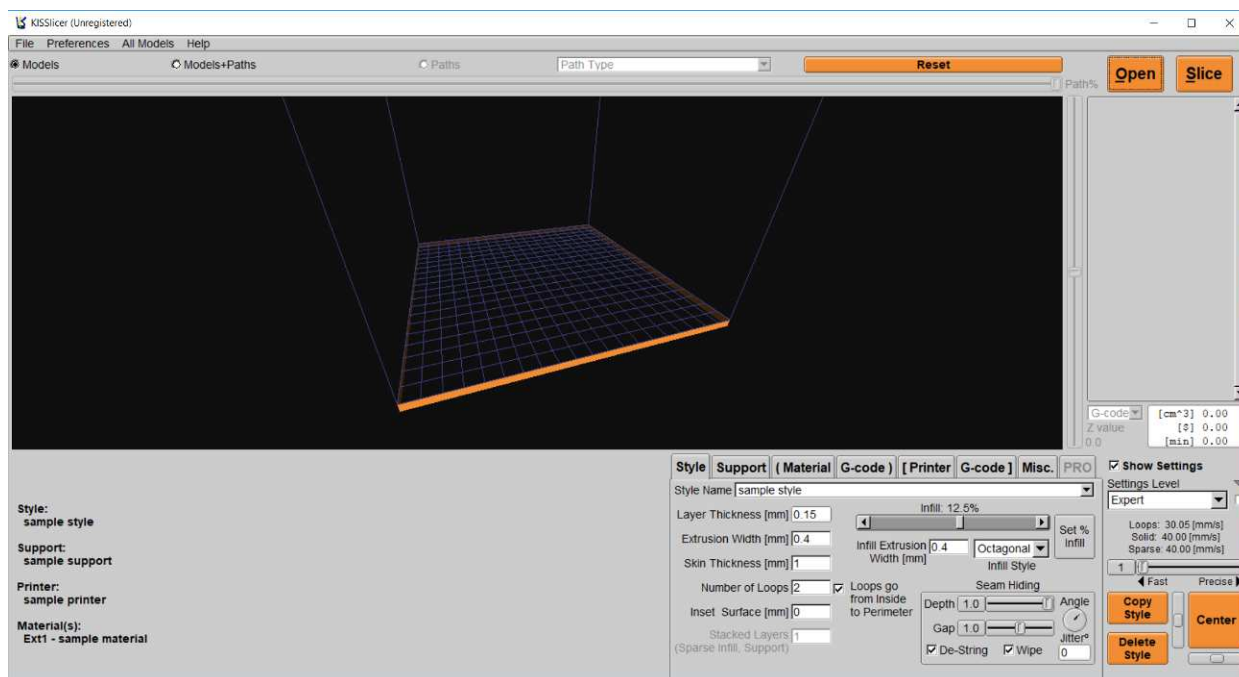


Рис. 7.5. Вид оболочки программы *KISSlicer*

Для загрузки самой модели в программу можно воспользоваться несколькими способами:

- в главном меню выбрать *File/Open STL Model(s)*;
- нажать кнопку *Open* в правом верхнем углу программы;
- перетащить файл в окно программы (функция *Drag and Drop*).

Ниже рассмотрим основные функции и настройки программы, которые помогут сделать процесс 3D-печати максимально эффективным.

Настройка программы *KISSlicer* осуществляется на вкладках, выделенных красным на рис. 7.6. Для скрытия видимости вкладок надо снять галочку в окошке *Show settings*, расположенной справа от вкладок. Это позволяет расширить область, в которой визуализируется модель.

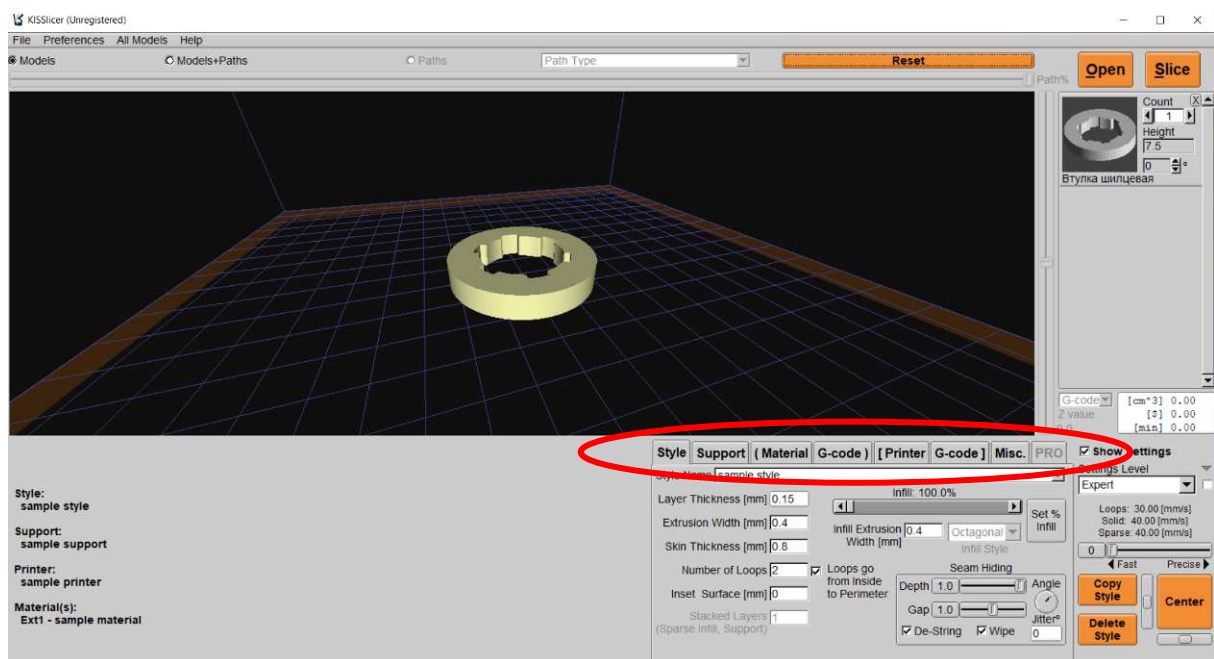


Рис. 7.6. Загрузка модели из файла *STL*

Вкладка *Style*

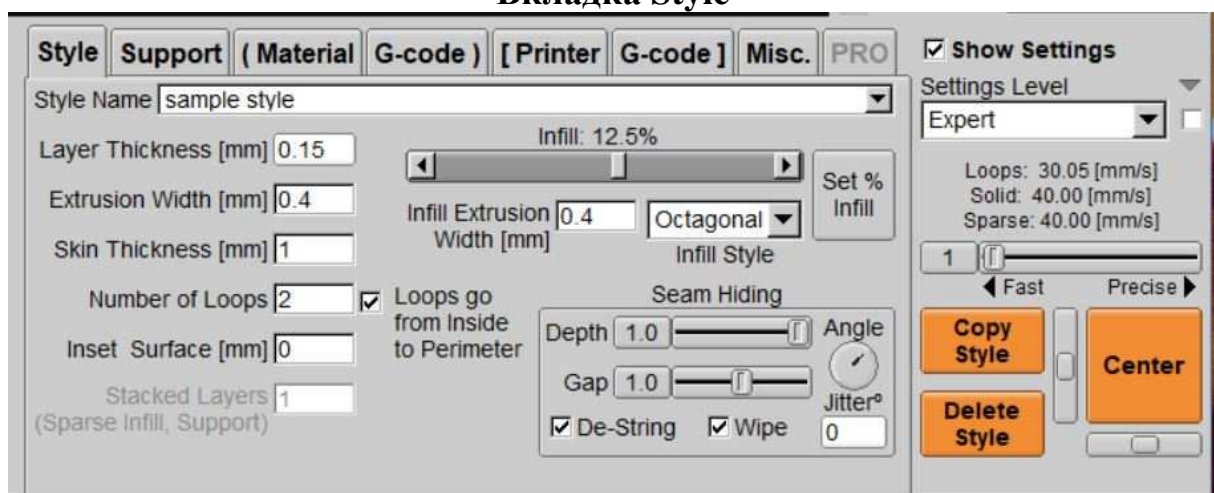


Рис. 7.7. Вкладка *Style*

Вкладка *Style* (рис. 7.7) одна из самых важных, от правильных настроек параметров именно в этой вкладке будут зависеть конечные результаты.

Поле ***Style Name*** позволяет задать высоту слоя печати в границах 0,05-0,25 мм.

Параметр ***Layer thickness*** задает толщину слоя, и чем она больше, тем быстрее будет происходить печать, но качество будет хуже.

Если нет необходимости в высокой детализации печатаемого объекта, тогда для быстрой печати с низким качеством вполне достаточно 75% от диаметра сопла, например, значение 0,3 мм при диаметре сопла 0,4 мм.

Для получения хорошего результата лучше выбрать значение 50% от диаметра сопла.

Для максимальной детализации можно установить значение в 20% или 10% от диаметра сопла, но следует учитывать, что время печати значительно увеличится.

Установка ширины экструзии задается параметром ***Extrusion width*** важно не перепутать данную ширину с диаметром сопла. Ширина экструзии всегда должна быть больше диаметра сопла, и чем выше будет данный параметр, тем быстрее будет происходить печать. В противном случае, уменьшив данную настройку можно увеличить детализацию, но и изделие может быть слишком хрупким.

Skin thickness задает толщину оболочки. Чтобы получить наилучший результат печати, следует устанавливать значение кратным ширине экструзии и толщине слоя.

Inset surface (сжатие поверхности) – обычно устанавливают этот параметр на «0», так как он отвечает за компенсацию усадки материала при печати на заданную величину.

В версии ***PRO*** также можно настраивать параметр ***Stacked layers***. По умолчанию параметр установлен на «1» и, если ничего не изменять, при печати будет производиться поддержка и заполнение каждого слоя. Если же изменить значение на «2» принтер будет печатать одно заполнение с поддержкой на каждые 2 слоя. Данный параметр позволит несколько сократить время печати, но следует учитывать, что могут снизиться механические характеристики изделия.

Скорость печати задается параметром ***Speed slider: fast*** – быстрая печать, ***precision*** – медленная.

Задаем толщину оболочки изделия параметром ***Number of loops***, т.е. здесь мы указываем количество витков по контуру. Можно использовать формулу для определения конечной толщины стенки модели:

Толщина стенок изделия = ***Number of loops*** x ***Extrusion width***.

Для улучшения качества печати деталей, имеющих нависающие части рекомендуется включение параметра ***Loops go from inside to perimeter***. При этом петли будут укладываться от внутренней части периметра к внешней. Следует учитывать, что в данном случае может снизиться точность внешних габаритов.

Движок ***Infill*** используется для изменения внутреннего заполнения печатаемой модели. Этот параметр задается в процентах. Чтобы задать точный процент заполнения, надо нажать кнопку «***Set % infill***» и ввести необходимое значение.

Infill Extrusion Width – устанавливает ширину экструзии и влияет на характеристики прочности.

Если величина ширины экструзии равна диаметру сопла, то благодаря постоянному давлению в сопле, достигается хороший результат печати.

Если величина ширины экструзии больше диаметра сопла, то увеличивается прочность детали, но внешний вид может несколько не соответ-

ствовать ожидаемому результату из-за большего выделения пластика, чем положено.

Infill style – параметр, отвечающий за форму заполнения внутреннего объема 3D модели пластиком (рис. 7.8). Может быть установлен в трех вариантах:

Straight (Прямолинейный): быстрая печать, но не слишком крепкая деталь.

Octagonal (восьмиугольная): крепче, чем при прямолинейном режиме, но медленнее печать.

Rounded (Округлые): немного слабее, чем *Octagonal*, но более быстрая печать. На первый взгляд это выглядит точно так же, как в восьмиугольном режиме, но углы будут более закругленными.

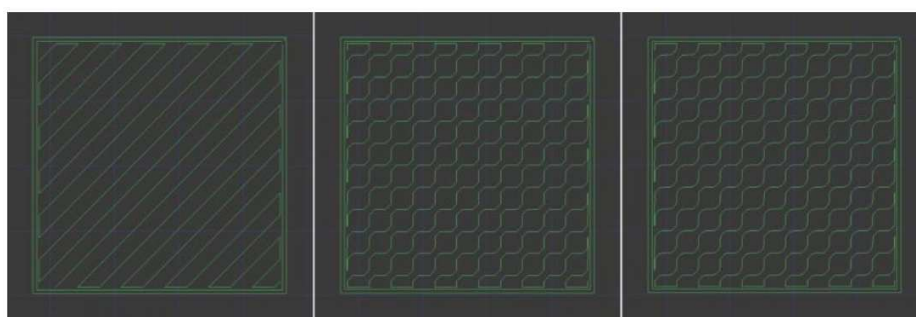


Рис. 7.8. Форма заполнения внутреннего объема 3D модели при различных состояниях *Infill style*. *Straight* (слева), *Octagonal* (в центре), *Rounded* (справа)

Перемещая ползунок параметра **Depth** от 0.00 до 1.00 можно задать глубину, на которую убирается стык. На рис. 7.9 показано минимальное (слева) и максимальное (справа) значение параметра *Depth*.

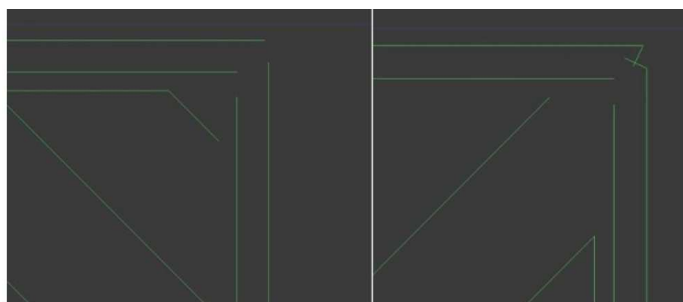


Рис. 7.9. Значения параметра *Depth*: минимальное (слева) и максимальное (справа)

Установить расстояние между стартом и остановкой каждого слоя внешнего контура можно параметром **Gap** и задать значения 0, 1 или 2 (рис. 7.10).

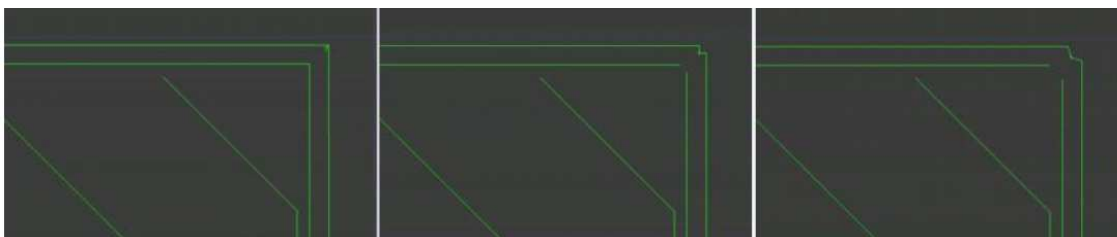


Рис. 7.10. Значения параметра *GAP* 0, 1 и 2 соответственно (слева направо)

Для печати округлых поверхностей рекомендуется применение параметра ***Jitter***, который будет «разбрасывать» швы в заданном диапазоне. Значение 10 достаточно для получения хорошего результата.

Параметр ***Angle*** позволяет выбрать размещение швов на детали.

Wipe – эта функция после завершения экструзии немного возвращает сопло назад по той же траектории, приглаживая филамент. Это позволяет избежать «соплей». Длина возврата сопла (*Backtrack*) устанавливается на вкладке *Material*.

Параметр ***De-String*** задает положительную (*Prime*) подачу нити в начале экструзии и отрицательную (*Suck*) в конце, что задается в соответствующих полях вкладки *Material*.

Для улучшения качества поверхности детали можно задать параметр ***Use corners*** (Используйте углы), который позволяет автоматически прятать начало и конец печати в углах изделия.

Вкладка *Support*

С помощью инструментов вкладки *Support* настраиваются поддержки (рис. 7.11).

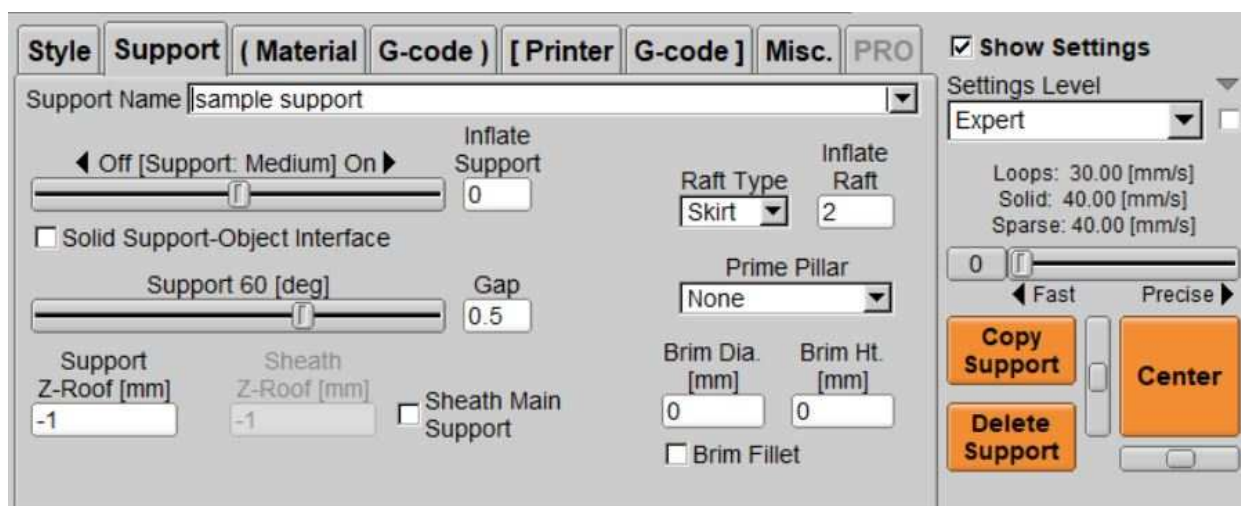


Рис. 7.11. Вкладка *Support*

Support Name – выбранный параметр отвечает за построение поддержки при печати загруженной модели. Возможные варианты:

- *sample support* – поддержка включена;
- *no support* – поддержка выключена.

Параметр ***Support slider*** – задает интенсивность поддержек и включает в себя несколько режимов:

- *Off* – отсутствие поддержек;
- *Coarse* – формирует очень легкие поддержки основных частей;
- *Rough* – формирует легкие поддержки;
- *Medium* – формирует поддержки средней плотности. Это рекомендуемый режим большинства видов печати;
- *Dense* – формирует поддержки повышенной плотности, хорошо подходит для печати сферических объектов;
- *Fine* – формирует поддержки высокой плотности;
- *Ultra* – формирует поддержки самой высокой плотности.

Inflate support – параметр, задающий наложение поддержки. Его значение указывает насколько поддержка будет шире нависающего элемента. По умолчанию установлено значение 1, но для большинства случаев подойдет значение 0.

Solid support-Object interface – этот параметр используется для получения ровной нижней поверхности, но для этого обязательно пользоваться принтером с двумя экструдерами.

Support – этот параметр устанавливает максимальное значение угла наклона печатаемой модели, при котором поддержки не строятся.

Gap – задает расстояние между поддержкой и наружной поверхностью печатаемой модели.

Для сферических деталей рекомендуется задавать низкое значение, например, 0,15. Для вертикальных плоских поверхностей задают значения от 0,5 до 0,7. Выбранное значение влияет на сложность механического отделения поддержки от детали после печати.

Support z-roof – останавливает формирование поддержек на указанной высоте. Чтобы задать создание поддержек для всей высоты модели, надо задать значение этого параметра «-1». При введении других значений формирование поддержек будет остановлено для любой части изделия, когда Z будет выше введенного числа.

Sheath main support создает периметр вокруг несущей конструкции разрезанной поддержки. Это позволяет сформировать более прочную поддерживающую структуру, но удалить ее намного сложнее.

Raft type – задает тип подложки. Возможные режимы:

- *GRID* – в этом режиме между изделием и столом печатается сетка. В случае если печать производится на принтере с двумя экструдерами, также можно выбрать и материал подложки *PRINTER->Extruder materials tab*;
- *PILLAR* – от *GRID* отличается дополнительным слоем микро столбов между сеткой и столом. Данный режим пригодится, когда филамент липкий.
- *SKIRT* – в этом режиме перед началом печати модели печатается контур по периметру модели.

Inflate raft – настраивается параметр *SKIRT*.

Также можно выбрать один из доступных вариантов заливки, используя параметр **Prime pillar / skirt / wall**:

- *Single pillar* создает по одному столбу для каждого работающего сопла. Колонна автоматически подбирается под размеры и размещается рядом с деталью.
- *Skirt (first layer)* (Юбка первый слой) улучшает качество печати на первых этапах.
- *Short wall* (Невысокая стенка) создает стену вокруг изделия до той высоты, пока не останется один экструдер.
- *Wall (all layers)* (Стена (все слои)) схож с режимом *Short wall*, но короткие стенки будут формироваться до завершения процесса печати.

Brim diameter – повторяет контур основания детали и отвечает за ширину брима в мм. Это позволяет увеличить адгезию изделия со столом.

Brim Ht задает высоту брима и, как правило, остается на отметке «0», что означает печать брима в один слой, но чтобы улучшить адгезию этот показатель можно увеличивать, это приведет к более сложному отделению брима от напечатанной детали.

Brim fillet – в случае большого значения параметра Brim ht автоматически применяет скругление.

Вкладка *Material*

На вкладке *Material* (рис. 7.12) настраиваются важные параметры, в зависимости от выбранного материала.

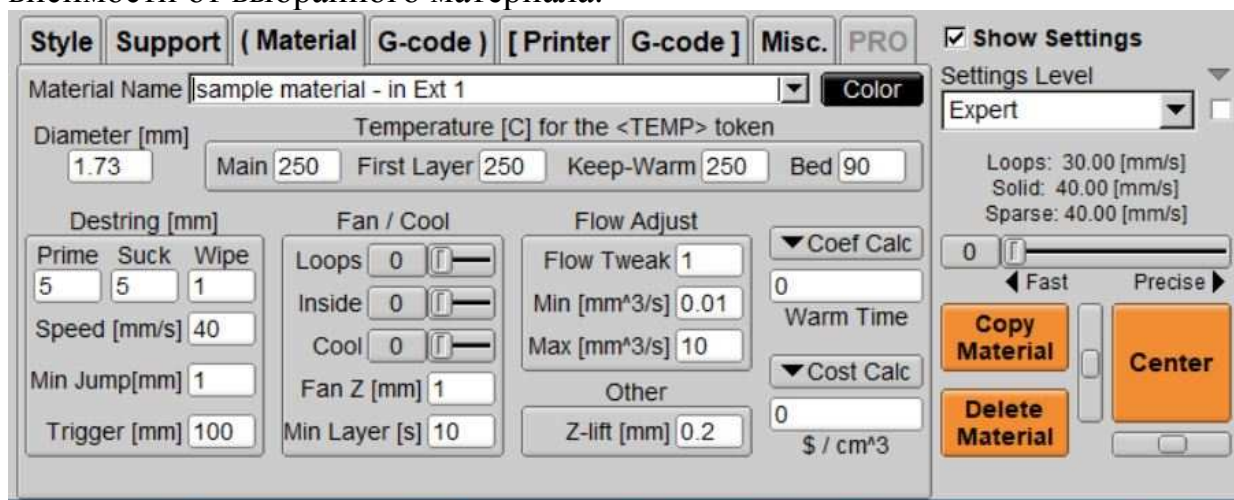


Рис. 7.12. Вкладка *Material*

Diameter (mm) задает диаметр нити и является одним из самых важных значений, так как все процессы печати опираются на эти данные. Для определения диаметра нити рекомендуется с помощью микрометра сделать несколько измерений нити в нескольких местах, чтобы вывести среднее значение диаметра.

Temperature [C] for the <TEMP> token – устанавливает температуру экструдера и стола и включает несколько режимов:

- *Main* – задает температуру печати всего изделия;
- *First layer* – задает температуру печати первого слоя и может быть несколько выше, чем в режиме *Main*, что обеспечивает лучшую адгезию со столом;
- *Keep-warm* в случае использования нескольких экструдеров позволяет понижать температуру незадействованного экструдера, что позволяет уменьшить количество «соплей». Важно помнить, что слишком низкая температура потребует больше времени на прогрев экструдера перед началом работы;
- *Bed* – этот режим позволяет задавать необходимую температуру стола с подогревом для лучшей адгезии.

Для задания цвета визуализации пути используется параметр **Color button**.

Destring (Ретракт) – параметр, который помогает избавиться от «соплей» во время смены области печати и имеет несколько режимов:

- *Suck* задает количество мм, на которое будет протянут пруток обратно. Это поможет исключить вытекание расплавленного пластика из сопла и избавиться от «соплей» при смене режима печати;
- *Prime* используется только в начале нового региона и отвечает за подачу оттянутого из сопла пластика точно к месту печати. Как правило, данный режим устанавливается на отметке равной или чуть меньшей, чем у режима *Suck*;
- *Wipe* позволяет несколько улучшить качество печати. Суть данного режима в том, что сопло медленно движется по только что пройденному пути в обратном направлении и, тем самым, как бы размазывает остатки.

Speed (V_p/V_s) – задает скорость ретракта.

Min jump (mm) – указывает наименьшее расстояние между областями печати.

Trigger (мм) – задает максимальное расстояние, которое может быть пройдено после *Wipe*, при условии, что этот режим включен.

Практически каждый 3D-принтер оснащен системой вентиляции, чтобы охлаждать сопло, и программа *KISSlicer PRO* позволяет управлять этой системой с помощью параметра **Fan/cool (Вентилятор/охлаждение)**. Этот параметр имеет следующие настройки:

- *Loops* (0..100%) устанавливает скорость работы вентилятора во время печати всего объекта кроме внутреннего заполнения;
- *Inside* (0..100%) устанавливает скорость работы вентилятора при печати заполнения;
- *Cool* (0..100%) устанавливается во время замедления печати и позволяет выполнить условие *Min Layer setting*. В данном случае сохраняется минимальная скорость вентилятора;

- *Fan Z(mm)* включает вентилятор после достижения заданной высоты.
- *Min layer (s)* – данный параметр позволяет задать наименьшее время прохождения одного слоя. В случае уменьшения времени печати программа автоматически снизит скорость движения, чтобы выполнить данное условие.

Flow/adjust состоит из нескольких режимов:

- *Flow/Tweak* задает силу потока и позволяет компенсировать перелив или недолив.
- *Min (mm³/s)* задает минимальный объем для хорошего экструдирования;
- *Max (mm³/s)* задает максимальный объем для хорошего экструдирования.

Параметр **Other** позволяет задать величину с помощью параметра **Z-lift (mm)**, на которую будет подниматься экструдер при окончании печати участка прежде, чем перейти к следующему участку печати.

Параметр **Coef calc** необходим для правильного расчета программой времени печати. Для этого указывается ускорение и время прогрева экструдера.

Параметр **Cost calc** может рассчитать ориентировочную стоимость будущего изделия. Для калибровки этого параметра надо распечатать одну деталь и взвесить ее, затем ввести полученные данные.

Вкладка Printer/Hardware

Вкладка *Printer/Hardware* (рис. 7.13) настраивает аппаратное обеспечение принтера.

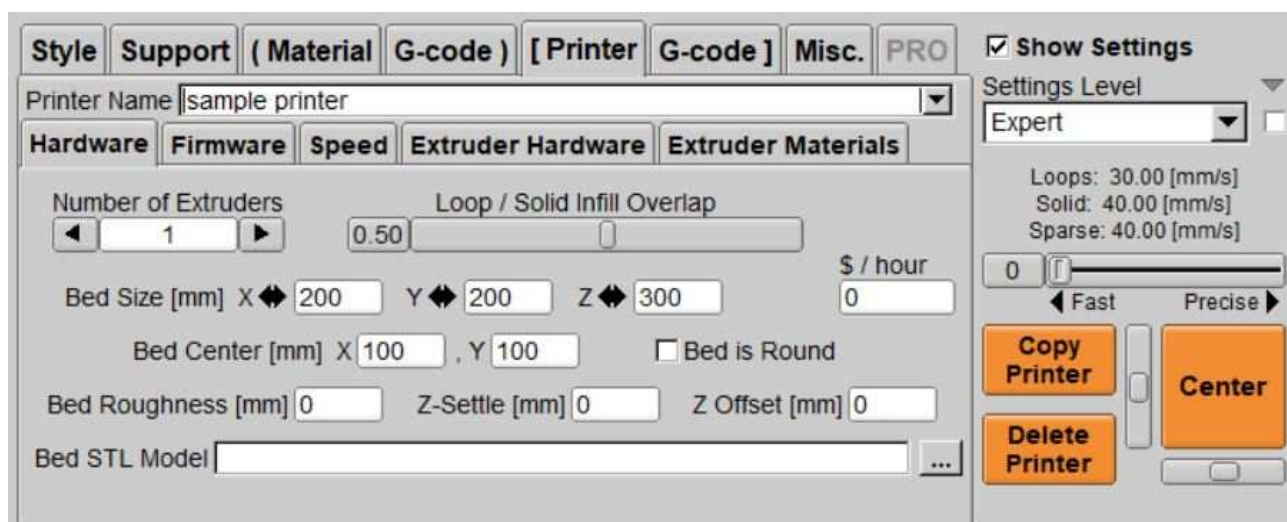


Рис. 7.13. Вкладка *Printer/Hardware*

Number of extruders – количество экструдеров на принтере.

Loop/solid infill Overlap – устанавливает перекрытие между периметром и заполнением. Если указать минимальное значение, это будет означать, что поверхности практически несоприкасающиеся. Это позволит создать более красивое изделие, но и более хрупкое. Если задать максималь-

ное значение, сцепление будет очень прочное, но внешний вид изделия может быть испорчен.

Bed size – габаритные размеры стола принтера.

\$/Hour – стоимость одного часа.

Bed center – координаты центра стола.

Bed is round – при использовании дельта-принтера, рекомендуется установить галочку на этом параметре.

Bed roughness (неровности кровати) – параметр для компенсации неровностей стола, при котором первый слой печатается более толстым.

Z-Settle (мм) – параметр для компенсации неточного движения по оси Z.

Z-offset – параметр для изменения толщины первого слоя. Чтобы слой был более тонким, задайте отрицательное значение.

Bed STL model – *stl*-модель стола принтера. Наличие модели позволит упростить визуальное восприятие.

Вкладка Printer/Firmware

На вкладке *Printer/Firmware* (рис. 7.14) задаются тип микропрограммы, тип расширения файла, версия прошивки принтера и функции управления кулерами.

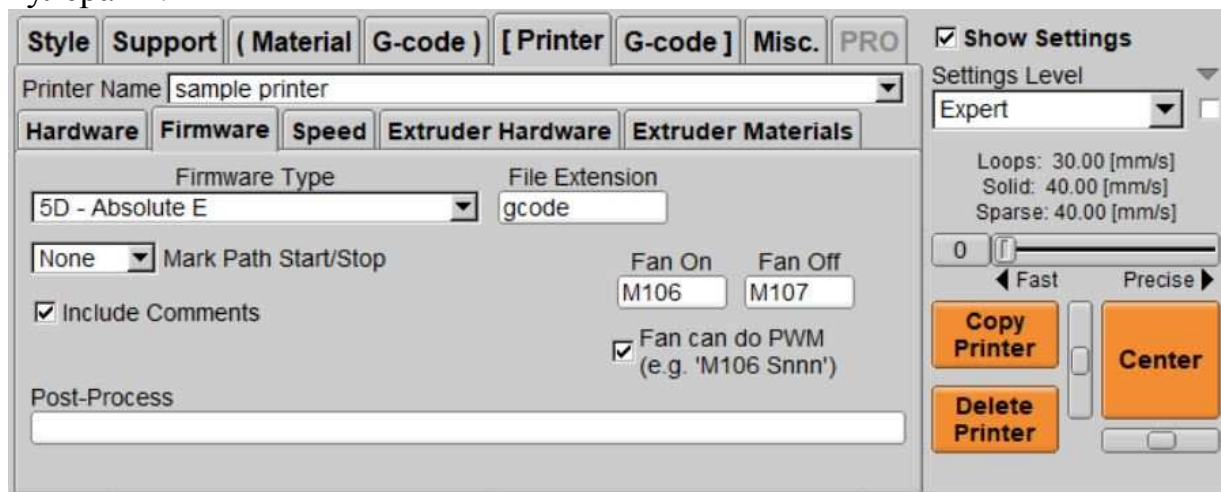


Рис. 7.14. Вкладка *Printer/Firmware*

Firmware type – тип микропрограммы, обычно задается «5D – Absolute E».

File extension – расширение файла, обычно задается «gcode».

Mark Path Start/Stop – версия прошивки принтера, обычно задается «NONE».

Include comments (Включить комментарии) – все заданные параметры, используемые при нарезке модели, будут размещены на вершине *GCode*.

Fan ON/OFF – управление кулерами, обычно задается M106/M107.

Если принтер не может определять и контролировать скорость работы кулера, тогда надо убрать галочку параметра *Fan can do PWM*.

Post-Process – эту строку надо оставить пустой.

Printer Speed

На вкладке *Printer/Speed* (рис. 7.15) задаются значения скоростей печати.

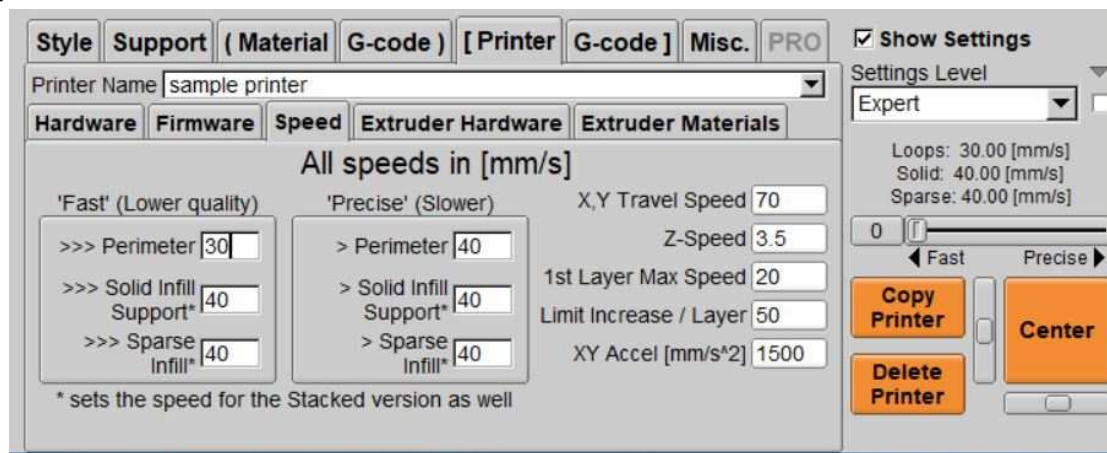


Рис. 7.15. Вкладка *Printer/Speed*

Fast (lower quality) – этот параметр задает максимальную скорость печати. Рекомендуется для печати периметра лучше установить более медленную печать, чем для заполнения. Параметр *Solid infill* рекомендуется установить меньше, чем *Infill*.

Precise (Slower) – для печати соплом диаметром не менее 0,3 мм эти скорости устанавливаются не ниже 10-15 мм в секунду.

X, Y travel speed – максимальная скорость перемещения экструдера по осям X и Y для непечатных ходов.

Z-Speed – максимальная скорость перемещения экструдера по оси Z.

1st layer max speed – максимальная скорость печати первого слоя, для лучшей адгезии к поверхности стола рекомендуется задать более низкую скорость.

Limit increase/Layer – этот параметр задает максимальное увеличение допустимой скорости во время печати второго слоя.

XY Accel – параметр ускорения и используется программой только при вычислении общего времени печати.

Вкладка *Printer/Extruder Hardware*

На вкладке *Printer/Extruder Hardware* (рис. 7.16) задаются значения коэффициентов подачи для каждого экструдера. Для этого пропускают заранее известной длины нить через определенный экструдер и затем вводят значение. Например: если вы подали 100 мм, а после прохождения получили 105 мм, то *GAIN* для данного экструдера должен быть 0,952 ($100/105 = 0,952$).

Также можно указать другой адрес экструдера, используя для этого выпадающий список.

Если принтер оснащен несколькими экструдерами, то можно отрегулировать их смещение относительно друг друга.

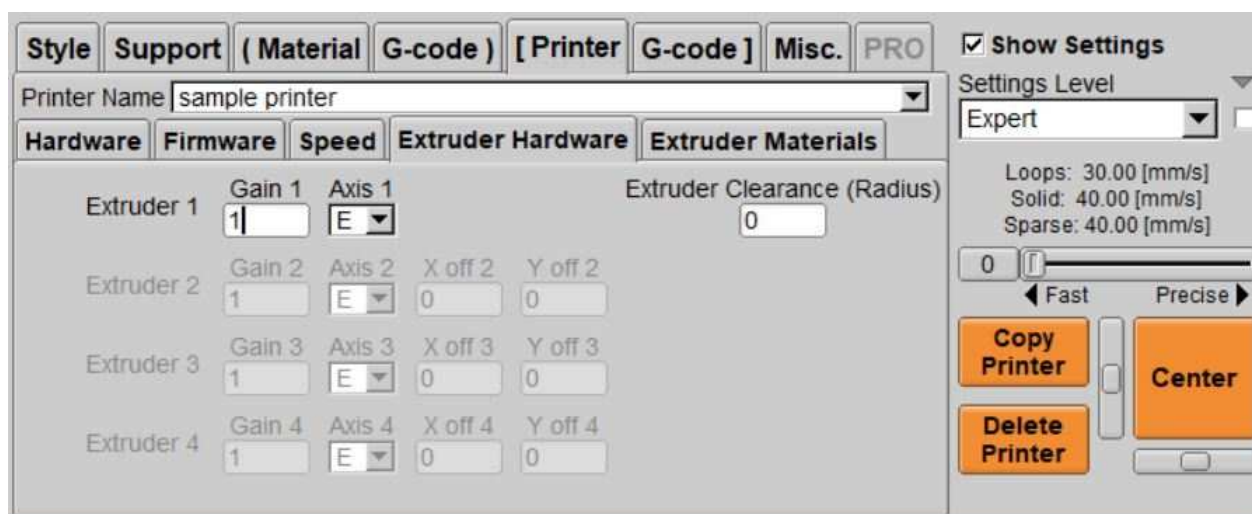


Рис. 7.16. Вкладка *Printer/Extruder Hardware*

Вкладка *Printer/Extruder materials*

На вкладке *Printer/Extruder materials* (рис. 7.17) задаются значения используемых материалов для каждого экструдера отдельно.

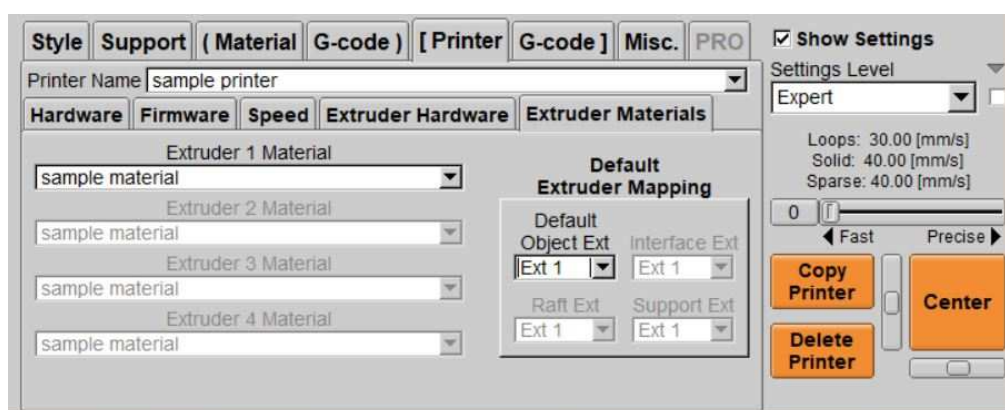


Рис. 7.17. Вкладка *Printer/Extruder materials*

Default object Ext – этот параметр задается номер экструдера для печати элементов модели: верхних и нижних граней, заполнения и периметра.

Support Ext – задает номер экструдера для печати поддержек.

Interface Ext – задает номер экструдера для печати части опоры вблизи объекта.

Raft Ext – задает номер экструдера для печати подложки.

Вкладка *G-code*

На вкладке *G-code* (рис. 7.18) есть несколько вкладок: *Prefix*, *Select Extruder*, *Deselect Extruder*, *N [*] Layers* и *Postfix*. Особый интерес представляют вкладки *Prefix* и *Postfix*, в которых задается стартовый и финальный

код. Эти коды задают значения, которые предназначены для подготовки принтера к процессу перед началом печати, а также действия, которые выполняет принтер после окончания печати. Три оставшиеся вкладки *Select Extruder*, *Deselect Extruder* и *N [*] Layers* используются, для принтеров, у которых число экструдеров больше одного.

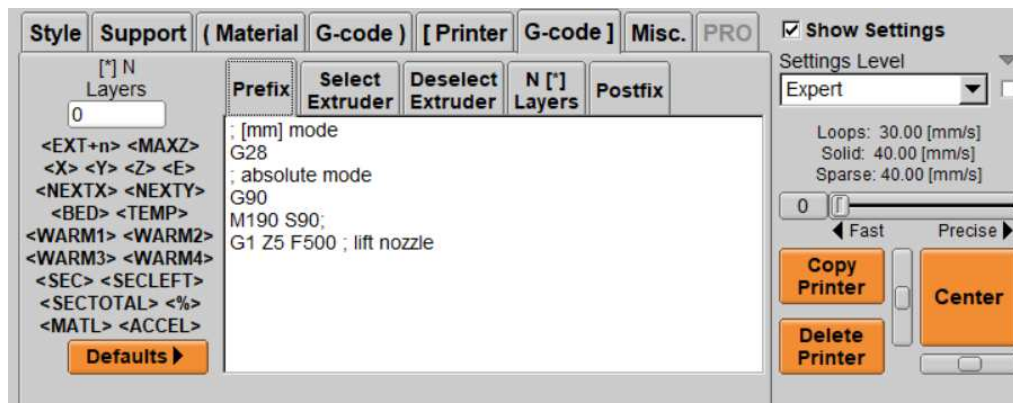


Рис. 7.18. Вкладка *G-code/Prefix*

Вкладка *Prefix*

На вкладке *Prefix* прописывается код, исполняемый в начале печати (см. рис. 7.18). Здесь обычно задается парковка печатающей головки в начальное положение и прогрев экструдера.

Программный код на этой вкладке может содержать следующие переменные:

G28 – домашняя позиция всех осей.

G90- установка абсолютных координат.

M190 S90 – автоматический нагрев платформы до 90 град для АБС пластика. Для *PLA* материала необходимо задать 55-60 град.

G1 Z5 F500 – поднятие экструдера перед началом печати.

M190 S<BED> ; *bed* – прогрев стола до температуры <BED>, указанной в профиле материала.

M109 S<TEMP> ; *hotend* – прогрев хотэнда до температуры <TEMP>, указанной в профиле материала.

G21; *metric values* – использование метрической системы

G90; *absolute positioning* – абсолютное позиционирование печатающей головки (установка абсолютных координат).

M82; *set extruder to absolute mode* – абсолютный отсчет подачи экструдера.

M107; *start with the fan off* – вентилятор обдува детали выключен.

G28 X0 Y0; *move X/Y to min endstops* – парковка (домашняя позиция) по осям XY.

G28 Z0; *move Z to min endstops* – парковка (домашняя позиция) по оси Z.

Вкладка *Postfix*

На вкладке *Postfix* прописывается код, исполняемый в конце печати (рис. 7.19). Здесь обычно задается выключение нагревателей, небольшое втягивание филамента обратно в сопло, чтобы из него не вытекал расплав и отвод печатающей головки от напечатанной детали.

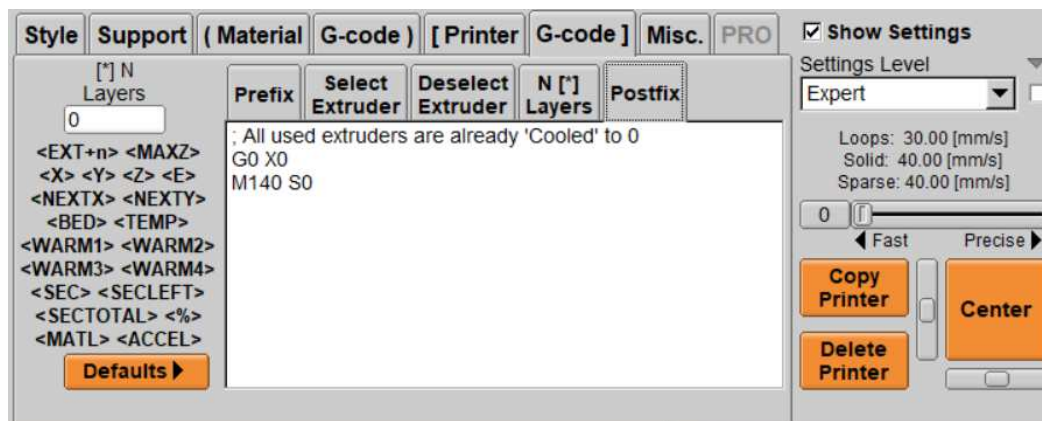


Рис. 7.19. Вкладка *G-code/Postfix*

Программный код на этой вкладке может содержать следующие переменные:

M104 S0 ;extruder heater off – отключение нагрева экструдера.

M140 S0 ; heated bed heater off (if you have it) – отключение нагрева стола.

M107 ; fan off – отключение вентилятора обдува детали.

G91 ; relative positioning – переключение в относительные координаты.

G1 E-1 F300 ; retract the filament a bit before lifting the nozzle, to release some of the pressure – небольшое втягивание (ретракт) филамента перед поднятием сопла.

G1 Z+0.5 E-5 X-20 Y-20 F300 ; move Z up a bit and retract filament even more – поднятие печатающей головки по оси Z и ретракт филамента.

G28 X0 Y0 ; move X/Y to min endstops, so the head is out of the way – парковка по XY в домашнюю позицию.

M84 ; steppers off – отключение двигателей.

G90 ; absolute positioning – переключение в абсолютные координаты.

Вкладки *Select Extruder* (рис. 7.20) и *Deselect Extruder* (рис. 7.21)

Программный код на этих вкладках может содержать следующие переменные:

Select New Ext & Warm – выполняется при выборе экструдера перед началом печати.

Warm Same Ext – при выборе экструдера, находящегося в режиме подогрева (*Warm*).

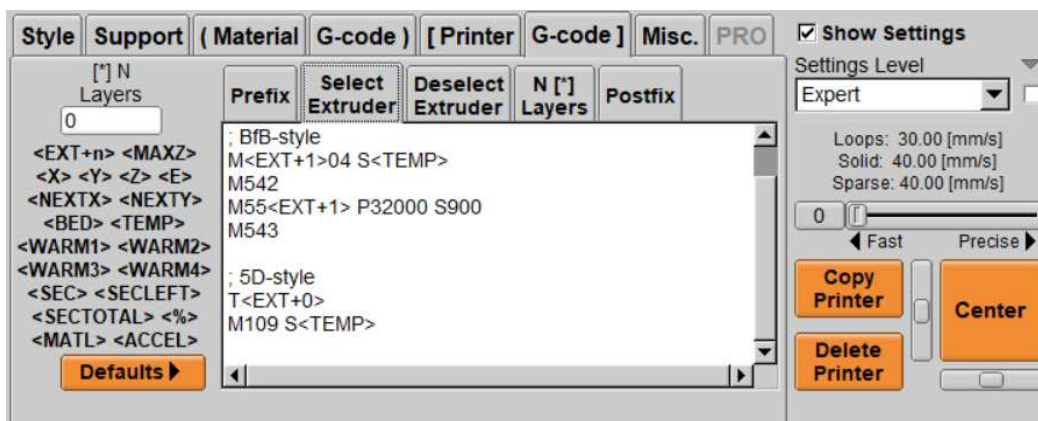


Рис. 7.20. Вкладка G-code/Select Extruder

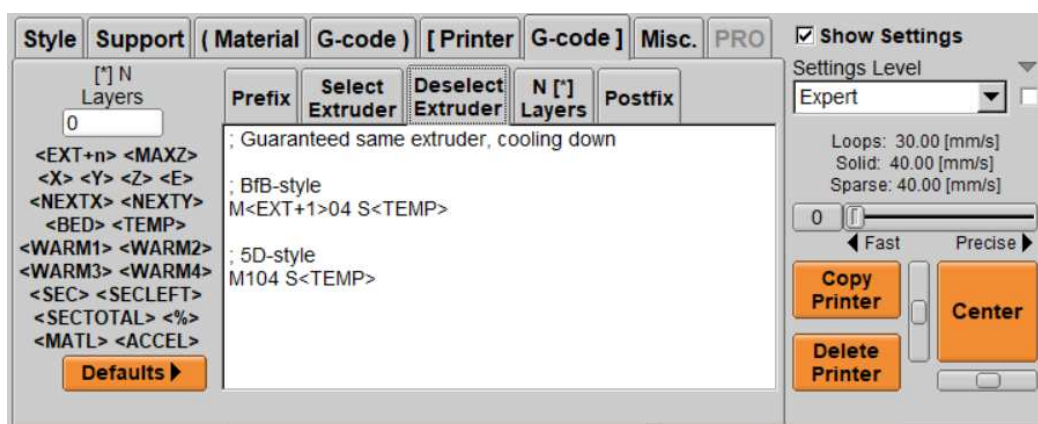


Рис. 7.21. Вкладка G-code/Deselect Extruder

Cool Same Ext – при временной деактивации экструдера. При одноэкструдерной конфигурации выполняется перед *Postfix*.

Cool & Retire Old Ext – при деактивации экструдера (он больше не понадобится при печати). Например, когда печать поддержек другим материалом закончена, и дальше будет работать только основной экструдер. При одноэкструдерной конфигурации выполняется перед *Postfix*.

Вкладка N [*] Layers

N [*] Layers – код (рис. 7.22), выполняемый каждые N слоев (число указывается слева вверх в отдельном поле).

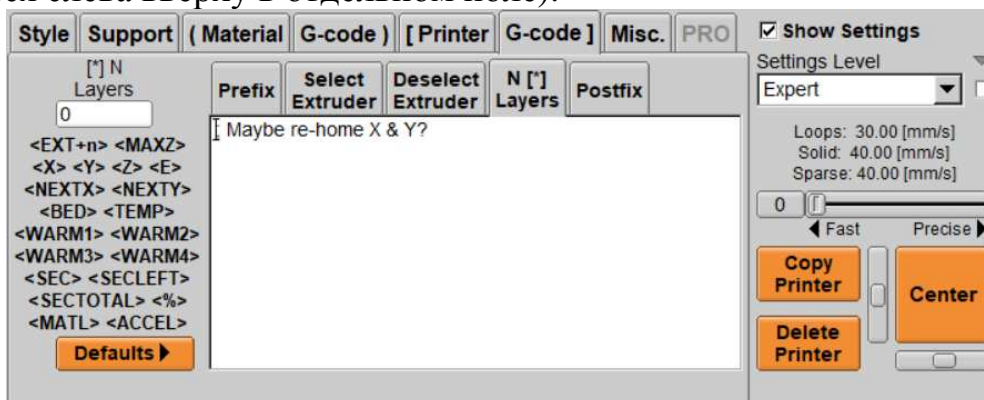


Рис. 7.22. Вкладка G-code/N [*] Layers

Для вставки значений переменных в код используются подстановки, приведенные в угловых скобках ниже.

<TEMP> – целевая температура экструдера для выбранного материала.

<BED> – целевая температура стола для выбранного материала.

<WARM1>...<WARM4> – температуры режима подогрева для каждого экструдера.

<ACCEL> – ускорение, указанное в профиле принтера. Например, его можно использовать в G-коде для команды M201, которая переназначает указанное в прошивке ускорение.

<MATL> – подставляет G-код, прописанный во вкладке *Material G-code* (связанный с профилем материала).

<X><Y><Z><E> – текущие значения координат.

<NEXTX><NEXTY> – следующие значения координат X и Y.

<TELAPSED><TREMAIN><TTOTAL> – текущее время печати, прогноз оставшегося времени, прогноз полного времени печати. Можно, к примеру, использовать для вывода на дисплей (M117).

<%> – прогресс печати, в процентах.

8. Технология трехмерного сканирования

Технология трехмерного сканирования (3D сканирование) является одной из составляющих трехмерных технологий, которая позволяет получить цифровую модель реального объекта в короткие сроки с заданным качеством. 3D сканирование объектов – это процесс преобразования физической формы реального объекта в цифровой вид (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Слева на право: исходная модель, процесс оцифровки, цифровая модель

У получаемой цифровой модели сохраняется форма, текстура и цвет исходного образца.

3D сканирование сложных объектов позволяет быстро получать цифровые модели и помогает подготавливать их к 3D печати.

Основным устройством в процессе 3D сканирования является 3D сканер – устройство, считывающее физические параметры объектов и создающее на их основе 3D модель.

3D сканирование объектов может оказаться полезным при проектировании любых сложных элементов, 3D моделирование которых вручную очень трудоемко. В частности, 3D сканирование целесообразно применять при моделировании различных приспособлений, комплектующих, основных и запасных частей механизмов. Часто оно используется в случае отсутствия чертежей и прочей технической документации на изделие, а также при необходимости конверсии в цифровой вид фигурных поверхностей, включая художественные формы и слепки.

История появления 3D сканеров

Технология трехмерного сканирования появилась во второй половине 20-го века. Первый работающий 3D сканер появился в 60-х годах. В середине 80-х годов сканирующие устройства усовершенствовали. Их начали дополнять лазерами, источниками белого света и затемнения для повышения точности получаемых виртуальных моделей. В этот период появляются контактные датчики. С их помощью оцифровывалась поверхность твердых предметов, которые не отличались сложной формой. Для усовершенствования оборудования, разработчики использовали передовые оптические технологии из различных направлений промышленности.

3D сканеры начали применяться конструкторами дизайн-студий и автомобильных концернов, работниками киноиндустрии. В 80-х – 2000-х годах разные компании выпускали свои модели 3D сканеров: *Head Scanner*, *REPLICA* и другие. С тех времен сканеры изменились, усовершенствовались, стали более мобильными и функциональными. Характеристики современных 3D сканеров существенно отличаются от их предшественников.

Принцип работы 3D сканера

Существует два метода 3D сканирования: контактный и бесконтактный. Для контактного метода необходим непосредственный контакт 3D сканера с объектом. Контактный 3D сканер (рис. 8.2) отличается очень высокой точностью работы. Основными недостатками контактного метода являются возможность повреждения или изменения формы сканируемого объекта и трудность в сканировании объектов со сложным профилем.

Бесконтактный метод разделяется на два типа:

- Активные 3D сканеры, которые излучают на объект пучок направленных волн и фиксируют их отражение. К возможным типам излучения относятся рентгеновские лучи, ультразвук и свет;

- Пассивные 3D сканеры, которые фиксируют отраженное от объекта окружающее излучение, чаще всего свет.

Принцип работы 3D сканера определяется технологией сканирования. Различают оптическую и лазерную технологии сканирования.

При оптическом сканировании применяется специальный лазер второго класса безопасности.



Рис. 8.2. Контактный 3D сканер

При оптическом сканировании процесс получения данных 3D сканером напоминает формирование объемного изображения в мозге человека. 3D сканер имеет две камеры, с помощью которых формируется два изображения, смещенных друг относительно друга с разных ракурсов (рис. 8.3, 8.4). Полученные изображения обрабатываются, и производится построение виртуальной модели с помощью специальных программ в автоматическом режиме. Необходимая точность построения 3D модели достигается за счет применения дополнительных технологических приемов, например периодической вспышки светом или подсветки лазером.

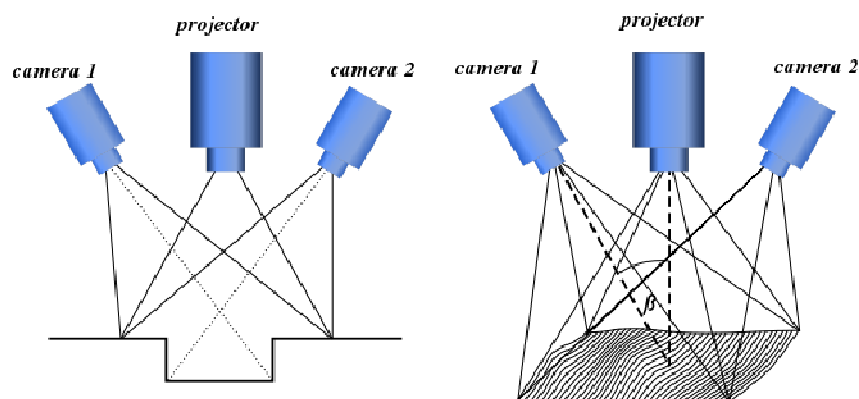


Рис. 8.3. Схема оптического 3D сканирования

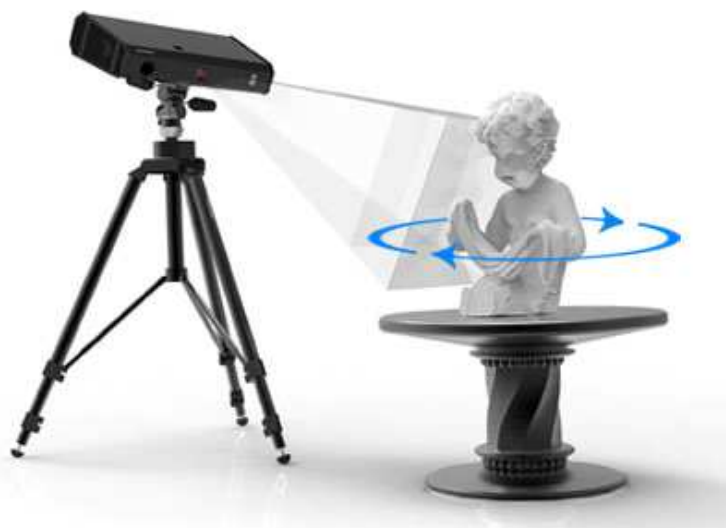


Рис. 8.4. Оптическое 3D сканирование

Оптический 3D сканер отличается большой скоростью сканирования. Такие сканеры используются для сканирования подвижных объектов. При их использовании нет необходимости в нанесении отражающих меток. Такие устройства хорошо подходят для сканирования объектов с матовой поверхностью, но не подходят для исследования зеркальных, прозрачных или блестящих объектов. Оптические 3D сканеры используют для сканирования человека.

При лазерном сканировании устройство 3D сканера основано на работе лазерного луча, с помощью которого измеряются расстояния в заданных точках (рис. 8.5). На основе этих сведений выводятся координаты сканируемой поверхности, и происходит построение виртуальной модели.

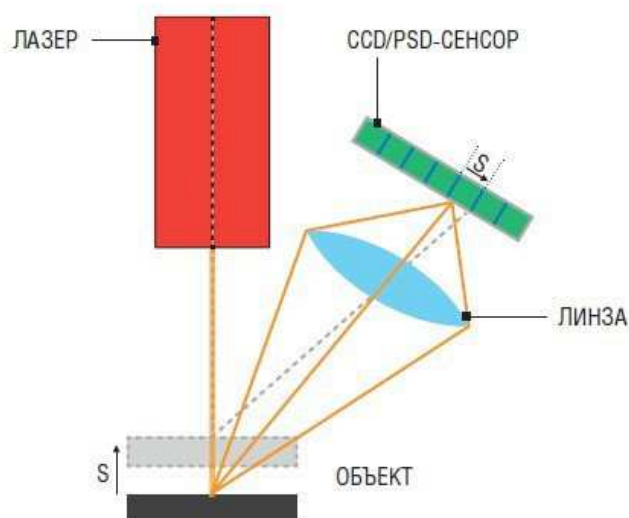


Рис. 8.5. Схема лазерного 3D сканирования

Работа лазерных 3D сканеров основывается на принципе работы лазерных дальномеров. Лазерные 3D сканеры характеризуются точностью получаемой трехмерной модели. Их применение затруднительно в условиях подвижности объекта. Сканирование человека 3D сканером лазерного типа практически невозможно.

Современные 3D сканеры

Устройства могут отличаться по многим параметрам: сфере использования, габаритам, форме, технологии. Современные сканеры применяются и в промышленной, и в бытовой сфере (рис. 8.6, 8.7). Промышленные 3D сканеры используются в инженерии, медицине, производстве, дизайне, киноиндустрии, в сфере создания компьютерных игр.



Рис. 8.6. 3D сканирование архитектурного сооружения



Рис. 8.7. 3D сканирование человека ручным сканером

По исполнению 3D сканеры бывают стационарные и портативные (ручные) (рис. 8.7). В портативных конструкциях в качестве сенсора ис-

пользуется координатно-чувствительный детектор или аппарат с зарядовой связью. Портативный сканер удобен тем, что его можно свободно перемещать. Это позволяет осуществлять сканирование труднодоступных мест или крупногабаритных объектов. Сканер можно проводить под любыми углами, вокруг или под исследуемыми объектами.

Производители 3D сканеров выпускают устройства, которые работают не только со стационарными компьютерами или ноутбуками, но и с планшетами (рис. 8.8) или даже смартфонами. Кроме этого существуют специальные программы, с помощью которых обычные смартфоны превращаются в 3D сканеры.



Рис. 8.8. 3D сканер, установленный на планшете

9. Лабораторная работа

«Печать виртуальных трехмерных моделей на 3D принтере»

9.1. Цель работы

Ознакомиться с методикой подготовки трехмерных виртуальных моделей к печати на 3D принтере в программе КОМПАС 3D. Научиться формировать программные коды для 3D принтера в программе-слайсере и подготавливать 3D принтер к работе.

9.2. Содержание работы

1. Ознакомиться с методикой подготовки трехмерных виртуальных моделей к печати на 3D принтере в программе КОМПАС 3D.
2. Преобразовать виртуальную модель в файл формата *STL*.
3. Произвести настройку программы-слайсера для 3D печати заданной виртуальной модели.
4. Сгенерировать в программе-слайсере программный код для 3D принтера в файл формата *GCODE*.
5. Подготовить 3D принтер к работе и распечатать заданную модель.
6. Подготовить отчет о проделанной работе.

9.3. Варианты заданий

Создать модель шлицевой втулки по чертежу, представленному на рисунке 9.1. Необходимые размеры выбрать из таблицы 9.1 в соответствии со своим вариантом.

Размеры шлицевой втулки рассчитываются по наружному диаметру шлицев вала D .

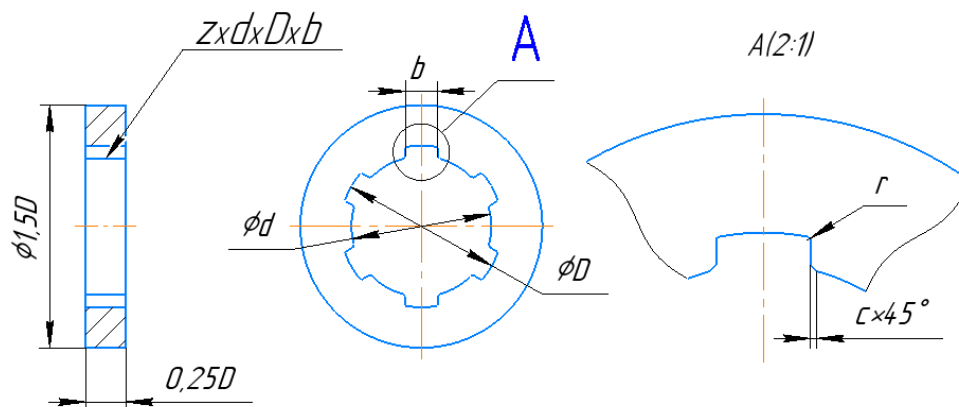


Рис. 9.1. Чертеж втулки шлицевой

Таблица 9.1. Основные размеры соединений шлицевых прямобочных по ГОСТ 1139-80, мм

№ вар.	Число зубьев, z	d	D	b	c	r
1	6	26	30	6	0,3	0,2
2	6	28	32	7	0,3	0,2
3	8	36	40	7	0,4	0,3
4	8	42	46	8	0,4	0,3
5	8	52	58	10	0,5	0,5
6	8	62	68	12	0,5	0,5
7	10	72	78	12	0,5	0,5
8	10	82	88	12	0,5	0,5
9	10	92	98	14	0,5	0,5
10	10	102	108	16	0,5	0,5
11	6	16	20	4	0,3	0,2
12	6	18	22	5	0,3	0,2
13	6	21	25	5	0,3	0,2
14	6	23	28	6	0,3	0,2
15	6	26	32	6	0,3	0,2
16	6	28	34	7	0,3	0,2
17	8	32	38	6	0,4	0,3
18	8	36	42	7	0,4	0,3
19	8	42	48	8	0,4	0,3
20	8	56	65	10	0,5	0,5
21	10	72	82	12	0,5	0,5
22	10	82	92	12	0,5	0,5
23	10	92	102	14	0,5	0,5
24	10	112	125	18	0,5	0,5

9.4. Методика выполнения работы

1. В программе КОМПАС 3D создать модель шлицевой втулки по варианту, заданному преподавателем.

1.1. Выделить горизонтальную плоскость XU и нажать кнопку «Создать эскиз» (рис. 9.2).

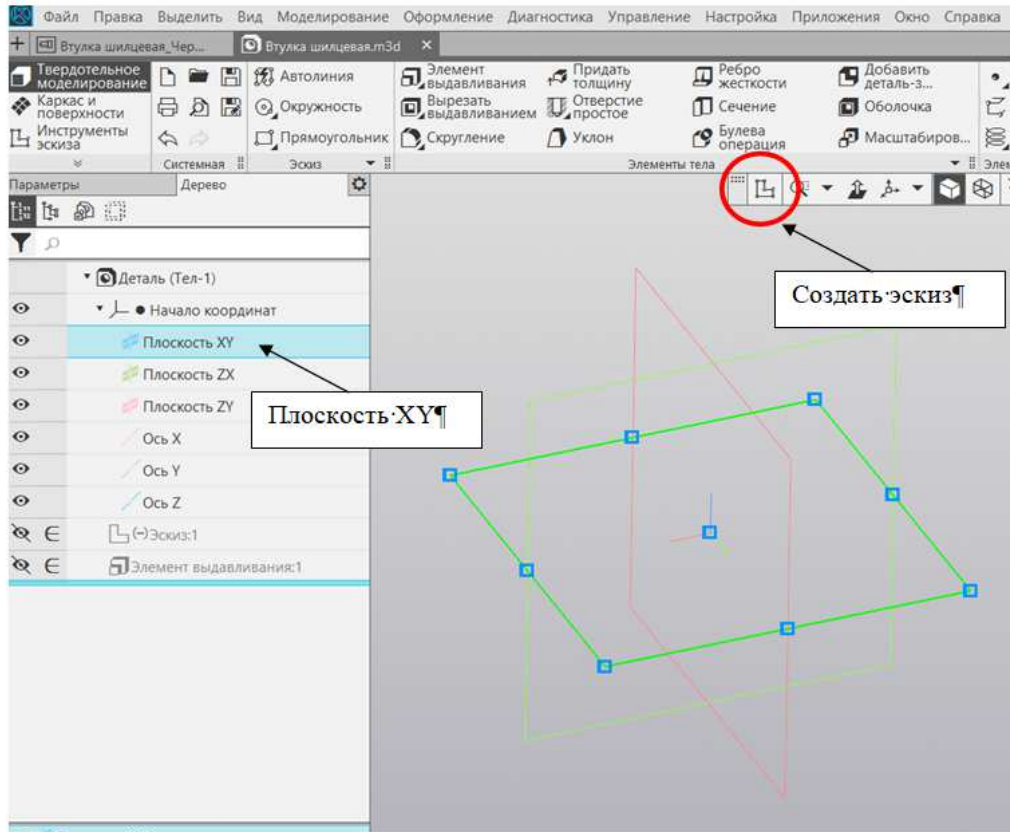
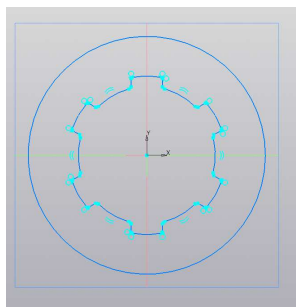
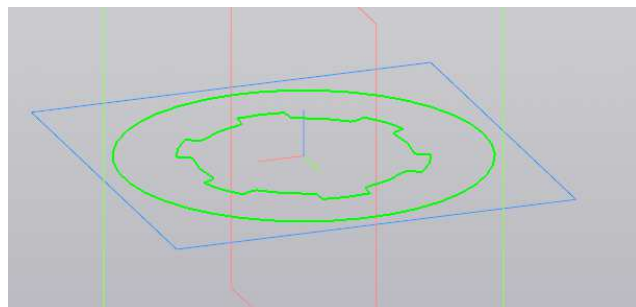


Рис. 9.2. Создание эскиза в КОМПАС 3D

1.2. По заданному варианту сформировать эскиз втулки (рис. 9.3 а). После создания эскиза повторно нажать кнопку «Создать эскиз», при этом программа вернется в режим 3D моделирования (рис. 10.3 б).



а)



б)

Рис. 10.3. Создание эскиза в КОМПАС 3D

1.3. Применить операцию «Элемент выдавливания» и создать тело (рис. 9.4).

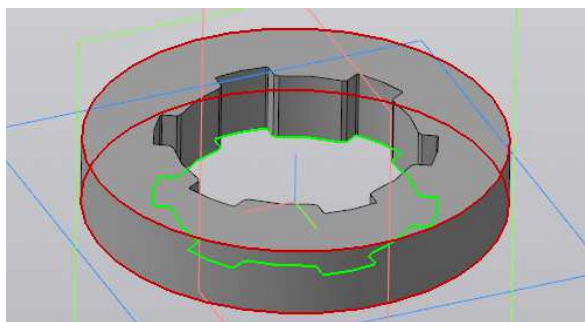


Рис. 9.4. Создание тела с помощью операции «Элемент выдавливания»

1.4. Сохранить созданную виртуальную модель в файл формата *STL* используя команду «Сохранить как». Для этого, в открывшемся диалоговом окне «Укажите имя файла для записи» (рис. 9.5), в раскрывающемся списке «Тип файла» надо выбрать «*STL(*.stl)*», затем нажать на кнопку, обозначенную черным треугольником справа от кнопки «Сохранить» и выбрать «Сохранить с параметрами» (рис. 9.6).

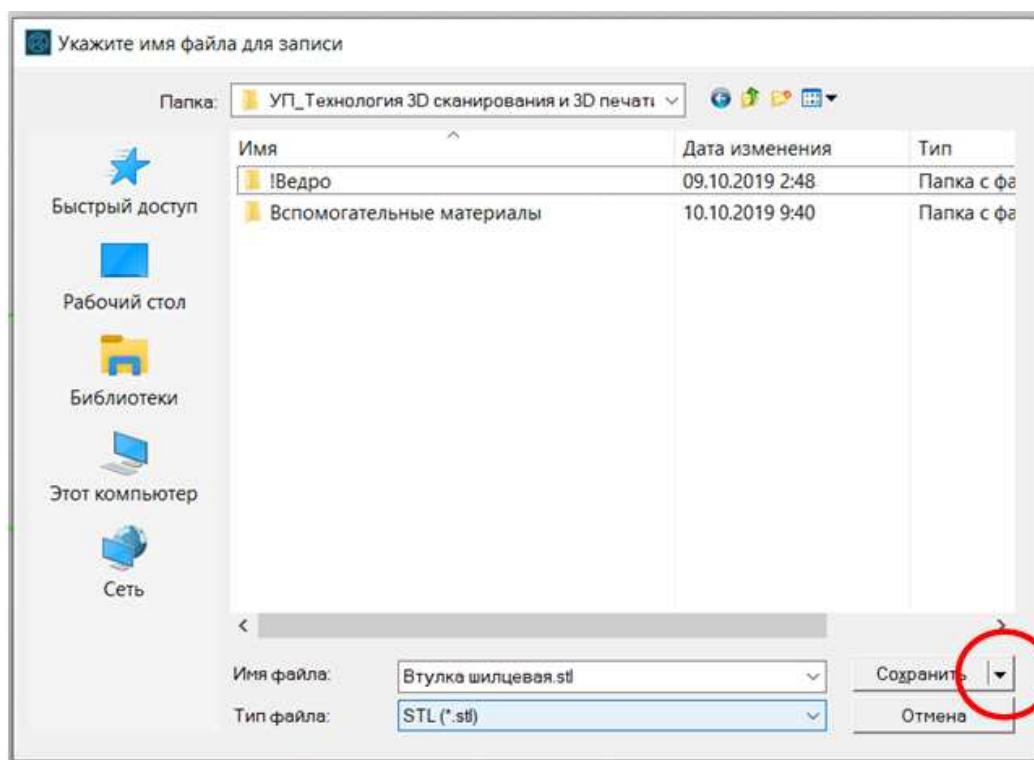


Рис. 9.5. Диалоговое окно «Укажите имя файла для записи»

В открывшемся меню «Экспорт в STL» (рис. 9.7) выставить движок на линейке «Максимальное линейное отклонение» вправо до упора, при этом в окошке справа от движка изменится значение с 0,1 на 0,001. Для сохранения модели надо нажать кнопку «Экспортировать».

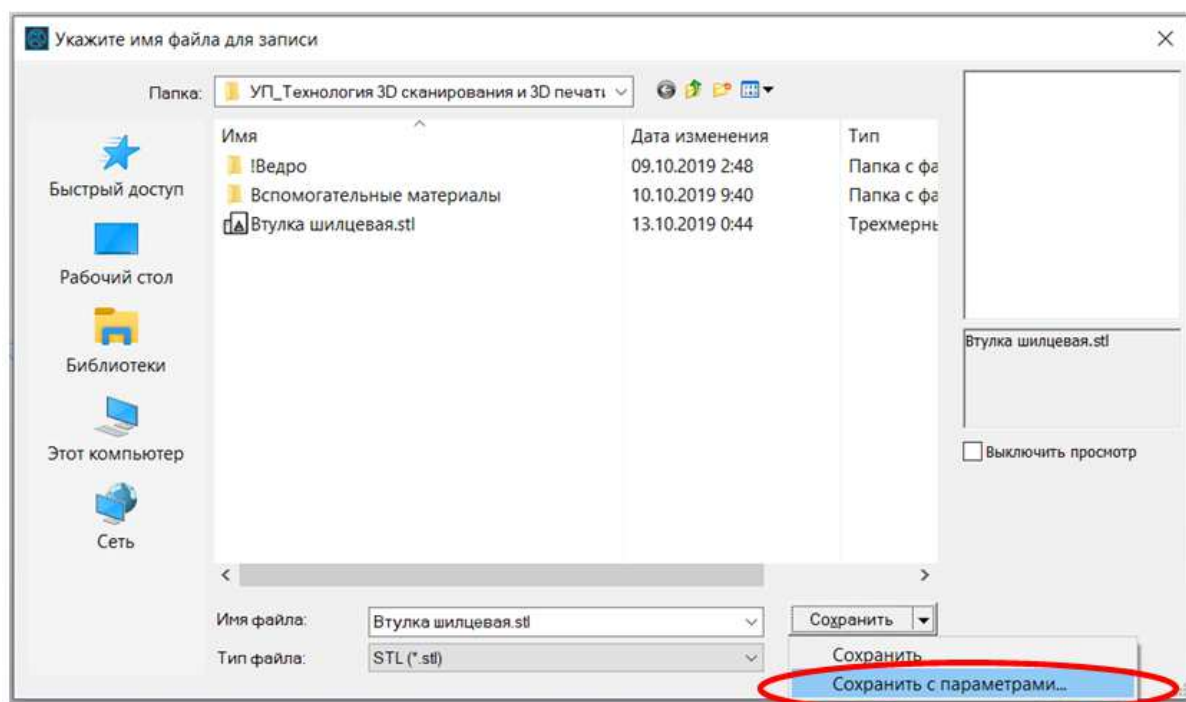


Рис. 9.6. Команда сохранения «Сохранить с параметрами»

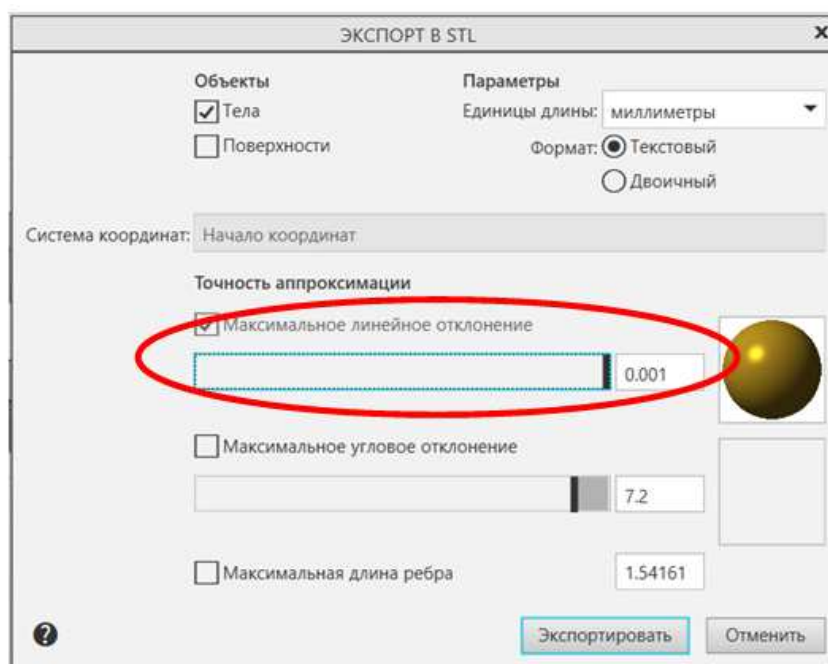


Рис. 9.7. Меню «Экспорт в STL»

На рисунке 9.8 показаны различия в экспортируемых моделях при изменении параметра «Максимальное линейное отклонение». При большем значении параметра «Максимальное линейное отклонение» (рис. 10.8 а) модель получается менее точная и на цилиндрических поверхностях хорошо видны большие полигоны, которые делают цилиндрическую поверхность ребристой. При меньшем значении параметра «Максимальное ли-

нейное отклонение» (рис. 9.8 б) модель получается более точная и на цилиндрических поверхностях ребристость поверхности не заметна.

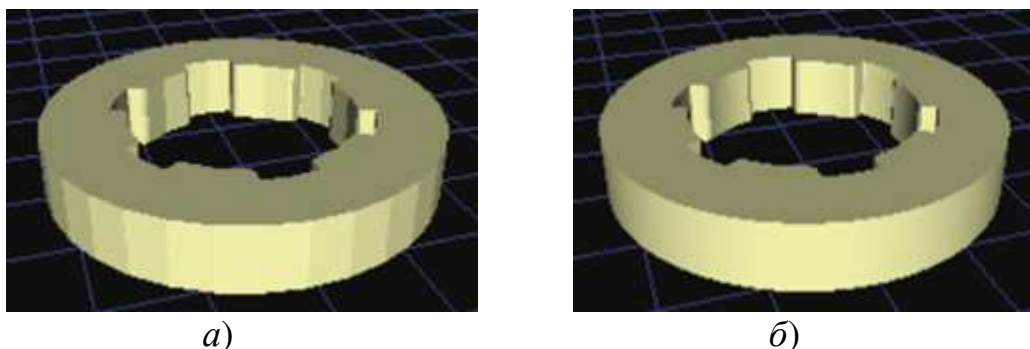


Рис. 9.8. Различия в экспортируемых моделях при изменении параметра «Максимальное линейное отклонение»

2. Произвести настройку программы-слайсера для 3D печати заданной виртуальной модели. Подробную информацию о настройке программы *KISSlicer* смотрите в разделе 7.1 настоящего пособия.

2.1. В программе-слайсере *KISSlicer* открыть созданный файл *STL*. При этом произойдет загрузка модели, и она автоматически расположится в средней части виртуального стола 3D принтера (рис. 9.9).

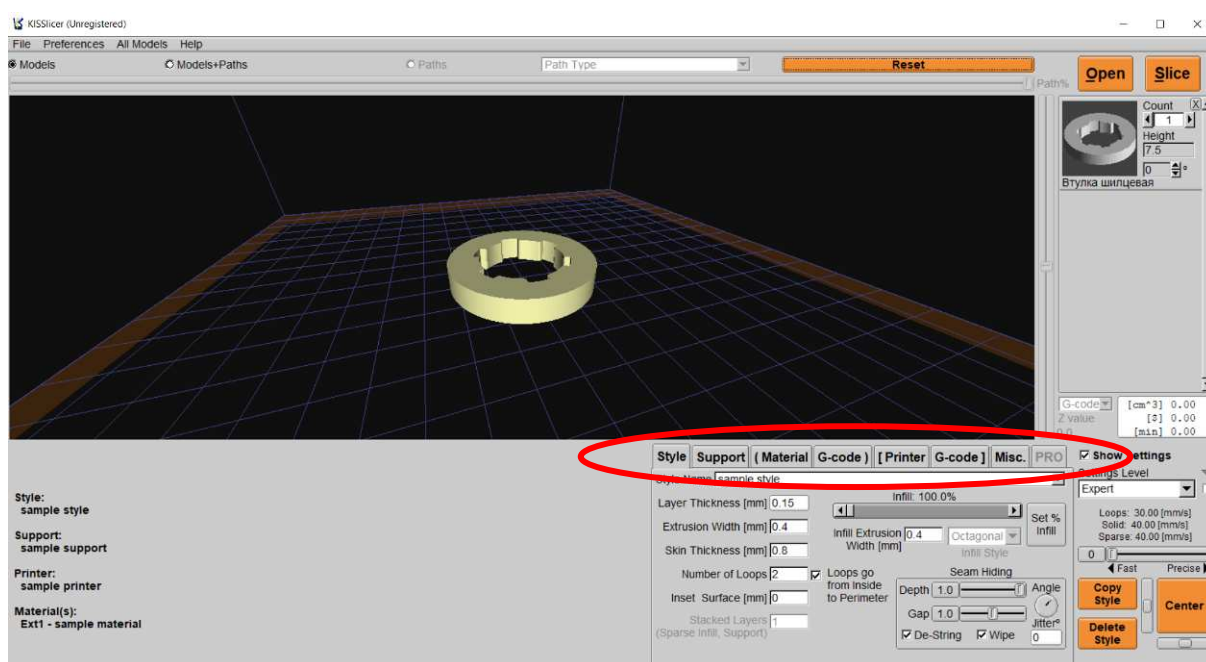


Рис. 9.9. Загрузка модели в программу-слайсер из файла *STL*

Настройка программы *KISSlicer* осуществляется на вкладках, выделенных красным на рисунке 9.9.

Если печать модели планируется пластиком *PLA* (полилактид), то выполните настройку вкладок *KISSlicer*, как указано на рисунках с 10.11 по 10.14.

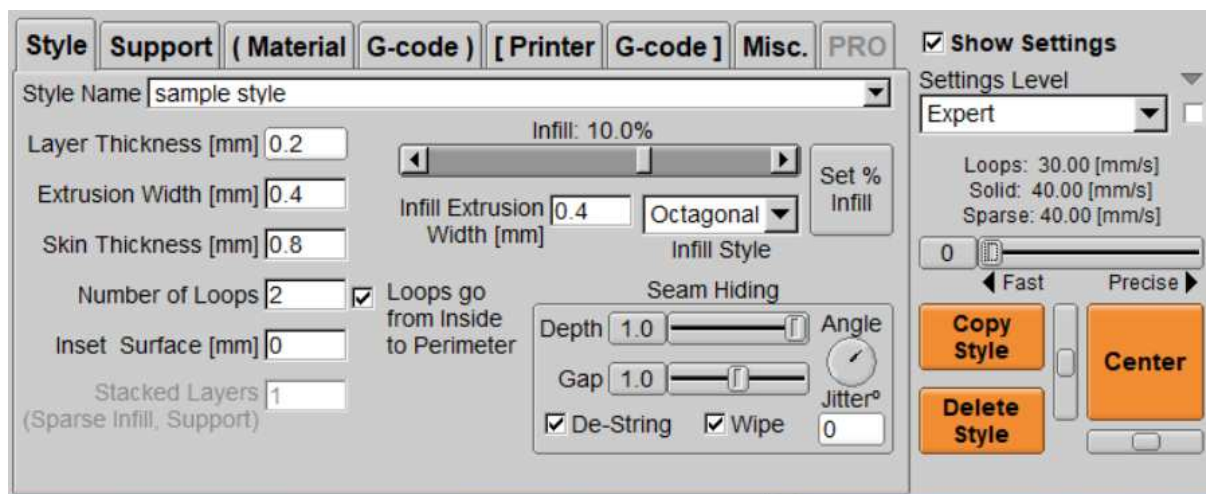


Рис. 9.10. Настройки вкладки *Style*

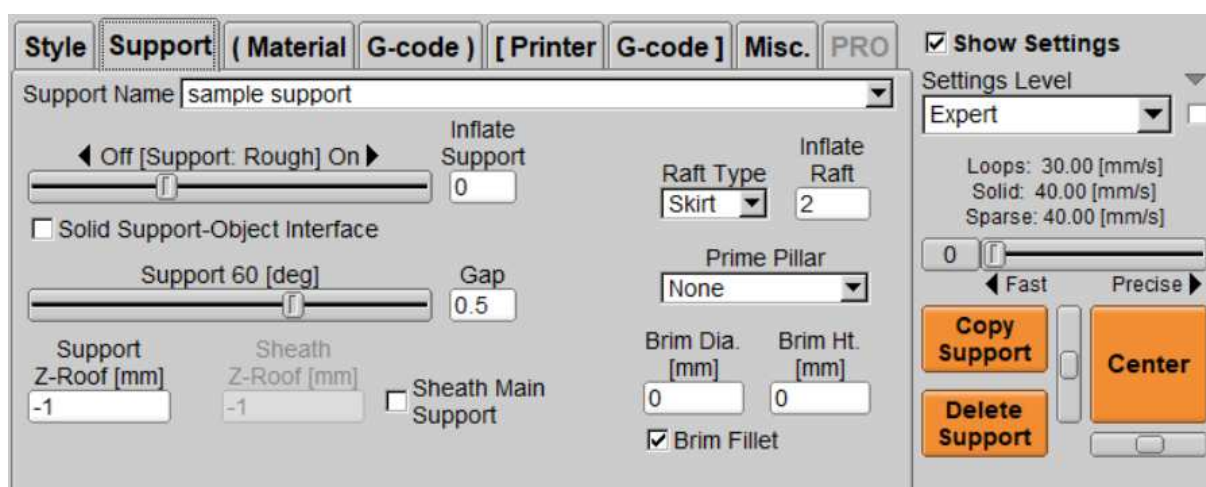


Рис. 9.11. Настройки вкладки *Support*

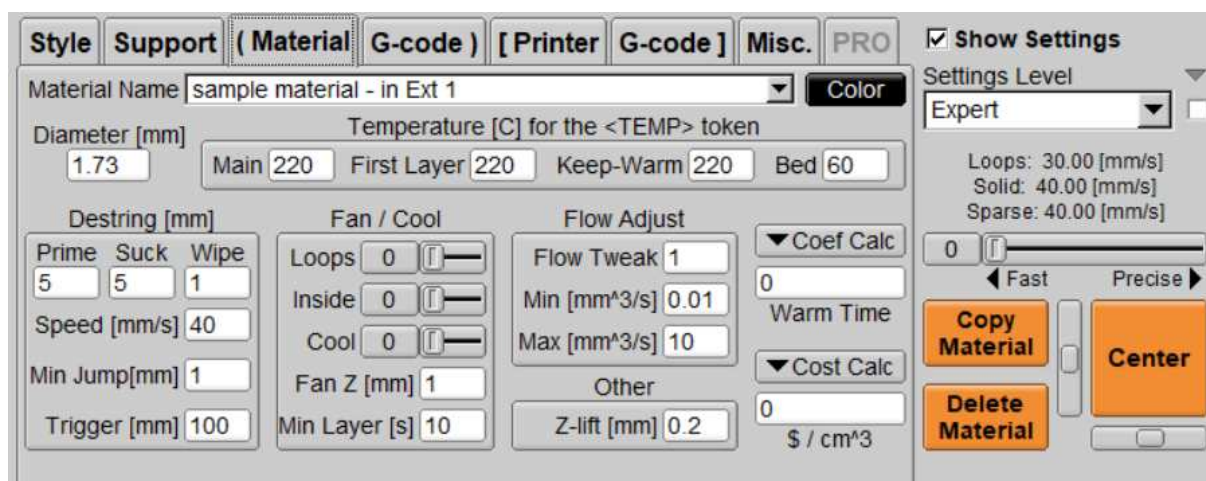


Рис. 9.12. Настройки вкладки *Material* для *PLA* пластика

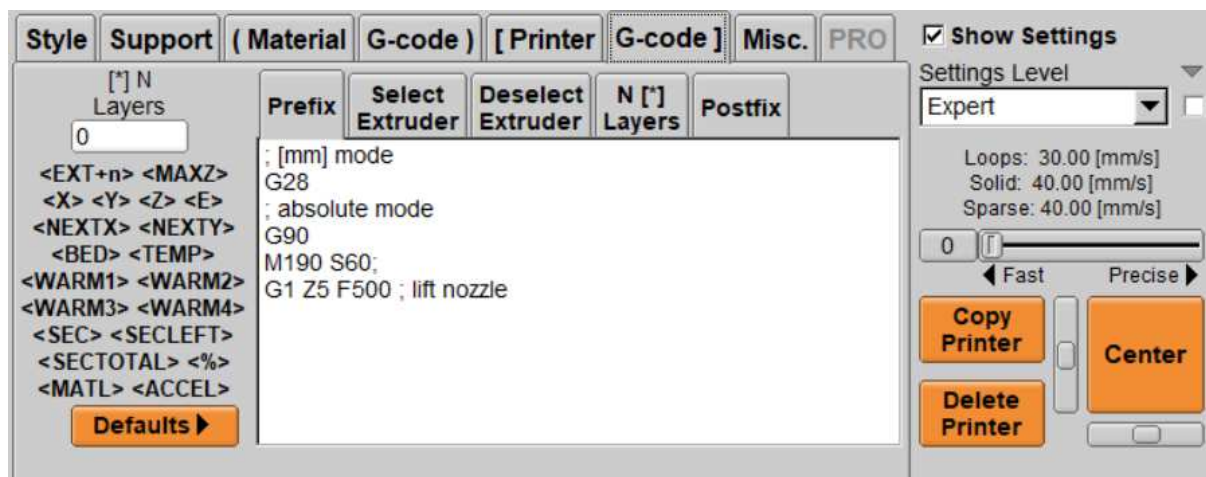


Рис. 9.13. Настройки вкладки *G-code/Prefix* для *PLA* пластика

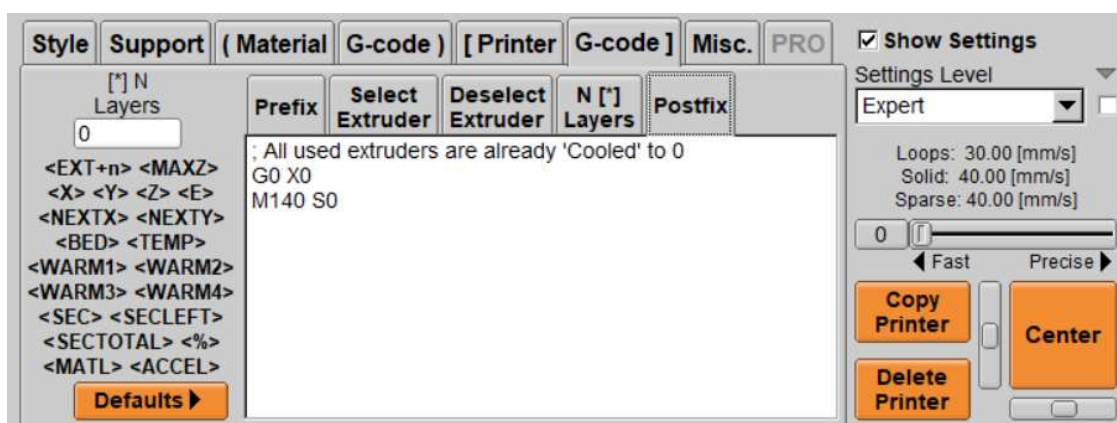


Рис. 9.14. Настройки вкладки *G-code/Postfix*

Если печать модели планируется пластиком *ABS*, то настройка вкладок *KISSlicer* производится также как для пластика *PLA*, кроме двух вкладок: *Material* и *G-code/Prefix*. Настройка температурных режимов для пластика *ABS* на вкладках: *Material* и *G-code/Prefix*, представлена на рисунках 9.15 и 9.16.

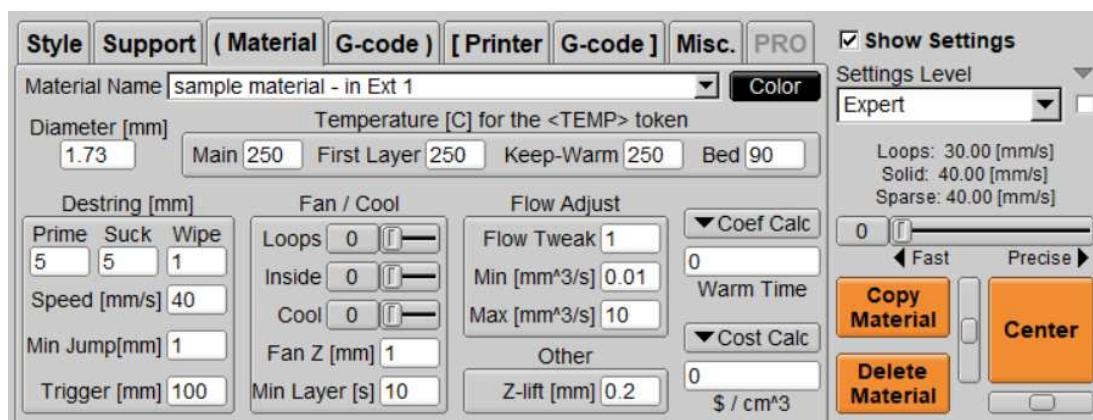


Рис. 9.15. Настройки вкладки *Material* для *ABS* пластика

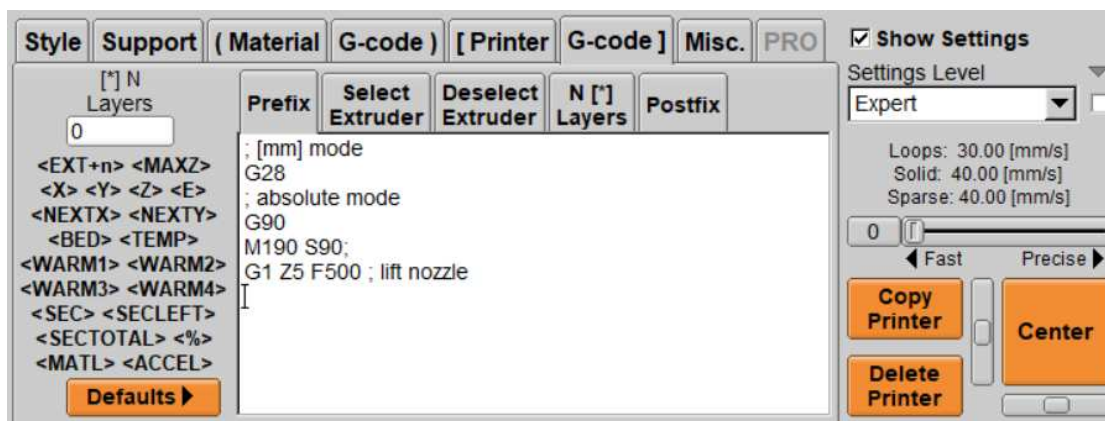


Рис. 9.16. Настройки вкладки G-code/Prefix для ABS пластика

2.2. После настройки всех вкладок надо нажать кнопку *Slice*, расположенную в правом верхнем углу программы (рис. 9.17).

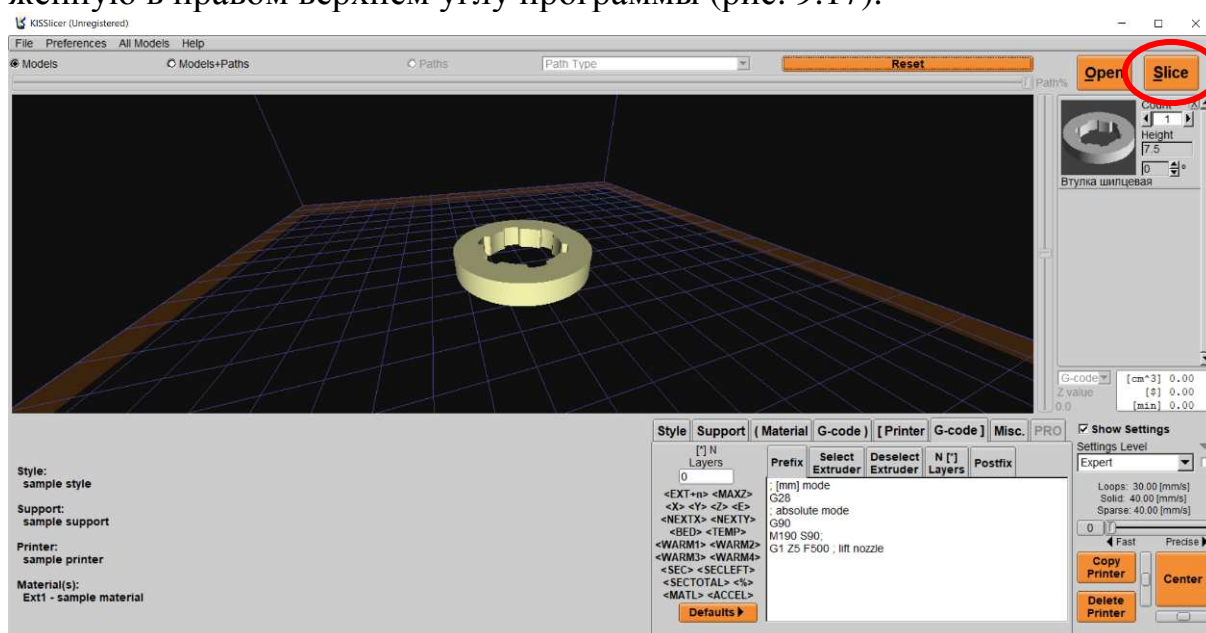


Рис. 9.17. Расположение кнопки *Slice*

После выполнения команды *Slice*, модель должна изменить свой цвет на светло-зеленый (рис. 9.18). Это означает создание кодов для принтера без ошибок. Если модель изменит свой цвет на отличный от светло-зеленого, то это означает наличие ошибок в модели или в настройках. В белом окне справа (см. рис. 9.18) отображается информация об объеме и времени печати. Чтобы отображалась стоимость печати, надо выполнить соответствующие настройки.

Переключив режим просмотра с режима *Models* на режимы *Models+Paths* (рис. 9.19) или *Paths* (рис. 9.20), с помощью ручки вертикального слайдера (рис. 9.19) можно просмотреть пути перемещения экструдера в каждом слое.

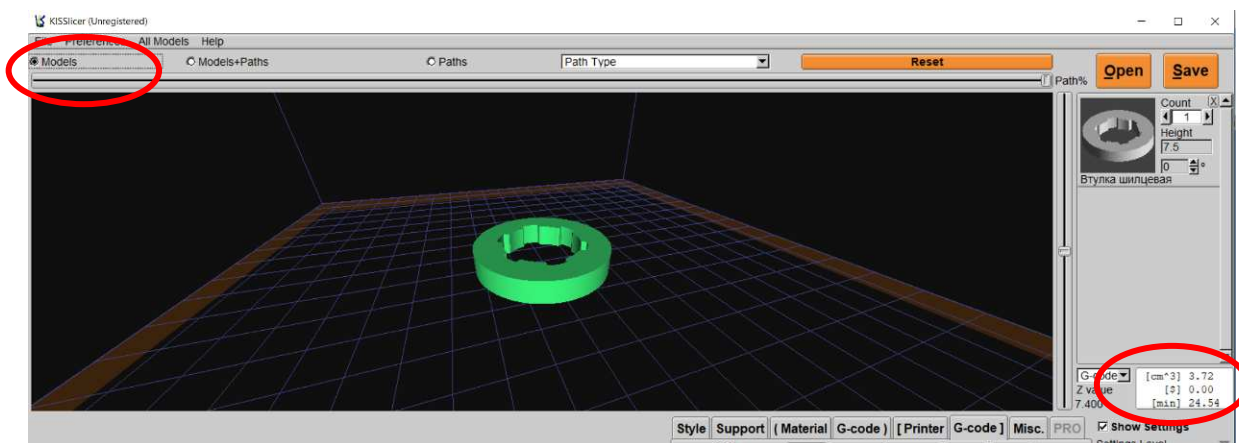


Рис. 9.18. Отображение модели в режиме *Models*, после выполнения команды *Slice*

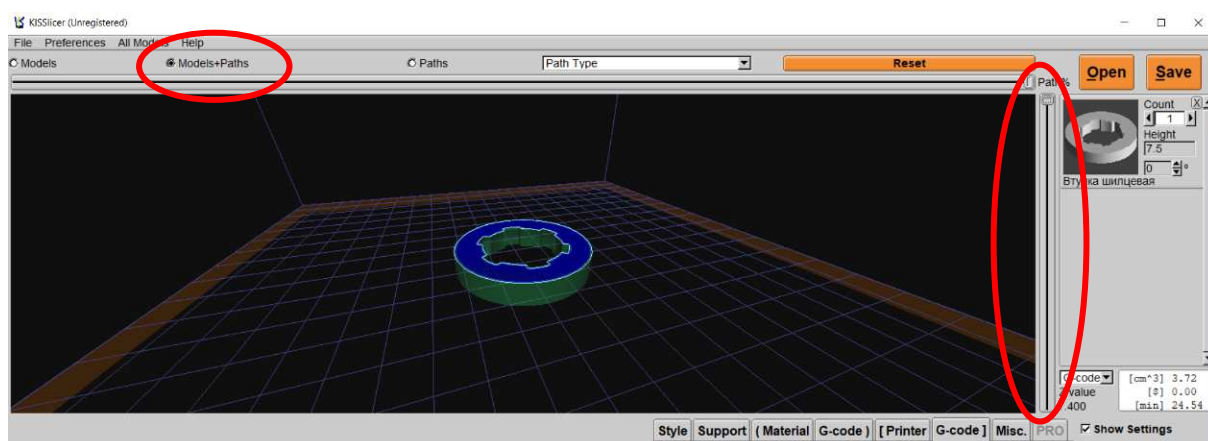


Рис. 9.19. Отображение модели в режиме *Models+Paths*, после выполнения команды *Slice*

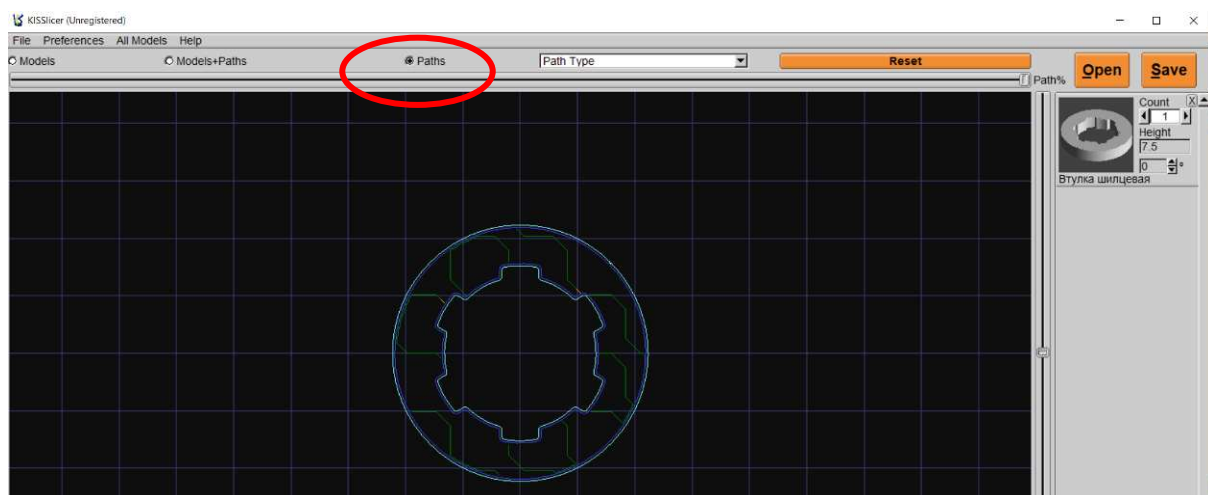


Рис. 9.20. Отображение модели в режиме *Paths*, после выполнения команды *Slice*

После выполнения команды *Slice* эта же кнопка изменяет свое название на *Save*.

Нажатием на кнопку *Save*, задаем имя файла латинскими буквами (3D принтер может читать только файлы с латинскими буквами) и сохра-

нием файл в формате *gcode* (рис. 9.21). Полученный файл записываем на *SD* карту принтера и вставляем ее в соответствующий слот 3D принтера.

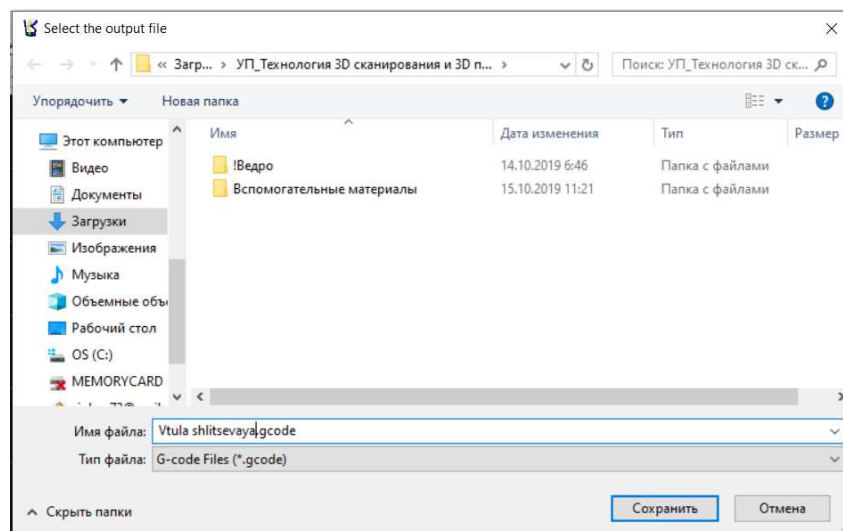


Рис. 9.21. Диалог сохранения файла в формат *gcode*

2.3. Подготовка 3D принтера к работе.

Выберите нужный тип пластика и загрузите его в 3D принтер. Перед использованием любого типа пластика необходимо нагреть экструдер до рабочей температуры пластика (рекомендованная рабочая температура пластика указана производителем; обычно рабочая температура пластика *PLA* – 200-210°C, пластика *ABS* – 240-245°C). Откройте вкладку «Control» (Управление), установите температуру экструдера (220°C для *PLA*-пластика, или 250 для *ABS*) и нажмите кнопку «Нагреть экструдер». В течение минуты экструдер прогреется до назначенного значения.

Проденьте пластиковую нить в отверстие экструдера до того момента пока пластик начнет вытекать из сопла.

Выберите в главном меню принтера пункт «*Print from SD*» (Печать с карты *SD*), в открывшемся меню выберите свой файл, и печать запустится автоматически.

9.5. Содержание и оформление отчета

Отчет выполняется на отдельных листах формата А4. На титульном листе указывается название и номер лабораторной работы, фамилия студента, номер группы и дата выполнения.

Отчет должен содержать: цель работы, краткое описание теоретической части, последовательность выполнения работы.

9.6. Перечень контрольных вопросов

1. Расскажите об основных этапах создания 3D модели в КОМПАС-3D?

2. В каком формате сохраняется 3D модель в КОМПАС-3D для дальнейшей подготовки к 3D печати?
3. Расскажите об особенностях сохранения виртуальной модели в формат *STL* в КОМПАС-3D.
4. Какую роль выполняет программа-слайсер в 3D печати?
5. Расскажите об особенностях настройки программы-слайсера *KISSliser*.
6. В чем заключается разница в настройке программы-слайсера для пластиков *PLA* и *ABS*?
7. В каком формате сохраняется файл в программе-слайсере для печати на 3D принтере?
8. Почему имя файла с расширением «*gcode*» должно задаваться буквами латинского алфавита?
9. Расскажите об особенностях подготовки 3D принтера к печати?

Список использованной литературы

1. Материал нейлон [Электронный ресурс] <http://3dtoday.ru/wiki/neylon/>
2. Материал PVA [Электронный ресурс] http://3dtoday.ru/wiki/pva_plastic
3. Аддитивные технологии <http://edudop.ru/mod/page/view.php?id=24506>
4. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. М.: Научные основы и технологии, 2011.-382с.
5. Кербер М.Л., Буканов А.М., Вольфсон С.И., Горбунова И.Ю., Кандырин Л.Б., Сирота А.Г., Шерышев М.А. Физические и химические процессы при переработке полимеров. М.: Научные основы и технологии. 2013.- 402с.
6. Технология резины: Рецептуростроение и испытания / Под ред. Дика Дж. С. – СПб : Научные основы и технологии, 2010.-620с.
7. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов: Учебник для вузов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: НППА «Истек», г. Москва, 2009.- 504 с.
8. Н.Миллс Конструкционные пластики – микроконструктора, характеристики, применения. Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство / Н. Миллс – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 512 с. ISBN 978-5-91559-047-1
9. Баженов С.Л., Берлин А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы: Научное издание / Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
10. Основы технологии переработки пластмасс. Учебник для вузов/ С.В. Власов, Л.Б. Кандырин, В.Н. Кулезнев и др. . – М.: Химия, 2004. – 600
11. Производство изделий из полимерных материалов. Учеб. пособие/ Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д. – СПб.: Профессия, 2004.- 464с.
12. Кербер М.Л., Буканов А.М., Вольфсон С.И., Горбунова И.Ю., Кандырин Л.Б., Сирота А.Г., Шерышев М.А. Физические и химические процессы при переработке полимеров. М.: Научные основы и технологии. 2013.-402с.
13. Каблов, В.Ф. Компьютерный дизайн полимерных материалов – структура и свойства // Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов: докл. ,2014 г. / ООО ВЕСКОМ, «НИИШП». - М., 2014. - С. 41-50.
14. Каблов, В.Ф., Бойцов, Е.П., Синьков, А.В., Благинин, С.И. Использование 3D-печати для создания новых полимерных материалов с заданной структурой // Каучук и резина – 2015: матер. (тез.) докл. V всерос. конф. (г. Москва, 22-23 апр. 2015 г.) / ООО «НИИЭМИ», - Москва, 2015. - С. 42-43 (рус.); С. 87 (англ.).
15. Каблов В.Ф., Бойцов Е.П., Синьков А.В., Благинин С.И. Получение новых полимерных материалов заданной структуры с применением 3D печати. Электронный ресурс. ВИАМ. <http://conf.viam.ru/conf/180/proceedings>
16. <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/materialy-dlja-3d-pechat/>

Электронное учебное издание

Алексей Владимирович **Синьков**
Владимир Николаевич **Тышкевич**

Технология 3D сканирования и 3D печати
Учебно-методическое пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2019 г. Поз. № 38.

Подписано к использованию 24.10.2019. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 5,0.

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.