

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой»

**Н. Н. Попок  
С. А. Портянко**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
НА ОСНОВЕ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-ПРИНТЕРА.  
ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по химико-технологическому образованию в качестве пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по химико-технологическим специальностям*

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой  
2022

УДК 621.91.01(075.8)

ББК 34.52-1я73

П58

Одобрено и рекомендовано к изданию

советом механико-технологического факультета (протокол № 3 от 23.12.2020 г.)

Кафедра технологии и оборудования машиностроительного производства

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

кафедра технологии металлов

Белорусского государственного аграрно-технического университета,

зав. каф. д-р техн. наук, проф. Л. М. АКУЛОВИЧ;

кафедра технологии и оборудования машиностроительного производства

Витебского государственного технологического университета,

зав. каф. канд. техн. наук, проф. В. И. ОЛЬШАНСКИЙ

**Попок, Н. Н.**

П58 Технология производства машиностроительных изделий на основе послойного синтеза с использованием 3D-принтера. Практикум : учеб. пособие / Н. Н. Попок, С. А. Портянко. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022. – 96 с.

ISBN 978-985-531-819-5.

Приведены методические указания к лабораторным и другим видам занятий и практик, направленные на изучение конструкций и настройки 3D-принтеров, практическое освоение знаний, необходимых для выполнения отдельных заданий по дисциплинам «Типовые операции механосборочных производств», «Материалы аддитивного синтеза», «Механика материалов и конструкций», «Конструирование и расчет изделий», «Термодинамика и теплопередача», «Аддитивные технологии в производстве», «Нормирование точности изделий аддитивного синтеза», «Мехатроника и основы программирования», «Компьютерное моделирование и инженерный анализ», «Методы исследований материалов и изделий» и др.

Предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и специалистов в области аддитивных и субтрактивных технологий машиностроения.

**УДК 621.91.01(075.8)**

**ББК 34.52-1я73**

**ISBN 978-985-531-819-5**

© Попок Н. Н., Портянко С. А., 2022  
© Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой, 2022

## Содержание

Предисловие .....	5
Введение .....	7
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	9
1 Выбор материала:	
марка, физико-механические свойства .....	9
2 Конструирование изделий:	
технические характеристики 3D-принтеров	
моделей Stratasys Mojo, Mass Portal Pharaoh XD30 .....	14
3 Настройки SIMPLIFY 3D, рекомендации по температурным настройкам.....	18
3.1 Закладка «Extruder» (экструдер).....	19
3.2 Закладка «Layer» (слой) .....	21
3.3 Закладка «Additions» (дополнения) .....	23
3.4 Закладка «Infill» (заполнение) .....	25
3.5 Закладка «Support» (поддержки).....	27
3.6 Закладка «Temperature» (настройки температуры) .....	29
3.7 Закладка «Cooling» (настройки охлаждения модели).....	30
3.8 Закладка «g-код» (изменения параметров генерации g-кодов).....	32
3.9 Закладка «Scripts» (скрипты).....	32
3.10 Закладка «Other» (другие настройки) .....	34
3.11 Закладка «Advanced» (расширенные настройки) .....	35
4 Технология FDM.....	39
5 Тепловое воздействие на изделие при 3D-печати .....	40
6 Анализ точности изготовления изделий: размерный анализ.....	43
7 Традиционные, аддитивные и «гибридные» технологии, их технические возможности.....	48
8 Экономическая оценка производства изделий на основе трехмерных технологий .....	49
Задания для лабораторных и практических занятий, курсовых и дипломных проектов.....	50
Тесты и вопросы для контроля знаний по аддитивным технологиям .....	53
Заключение .....	57
Краткий словарь терминов.....	58
Литература.....	62
Приложение А	
Рекомендуемая структура отчетных материалов по выполнению заданий.....	63
Приложение Б	
Комплект документов на технологический процесс № 202123002 .....	64

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для подготовки инженеров в области аддитивных технологий и продвижения этих технологий в Республике Беларусь на базе Белорусского государственного технологического университета (2016), Витебского государственного технологического университета (2017), Полоцкого государственного университета (2018) и Белорусско-Российского университета (2019) была открыта новая специальность 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» (в настоящее время 6-05-0722-05). По этой специальности в каждом из университетов были разработаны учебные планы и учебные программы дисциплин, создана соответствующая материально-техническая база и ведется подготовка инженеров. Однако на сегодня многие вопросы образовательного процесса до конца не проработаны и не решены, в частности требуется учебно-методическое обеспечение лабораторных занятий, выполнения курсовых и дипломных проектов, проведения производственных практик и других составляющих учебного процесса как на I, так и II ступенях высшего образования.

Предлагаемое учебно-методическое пособие направлено на частичное устранение существующих пробелов в образовательном процессе. При этом авторы пособия рассматривают аддитивные технологии и оборудование для их реализации не как противоположность механической обработке, а как дополнительные специальные технологии, развивающие машиностроение. В этой связи предлагается рассматривать подготовку инженеров по специальности 6-05-0722-05 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» как профильную или специализированную в рамках образовательных стандартов ОСВО по специальности 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». Учебные планы по названным специальностям включают одинаковые общеобразовательные и общетехнические дисциплины, такие как, например, физика, математика, теоретическая механика, механика материалов и др. Поэтому многие учебники и учебные пособия, прежде всего, по специальности 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» могут быть использованы при подготовке инженеров в области аддитивных технологий. Аналогичным образом рассматривается подготовка магистров по специальности 1-36 80 02 «Инновационные технологии в машиностроении» и специализации «Аддитивные технологии».

Второй особенностью данного учебно-методического пособия является комплексность рассмотрения различных вопросов, которая заключается в изучении конструкций и настройки 3D-принтеров моделей «Mass Portal»,

«Моjo» и др. с использованием соответствующих разделов инструкций и применении полученных знаний для выполнения отдельных заданий по дисциплинам «Типовые операции механосборочных производств», «Материалы аддитивного синтеза», «Механика материалов и конструкций», «Конструирование и расчет изделий», «Термодинамика и теплопередача», «Аддитивные технологии в производстве», «Нормирование точности изделий аддитивного синтеза».

В свою очередь задания по дисциплинам включают перечень вопросов и порядок действий, которые необходимо изучить и выполнить обучающимся. Предполагается, что эти задания могут быть использованы как при проведении лабораторных и практических занятий, так и при выполнении курсовых и дипломных проектов и прохождении производственных практик. При этом задание по каждому виду занятий дополняются конкретными методическими указаниями к их выполнению, составленными по общепринятой методике.

Третья особенность данного пособия состоит в использовании результатов научных исследований авторов, полученных на имеющемся в их распоряжении оборудовании.

Авторы рассчитывают, что настоящее учебно-методическое пособие будет полезно преподавателям вузов с точки зрения использования представленных методических подходов к проведению занятий по специальностям 6-05-0722-05 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» и 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», а также магистрантам и аспирантам при выполнении диссертационных работ в области аддитивных технологий.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных сферах деятельности – машиностроении, строительстве и архитектуре, археологии, медицине и т.д. – все более широкое применение находят изделия и модели, полученные с использованием аддитивных технологий.

В стандарте ASTM F2792.1549323-1 [1] аддитивные технологии определены как «process of joining materials to make objects from 3D-model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies» («процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от «вычитающих» производственных технологий»).

Под «вычитающими» (или субтрактивными) технологиями подразумевается механообработка – удаление («вычитание») материала из массива заготовки. Таким образом, сообщество американских инженеров ASTM International (American Society for Testing and Materials) прибегло к понятию (subtractive) «вычитание», чтобы определить новое понятие (additive) «добавление», т.е. в самом определении аддитивные технологии трактуются как противоположность технологиям механообработки. Но не все технологии соединения материала, а только те, которые создают объект по данным 3D-модели или из CAD-данных, а именно на основе трехмерной компьютерной модели. Первое ключевое слово здесь – CAD, второе – «послойно». Можно отметить, что американцы используют в определении термина слово «usually» (обычно), по-видимому, допуская по меньшей мере теоретическую возможность и непослойного построения.

Рекомендованы два основных термина – Additive Manufacturing (AM), Additive Fabrication (AF), а также равнозначные по смыслу – Additive Processes, Additive Techniques, Additive Layer Manufacturing, Layer Manufacturing и Freeform Fabrication. Все они могут быть переведены как «аддитивные технологии», также их можно называть технологиями послойного синтеза.

Согласно ISO/ASTM 52900-15 [2], аддитивные технологии разделены на 7 категорий:

- 1) Material Extrusion – «выдавливание материала», или послойное нанесение расплавленного строительного материала через экструдер;
- 2) Material Jetting – «разбрызгивание (строительного) материала», или послойное струйное нанесение строительного материала;
- 3) Binder Jetting – «разбрызгивание связующего», или послойное струйное нанесение связующего материала;
- 4) Sheet Lamination – «соединение листовых материалов», или послойное формирование изделия из листовых строительных материалов;

5) Vat Photopolymerization – «фотополимеризация в ванне», или послойное отверждение фотополимерных смол;

6) Powder Bed Fusion – «расплавление материала в заранее сформированном слое», или последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала;

7) Directed energy deposition – «прямой подвод энергии непосредственно в место построения», или послойное формирование изделия методом внесения строительного материала непосредственно в место подвода энергии.

Идентично международному стандарту ISO/ASTM 52900-2015 в Российской Федерации введены национальные стандарты ГОСТ Р 57558-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Терминология» и ГОСТ Р 57558-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования», в которых термины и определения увязаны с наименованиями, принятыми в существующем комплексе национальных стандартов Российской Федерации.

При реализации различных аддитивных технологий используется большое количество марок материалов и моделей 3D-принтеров, которые могут быть детально изучены. В данном учебно-методическом пособии рассмотрены марки пластиковых материалов, FDM технология и модели 3D-принтеров, имеющие наибольшее распространение. Задания для проведения занятий включают первостепенные вопросы, изучение которых позволит учащимся ознакомиться с устройством 3D-принтеров, освоить их программирование и технологию печати, определить твердость и температурную усадку материалов и ее влияние на точность размеров изделий, исследовать структуру и шероховатость получаемой поверхности изделия.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

## 1 Выбор материала: марка, физико-механические свойства

Рассмотрим материалы, которые находят наиболее широкое применение при 3D-печати [2].

**ABS филамент** – аморфный тройной сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола, название которого образовано из начальных букв наименований мономеров (акрилонитрилбутадиенстирол) (таблица 1). Изготовлен по технологии полимеризации в присутствии инициатора, что существенно снижает количество выбрасываемых в воздух летучих ядовитых веществ во время печати и, как следствие, имеет гораздо менее резкий запах.

Большинство ABS пластиков, используемых в печати на 3D-принтерах, имеют яркий запах. Это связано с выделением некоторых канцерогенных веществ в процессе расплавления ABS. Polymaker разработали материал, обладающий минимальным запахом при печати.

Таблица 1. – Технические характеристики используемых материалов

Характеристики:	Пластик ABSplus-P430	PLA-пластик
Плотность	1,05 г/см <sup>3</sup>	1,25 г/см <sup>3</sup>
Коэффициент теплового расширения	8,82x10 <sup>-05</sup> мм/мм <sup>0</sup> С	8,82x10 <sup>-05</sup> мм/мм <sup>0</sup> С
Минимальная толщина стенок	1 мм	1 мм
Предел прочности на разрыв	30 МПа	40 МПа
Модуль упругости при растяжении	1627 МПа	3,3 ГПа
Модуль упругости при изгибе	1834 МПа	2,3 ГПа
Коэффициент удлинения	6%	30%
Температура размягчения	~ 100 °С	~ 50 °С
Температура плавления	~ 220 °С	~ 180 °С
Температура самовоспламенения	~ 395 °С	~ 500 °С
Толщина слоя:	0,178 мм	0,313 мм
Температура эксплуатации	от -40 до +80 °С	от -20 до +40 °С

**ABS-GF филамент** – пластик на основе ABS пластика с добавлением стекловолокна, предназначенный для печати средних и крупных деталей, подверженных ударным нагрузкам. Известен своей ударопрочностью, но бывает сложен в печати (таблица 2). Добавление стекловолокна позволило уменьшить усадку и упростить печать данным инженерным полимером.

Таблица 2. – Технические характеристики 3D-печати изделий из ABS-GF филамента

Температура сопла при печати	230–250 °С
Температура стола 3D-принтера	90 °С, наличие подогреваемого стола обязательно
Поверхность стола	Лак для печати, клей БФ-2, BuildTak (PEI)
Настройки печати мостов и нависающих элементов	Скорость мостов 40 мм/с, коэффициент экструзии 175%
Усадка	Рекомендуемый масштаб модели по XY для компенсации размеров – 0,83%
Сушка филамента	3 часа при 80 °С

**TPU-GF филамент** – ударопрочный стеклонаполненный (5%) пластик для печати (таблица 3). Обладает высокой химической стойкостью к растворам кислот и щелочей, жирам, маслам, ксилолу, дизельному топливу; ограниченной – к бензину, керосину, ацетону, дихлорметану. Благодаря низкой усадке (до 0,8%), хорошей межслойной адгезии и высокой абразивной стойкости на основе полиамидов отлично поддается сверлению, нарезанию резьбы. Для достижения наилучших результатов рекомендуется сушить перед печатью 2–3 ч при температуре 60–70 °С.

Таблица 3. – Технические характеристики 3D-печати изделий из TPU-GF филамента

Температура сопла	220–245 °С
Температура печатного стола	60–100 °С
Обдув модели	по необходимости 20–60%
Скорость печати	до 60 мм/с
Подача пластика	95–100%
Минимальная высота слоя	0,15 мм
Термостойкость (min/max)	от –50 до +130 °С
Модуль упругости при растяжении	3000 МПа
Максимальная прочность при разрыве	90 МПа
Плотность	1,45 г/см <sup>3</sup>
Усадка при изготовлении изделий	0,2–0,8%

**PLA пластик** – этот материал отличается меньшей усадкой в сравнении с аналогичными пластиками данного типа, не забивает сопло путем образования «пробок», обладает значительно улучшенными механическими характеристиками (таблицы 1, 4). Тогда как PLA пластики известны своей хрупкостью, PolyMax более гибкий и ударопрочный. Пруток изготовлен с применением технологий Jam-free (особая методика производства нити, предотвращающая ее разбухание в термобарьере перед попаданием в сопло), nano-reinforcement (улучшение механических характеристик материала путем создания дополнительных связей между молекулами пластика).

Таблица 4. – Технические характеристики 3D-печати изделий из PLA филамента

Температура сопла при печати	190–30 °С
Температура стола 3D-принтера	от 25 до 60 °С, наличие подогрева необязательно
Поверхность стола	Чистое стекло, клей-карандаш, клеящиеся PEI подложки, лак для печати, синяя малярная лента
Скорость печати	до 40 мм/с
Обдув модели	Рекомендуется, 100%
Сушка филамента	8 ч при 80 °
Температура размягчения	62 °С
Модуль ЮНГА	1879±109 МПа
Предел прочности на разрыв	28,1±1,3 МПа
Прочность на изгиб	48,0±1,9 МПа
Ударная прочность	12,2±1,03 кДж/м <sup>2</sup>

**PLA PRO филамент** – такой же экологичный биополимер, как и обычный полилактид (PLA). Биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота, вырабатываемый из возобновляемых природных ресурсов, таких как кукуруза, картофель, древесина, свекловичный сахар или сахарный тростник.

Следует заметить, что свои необычные свойства PLA PRO показывает только при высокой температуре печати – минимум 230, а лучше 240–250 °С. Тогда у пластика повышаются вязкость (становится более крепким в тонких деталях), спекание, происходит более ровная укладка слоев, что благотворно сказывается на общем качестве печати. Изделие приобретает повышенную прочность, оно становится практически монолитным. PLA PRO не привередлив к настройкам печати, и несмотря на повышенную температуру, материал не перегревается и печатается с легкостью обычного PLA.

**PC филамент** – светорассеивающий поликарбонат PolyLite, изготовлен из качественного сырья Macrolon и не содержащий дополнительных присадок или добавок. Материал чуть сложнее в печати, чем ABS, но с успехом печатаем данным прутком на принтерах Mass Portal. Для качественной печати поликарбонатом принтер должен быть оснащен цельнометаллическим экструдером и способен печатать в диапазоне температур 270–280 °С. Данный материал применяется для корпусных изделий и деталей, требующих хорошие характеристики ударной прочности и высокой температуростойкости. Температуростойкость данного материала достигает 120 °С.

**PC-ABS филамент** – сплав светорассеивающего поликарбоната и пластика ABS.

**РЕТ филамент** – полиэтиленгликольтерефталат, пластичная смола. Самый используемый пластик в мире. Его волокна можно найти в одежде, сосудах и контейнерах для еды, промышленных листах пластика, а также в сочетании со стекловолокном для технических смол. Тысячи видов товаров, продукты питания и напитки поставляются в этом материале и в него упаковываются.

**РЕТG филамент** – это сополиэфир, модифицированная версия РЕТ. Модификация состоит в добавлении при полимеризации второго хвоста гликоля. Получается иррегулярная молекулярная структура, пластик чист и аморфен, температура стеклования около 88 °С (таблица 5). Имеет измененную структуру для обеспечения высокого качества печати. В сравнении с большинством аналогичных материалов не вызывает проблем с ретрактами и обладает в два раза большей ударопрочностью.

Таблица 5. – Технические характеристики 3D-печати изделий из РЕТG филамента

Температура экструдера при печати	230–240 °С
Температура платформы 3D-принтера	от 70 до 80 °С
Поверхность стола	Клеящиеся РЕI подложки, лак для печати
Обдув модели	Включить для высокого качества получаемых моделей или выключить для достижения высокой прочности
Сушка филамента	8 ч при 70 °С
Температура размягчения	82 °С
Модуль упругости при изгибе	1523±50 МПа
Предел прочности на разрыв	31,70±0,10 МПа
Прочность на изгиб	58,30±4,00 МПа
Ударная прочность	9,70±2,60 кДж/м <sup>2</sup>

**РР филамент** – полипропилен минералонаполненный. Материал с очень высокой химической стойкостью. Его усадка значительно снижена по отношению к обычному полипропилену, что заметно облегчает 3D-печать.

Высокая износостойкость и эластичность этого полимера позволяет использовать его для печати безпетлевых гибких соединений.

**НIРS филамент** – ударопрочный полистирол. Несмотря на название этот материал более хрупкий чем ABS и его рекомендуется использовать для печати поддержек в моделях из ABS пластика.

**SBS (CERAMO-TEX) филамент** – стирол-бутадиен-стирольный блоксополимер (таблица 6). Отличается очень интересной поверхностью напечатанных моделей. Матовая текстура полимера скрывает дефекты печати, слои, и модели выглядят как литые. Плотность и пористость моделей

можно регулировать при помощи изменения температуры печати и потока (коэффициента экструзии) в слайсере.

Таблица 6. – Технические характеристики 3D-печати изделий из SBS филамента

Температура сопла при печати	230–260 °С
Температура стола 3D-принтера	от 90 до 110 °С
Поверхность стола	Чистое стекло, лак для печати, клей БФ-2
Обдув модели	Желательно избегать, для достижения хорошей межслойной адгезии
Сушка филамента	Пластик не впитывает влагу и не требует сушки даже по истечению нескольких лет хранения
Температура размягчения	102 °С

**TPU филамент** – термопластичный полиуретан. Самый эластичный и износостойкий материал в линейке гибких пластиков. Отличается высокой химической стойкостью к маслам, бензинам, щелочам и некоторым кислотам. Обладает высокой прочностью при деформации на изгиб и растяжение.

Характеристики:

- материал стоек к погодным условиям и хорошо держит форму;
- устойчив к щелочам, маслам, бензинам и слабым кислотам;
- высокая прочность при деформации на изгиб и растяжениях;
- хорошие свойства шумопоглощения и виброгашения;
- высокая степень износостойкости.

Кроме того, полимер обладает хорошей устойчивостью к морской воде, жирам, не подвержен воздействию микробов или бактерий. Материал имеет высокий уровень устойчивости к естественному старению и допускает повторную переработку.

**TPE филамент** – фторопластовый термопластичный эластомер. Специальный гибкий материал, по свойствам похожий на твердый силикон. Упругий и приятный на ощупь. Этот материал открывает новые возможности в 3D-печати по технологии FDM. Не поддается механической обработке и поэтому обладает высокой износостойкостью.

**ASA филамент** – атмосферостойкий УФ-защищенный пластик для 3D-печати (таблица 7). Отлично заменяет ABS в случаях, когда напечатанное на принтере изделие будет долгое время эксплуатироваться на улице. Многие другие полимеры под влиянием ультрафиолета теряют прочность, деградируют, тогда как ASA может быть использован даже в неокрашенных деталях. В промышленности из ASA изготавливают детали автомобилей, бамперы, корпуса зеркал заднего вида и другие наружные пластиковые элементы.

Таблица 7. – Технические характеристики 3D-печати изделий из ASA филамента

Температура сопла при печати	240–260 °С
Температура стола 3D-принтера	от 75 до 95 °С
Поверхность стола	Клеящиеся PEI подложки (BuildTak)
Обдув модели	Возможен минимальный обдув на «мостах» и мелких деталях 3D-моделей. Для достижения максимальной прочности обдув необходимо отключить
Сушка филамента	8 ч при 80 °С
Температура размягчения	105 °С
Модуль юнга	2379±157 МПа
Предел прочности на разрыв	43,80±0,80 МПа
Прочность на изгиб	73,40±2,10 МПа
Ударная прочность	10,3±0,4 кДж/м <sup>2</sup>

**PVB филамент** – печатный материал из поливинилбутирала – вещества, используемого в производстве лаков и красок, а также при изготовлении триплекса.

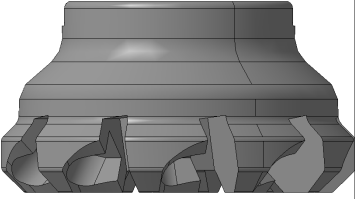
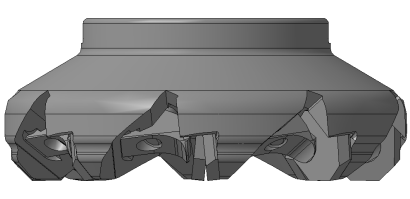
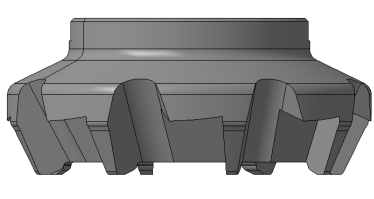
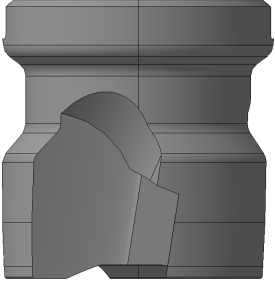
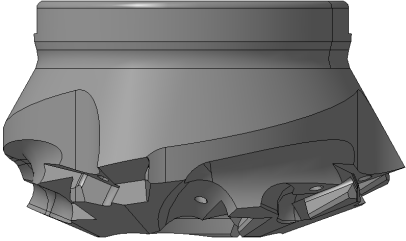
**SAN филамент** – сополимерный пластик, состоящий из стирола и акрилонитрила. Прозрачный материал (часто с желтоватым или голубоватым оттенком) со светопропусканием до 87%. Характеризуется высокой жесткостью (прочность при растяжении – 65–85 МПа) и лучшей стойкостью к удару по сравнению с полистиролом общего назначения. Хороший диэлектрик, устойчив к царапинам. Имеет более высокую теплостойкость по сравнению со стандартными марками ABS. Но в мононити хрупок, по этой причине не подходит для 3D-принтеров, у которых экструдер с непрямой подачей.

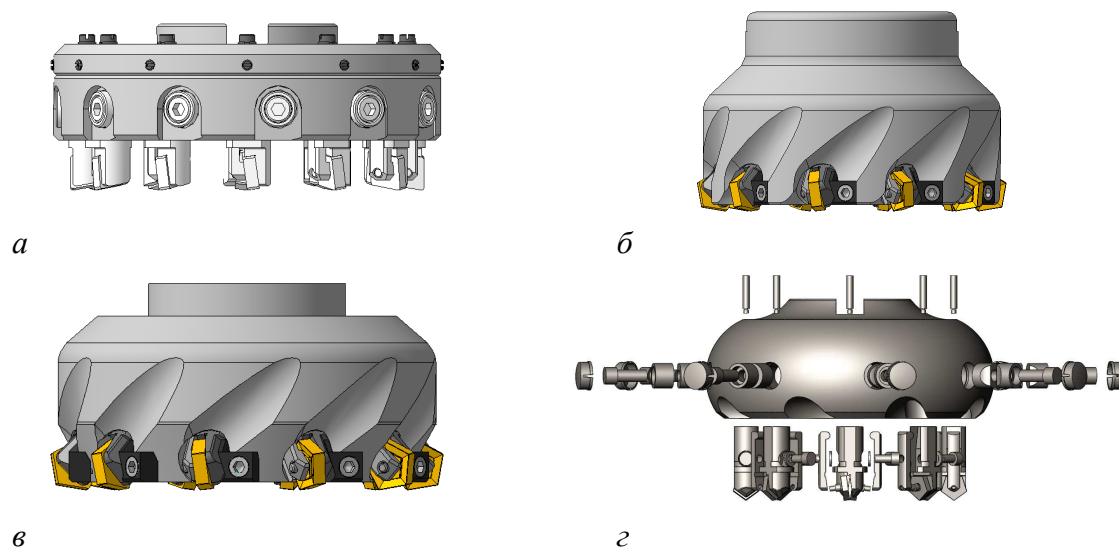
## 2 Конструирование изделий: технические характеристики 3D-принтеров моделей Stratasys Mojo, Mass Portal Pharaoh XD30

Математические модели включают описание известными формулами наиболее распространенных форм корпусов режущих инструментов в виде дисков, цилиндров, конусов, торов и т.п., некоторые из которых представлены в таблице 9 [3]. Например, цилиндр описывается уравнением  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ , конус –  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$ , сфера –  $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$  т.д.

По аналогии предложены макеты конструкций в виде сочетания цилиндров (рисунок 1, а), дисков (рисунок 1, б), усеченных конусов (рисунок 1, в) и двух сопрягаемых торов (рисунок 1, г) [4].

Таблица 9. – Конструктивные формы торцовых фрез

		
F45WG D080-10-27-FX-R08	SOF45WG D125-08-40-R26	T465 FLN D125-08-40R-22ST
		
HM90 F90A D 40-3-16	T425 SM-D050-13-3-32-13	



*а* – в виде сочетаний цилиндров; *б, в* – дисков и усеченных конусов;  
*г* – сопрягаемых торов



Рисунок 1. – Макеты конструкций

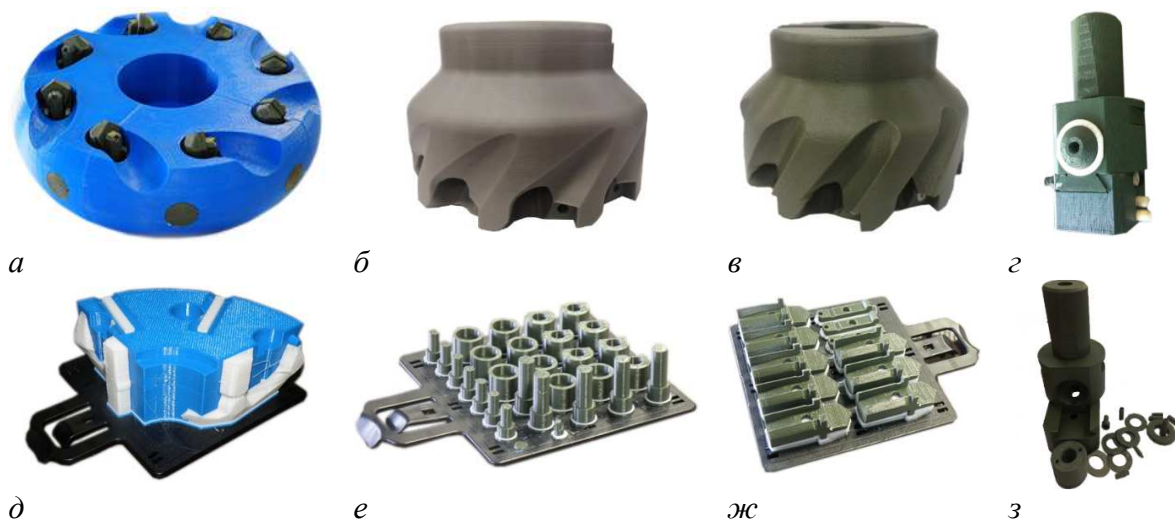
Физическое моделирование блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) и их работоспособности заключалось в 3D-печати макетов и их исследовании на экспериментальных стендах [5]. Проектирование и усовершенствование конструкций как сложного изделия машиностроения осуществляется путем формирования трехмерной модели инструмента, т.к. именно создание трехмерных моделей, идентичных проектируемым конструкциям БМРИ, дает возможность быстро перенастраивать инструмент для реализации целей исследования. Использование 3D-параметрических

моделей типовых деталей конструкции позволяет существенно повысить эффективность конструирования в среде САД систем [6]. Однако на этапах подготовки трехмерных моделей к печати следует оценивать технические характеристики используемых 3D-принтеров и материалов с последующей корректировкой геометрических размеров, оказывающих влияние на точность печати трехмерных экспериментальных макетов БМРИ (таблица 10). Были напечатаны макеты, представленные на рисунке 2.

Физическое моделирование работоспособности блочно-модульных режущих инструментов реализовывалось на фрезерном станке с ЧПУ модели «Robodrill» (фирма «Fanuc», Япония) [7]. Использовались макеты сборных режущих инструментов, отпечатанных на 3D-принтерах из различных пластиковых материалов. Макеты устанавливались в инструментальном магазине станка и погружались в емкость с подкрашенной жидкостью (рисунок 3). При моделировании регулировалась частота вращения инструмента и велась видеосъемка потоков жидкости, обтекающих конструктивные элементы режущих инструментов.

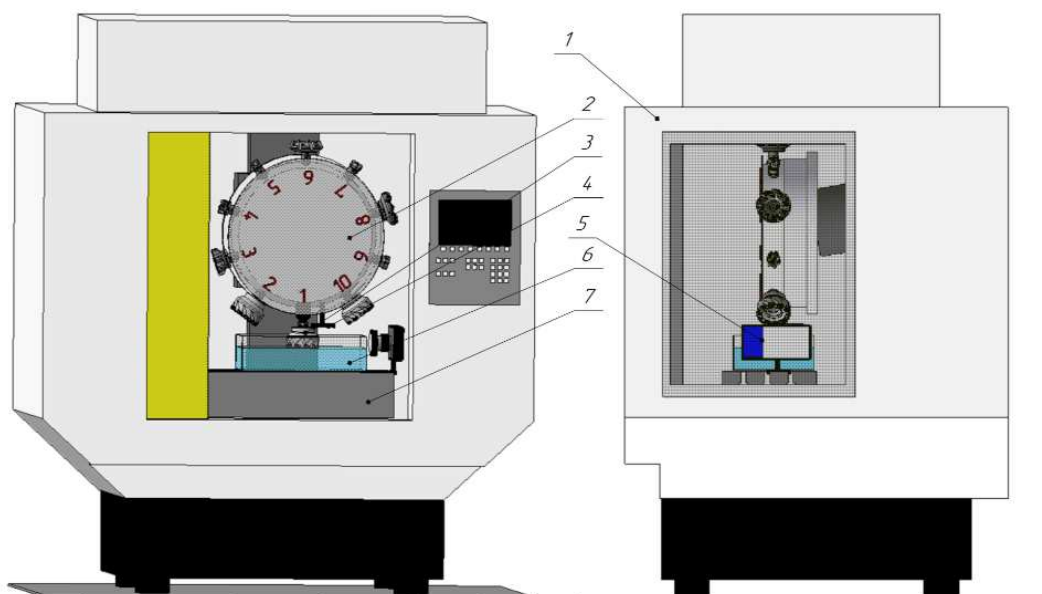
Таблица 10. – Технические характеристики 3D-принтеров

			
<b>Stratasys Mojo</b>		<b>Mass Portal Pharaoh XD 30</b>	
Технология печати	FDM	Технология печати	FDM
Толщина слоя (мкм)	178	Толщина слоя (мкм)	от 20
Материалы	ABSplus-P430	Материалы	PLA (ABS, PET, PVA, HIPS)
Рабочая зона (мм)	140x140	Рабочая зона (мм)	300x300
Размеры (мм)	630x450x530	Размеры (мм)	425x483x875
Страна производитель	США	Страна производитель	Латвия



*a* – торцовая фреза; *б, в* – корпуса фрезы; *z* – расточной патрон; *д* – сегмент корпуса фрезы; *е-з* – сухари, винты, корпуса блоков резцовых

**Рисунок 2. – Макеты конструкций блочно-модульных торцовых фрез, расточного патрона и основных элементов, выполненных с применением технологии трехмерной печати**



**1** – вертикально-обрабатывающий центр с ЧПУ Robodrill a-D21LiB; **2** – магазин станка; **3** – блочно-модульная торцовая фреза; **4** – камера Huawei P20 Pro; **5** – зеркальный фотоаппарат Canon 1200D; **6** – емкость с жидкостью; **7** – стол станка

**Рисунок 3. – Физическая модель для исследования работоспособности конструкции БМРИ**

### 3 Настройки SIMPLIFY3D, рекомендации по температурным настройкам

Настройки программного обеспечения SIMPLIFY3D имеют огромное значение при печати трехмерных моделей для обеспечения качества и степени точности получаемых поверхностей (см. рисунок 4) [8].

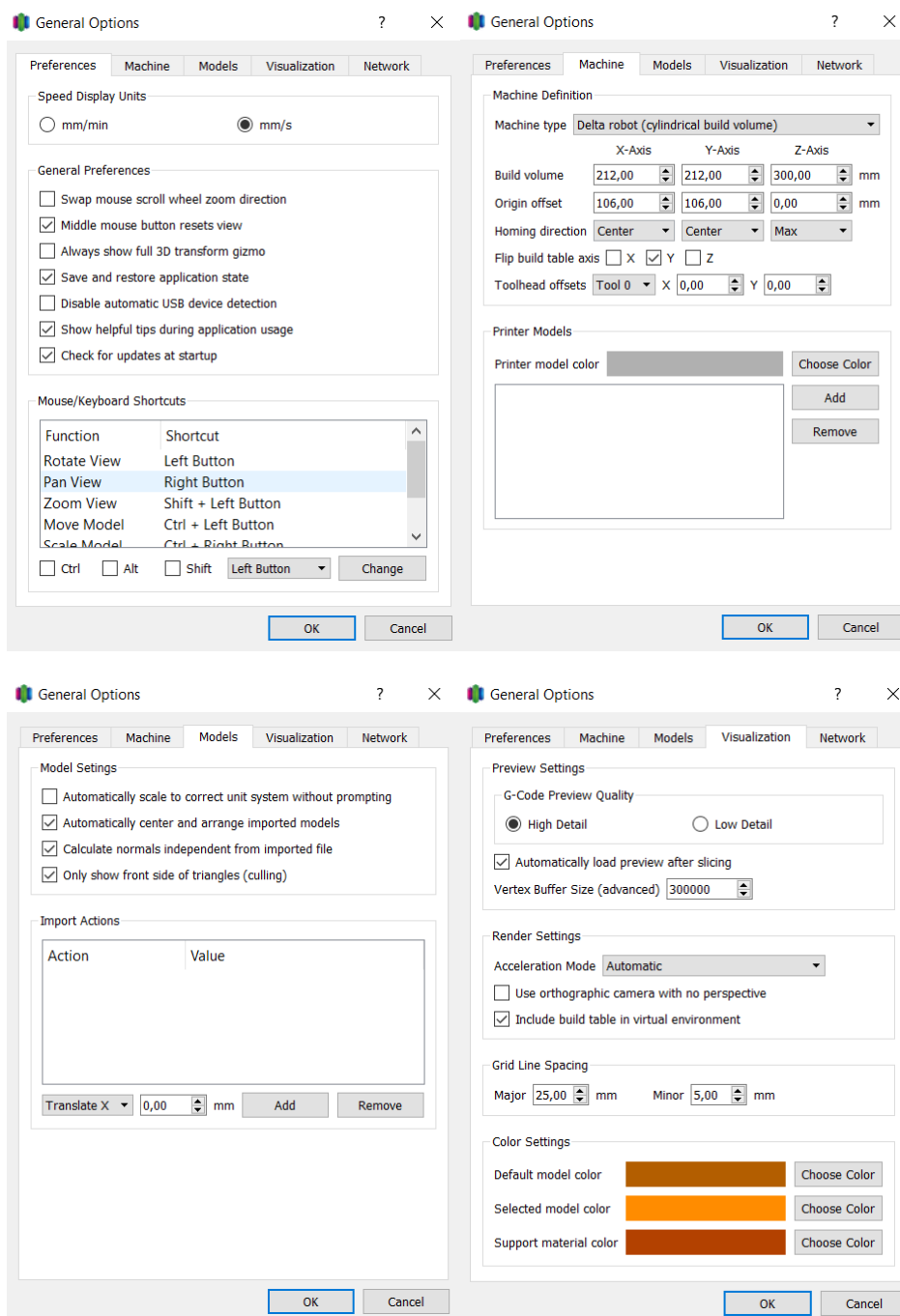


Рисунок 4. – Общие настройки SIMPLIFY3D

В слайсере Simplify3D настройки печати называются **процессом**. Процессов может быть либо один, либо несколько с разными настройками, что позволяет гибко настраивать печать применительно, например, к разной высоте детали или с привязкой определенного процесса к одной из нескольких моделей. Подробно о создании нескольких процессов будет рассмотрено в разделе 4, в данном разделе рассмотрим работу только с одним процессом печати. Рассмотрим, как выглядит окно настроек процесса.

### 3.1 Закладка «Extruder» (экструдер)

Настройки закладки «Extruder» представлены на рисунке 5.

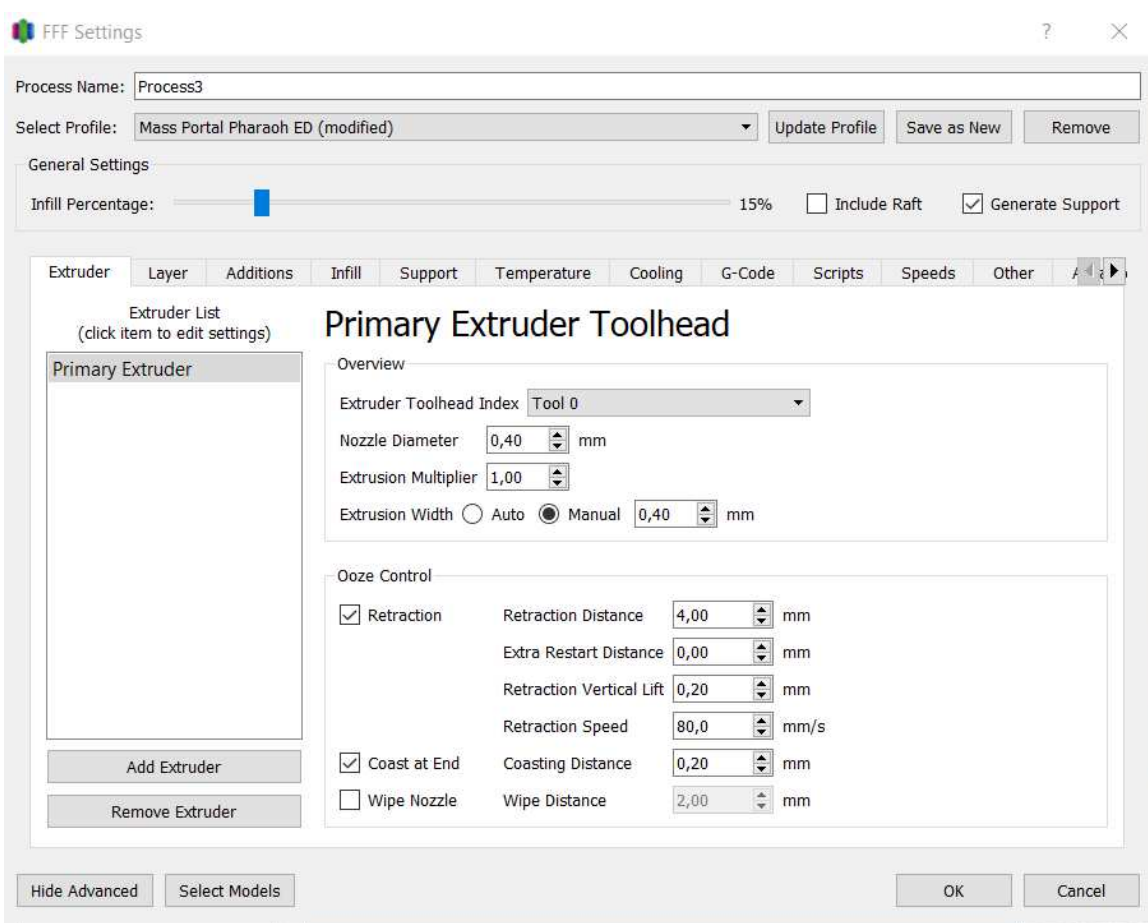


Рисунок 5. – Настройки закладки «Extruder»

**Extruder List** – список доступных экструдеров.

**Add Extruder** – добавить экструдер.

**Remove Extruder** – удалить экструдер.

Группа настроек «**Overview**» (общие):

**Extruder Toolhead Index**– выбор индекса экструдера, требуется для прошивки при смене экструдеров.

**Nozzle Diameter** – диаметр сопла принтера.

**Extruder Multiplier** – коэффициент величины экструзии (еще называют «поток», «текучесть», «Flow»). Это коэффициент количества выдавливаемого пластика. Если коэффициент равен 1, то это соответствует величине экструзии в 100%; если, например, 0,98, значит, что величина экструзии уменьшится на 2% (будет выдавливаться меньше пластика); если 1,02 – то величина экструзии увеличится на 2% (будет выдавливаться больше пластика).

**Extrusion Width** – ширина экструзии. (**Не путайте с предыдущим параметром!**) Этот параметр не меняет внешние размеры детали, но делает ширину полосы выдавливаемого пластика шире или уже. «Auto» устанавливает ширину экструзии на 20% больше диаметра сопла, знак «Manual» – для ручного ввода ширины экструзии (ширина равна диаметру сопла).

Группа настроек «Ooze Control» – контроль подтекания пластика из сопла при холостых перемещениях сопла (настройки ретракта). Данная группа настроек позволяет бороться с подтеками пластика, «соплями», прыщиками или дырами на поверхности модели.

**Retraction** – включить/отключить ретракт.

**Retraction Distance** – длина ретракта.

**Extra Restart Distance** – количество подаваемого пластика обратно в экструдер после ретракта. Данный параметр теоретически позволяет избавиться от дырок или прыщей, возникающих в месте ретракта.

**Retraction Vertical Lift** – подъем сопла или опускание стола принтера при выполнении ретракта.

**Retraction Speed** – скорость ретракта.

**Coast at End** – включение/отключение функции прекращения подачи пластика во время печати слоя незадолго до точки ретракта. Позволяет снизить давление в сопле перед ретрактом и теоретически позволяет избавиться от прыщей на внешнем периметре.

**Coasting Distance** – дистанция от точки ретракта до начала прекращения подачи пластика.

**Wipe Nozzle** – включение/отключение функции разглаживания соплом места ретракта для внешнего периметра. Сопло при включении этой функции проезжает чуть дальше точки ретракта по внешнему периметру и возвращается обратно в точку ретракта. Теоретически эта функция позволяет разгладить место ретракта.

**Wipe Distance** – длина разглаживания места ретракта.

## 3.2 Закладка «Layer» (слой)

Настройки закладки «Layer» представлены на рисунке 6.

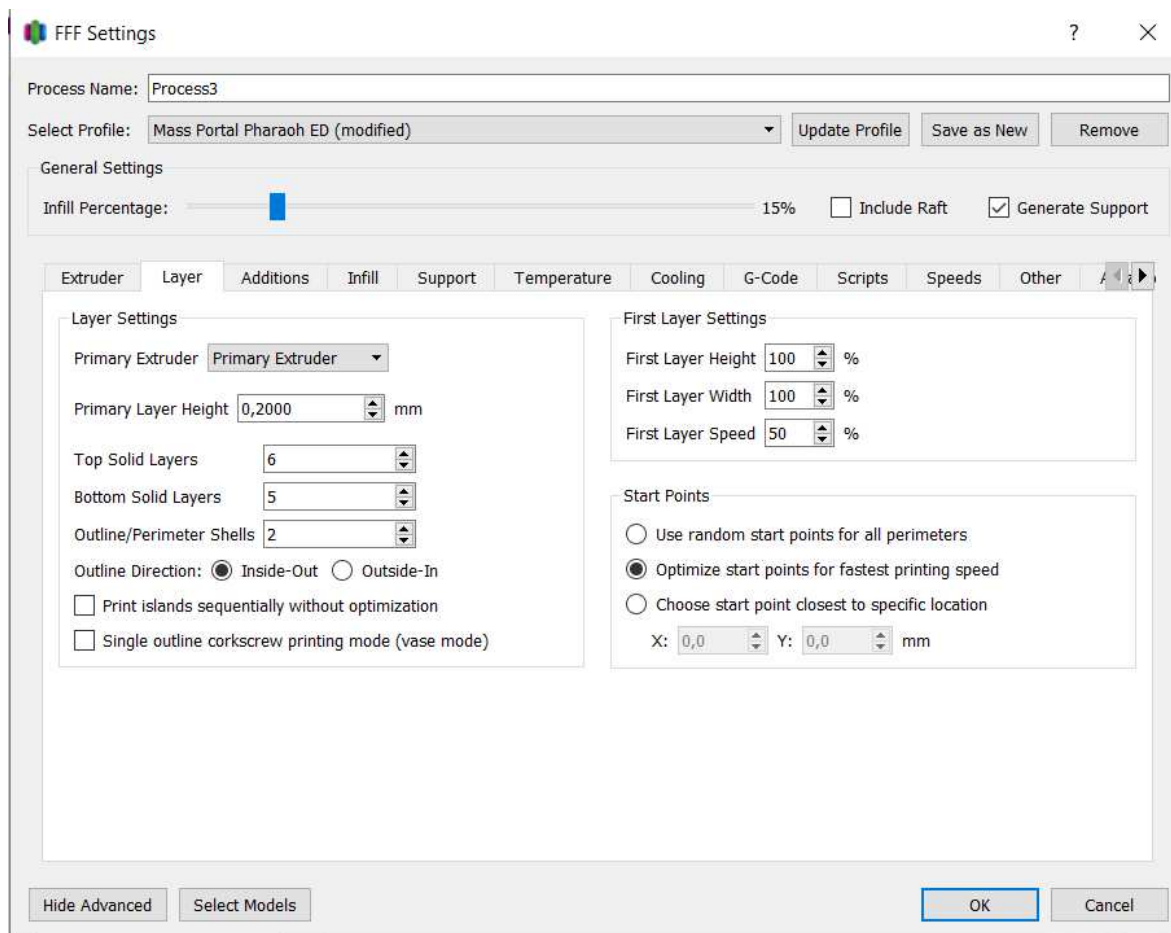


Рисунок 6. – Настройки закладки «Layer»

**Primary Extruder** – выбор экструдера для печати основных частей модели, если у вас один экструдер, оставляйте эту настройку как есть.

**Primary Layer Height** – высота слоя печати.

**Top Solid Layers** – количество верхних сплошных слоев крышки модели.

**Bottom Solid Layers** – количество нижних сплошных слоев дна модели.

**Outline/Perimeter Shells** – количество внешних периметров (стенок модели).

**Outline Direction** – выбор последовательности печати периметров (стенок) модели:

– **Inside Out** – сперва внутренние периметры, потом внешний периметр;

– **Outside-In** – сперва внешний периметр, потом внутренний. (**Обратите внимание!** В данном слайсере сначала печатаются периметры, а потом заполнение!)

**Print island sequentially without optimization**» – печать моделей без оптимизации перемещений головы для убыстрения печати.

**Print island sequentially without optimization** – возможная последовательность послойной печати будет такой:

Модель № 1 → Модель № 2 → Модель № 3 → Модель № 4 →  
→ Модель № 4 → Модель № 1 и т.д.

**Обратите внимание!** У модели № 4 будет печататься два слоя подряд. Так слайсер минимизирует холостые перемещения печатающей головки, что убыстряет печать. Но это может быть плохо, когда вы печатаете небольшие детали, как на скриншоте, – модель будет перегреваться.

Тогда, при включении **Print island sequentially without optimization**, возможная последовательность послойной печати моделей будет такой:

Модель № 1 → Модель № 2 → Модель № 3 → Модель № 4 →  
→ Модель № 1 → Модель № 2 → Модель № 3 → Модель № 4 и т.д.

**Single outline corkscrew printing mode (vase mode)** – печать моделей в периметр (стенку), так называемый «режим вазы».

**First Layer Height** – высота печати слоя модели в процентах от основной высоты слоя.

**First Layer Width** – ширина экструзии печати слоя модели в процентах от основной ширины экструзии.

**First Layer Speed** – скорость печати слоя модели в процентах от основной скорости печати слоев модели.

Группа настроек **Start Points** (расположение стартовой точки) – данные настройки позволяют менять расположение стартовой (начальной) точки печати периметров на модели. С помощью этих настроек можно попытаться скрыть шов от начальных точек печати периметров или раскидать эти точки в случайном порядке на модели:

**Use random start points for all perimeters** – все точки начала периметров будут распределены по модели в случайном порядке.

**Optimize start points for fastest printing speed** – слайсер расставляет стартовые точки начала печати периметров для убыстрения процесса печати и минимизации холостых перемещений печатающей головки.

**Choose start point closest to specific location** – привязать стартовые точки начала печати периметров к вымышленной точке с координатами, указанными в полях «X» и «Y».

### 3.3 Закладка «Additions» (дополнения)

Настройки закладки «Additions» представлены на рисунке 7.

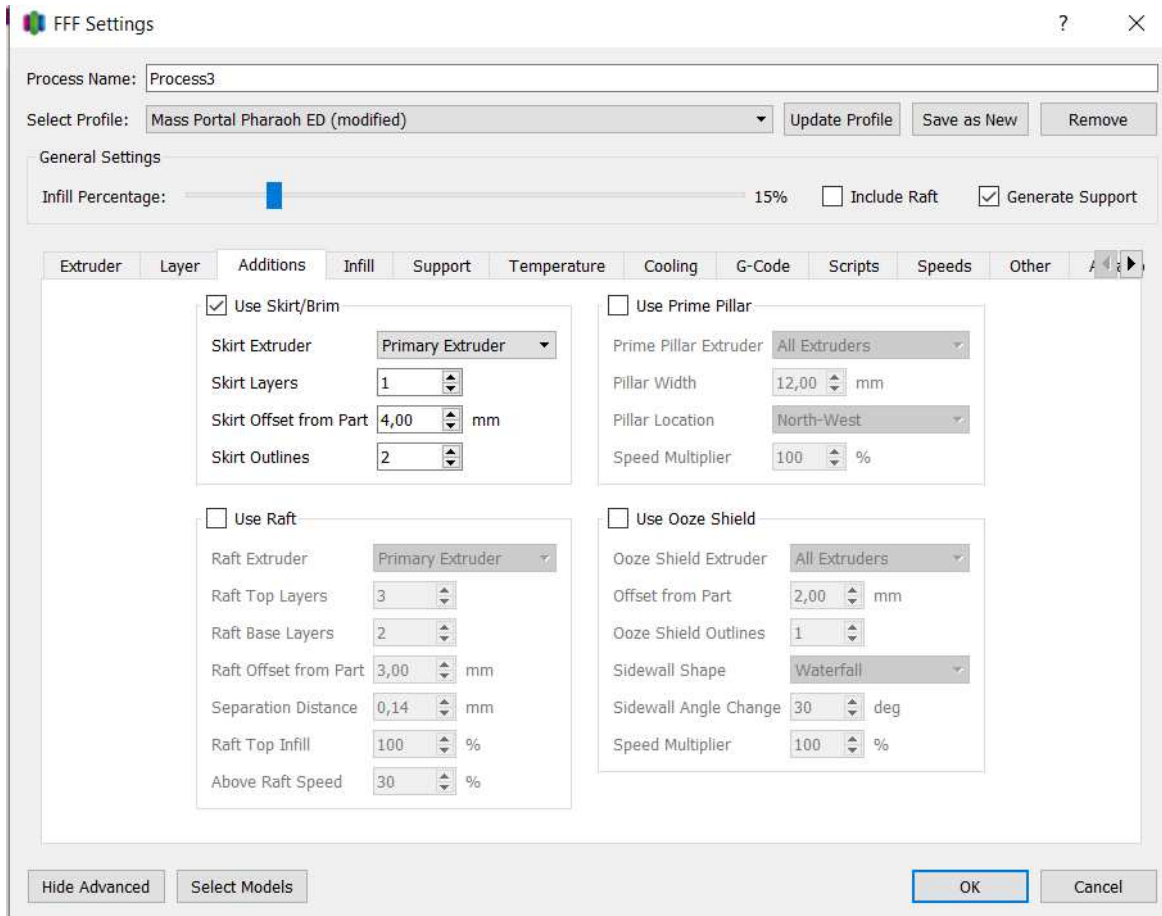


Рисунок 7. – Настройки закладки «Additions»

В данной закладке находятся настройки для скирта (юбки вокруг модели, для подготовки экструдера к печати самой модели), брима, рафта, настройки печати башни для прочистки сопла, а также настройки для создания «кокона» – тонкой стенки вокруг печатаемой модели, который может использоваться двумя способами:

- для предотвращения растрескивания и отлипания от стола 3D-принтера деталей из ABS-пластика путем создания вокруг модели импровизированной **термокамеры**;
- для снятия подсохившегося пластика с сопла, находящегося в простое, при печати на 3D-принтере с двумя экструдерами.

Группа настроек с галкой **Use Skirt/Brim** (использовать юбку/брим) – при включении значка вокруг печатаемой модели будет сделана юбка или брим в соответствии со следующими настройками:

**Skirt Extruder** – выбор экструдера для печати скирта/брима.

**Skirt Layers** – количество слоев юбки/брима в высоту (высота юбки/брима).

**Skirt Offset from Part**– расстояние от юбки до модели. Если поставить расстояние =0 мм, то вы получите брим, который помогает лучше удерживать модели из ABS-пластика на столе 3D-принтера.

**Skirt Outlines** – ширина юбки/брима в линиях.

Группа настроек со знаком **Use Raft** (использовать рафт) – при включении знака под печатаемой моделью будет создан рафт (основание из пластика) для лучшей адгезии печатаемой модели к столу 3D-принтера. Рафт обычно используют для пластиков с высокой усадкой, таких как ABS, нейлон и прочие, а также когда печатаются детали с маленькой площадью контакта со столом 3D-принтера. Рафт обычно состоит из двух частей: первая часть – основание рафта, которое печатается вначале на столе 3D-принтера, вторая – верхняя часть рафта, которая непосредственно примыкает к модели:

**Raft Extruder** – выбор экструдера для печати рафта.

**Raft Layers** – количество верхних слоев рафта в высоту (высота верхних слоев рафта).

**Raft Offset from Part**– насколько (расстояние) рафт будет выступать за пределы модели.

**Separation Distance** – расстояние от верхней поверхности рафта до нижней поверхности модели, т.е. это расстояние между рафтом и моделью. Данный параметр позволяет после печати легче отделить модель от рафта. Если поставить расстояние = 0, то модель спаяется с рафтом и ее будет сложно отделить; если поставить слишком большое – то модель может оторваться от рафта еще при процессе печати.

**Raft Infil** – плотность заполнения верхней части рафта, также влияет на последующее отделение модели.

**Disable raft base layers** – отключить печать основания рафта, будет напечатана только вторая часть рафта, которая непосредственно примыкает к модели.

Группа настроек с галкой **Use Prime Pillar** (использовать печать очистной башни для прочистки сопла) – при включении знака рядом с печатаемой моделью будет создаваться башня для прочистки сопла. Ниже приведено описание настроек печати очистной башни:

**Prime Pillar Extruder** – выбор экструдеров для печати очистной башни: либо всех, либо какой-то конкретно.

**Pillar Width** – ширина очистной башни.

**Pillar Location**– область расположение очистной башни.

**Speed Multiplier** – коэффициент скорости печати очистной башни в процентах от основной скорости печати.

Группа настроек с галкой **Use Ooze shield** (использовать «кокон» вокруг модели) – при включении знака рядом с печатаемой моделью будет создаваться «кокон», который как описано выше.

### 3.4 Закладка «Infill» (заполнение)

Настройки закладки «Infill» представлены на рисунке 8.

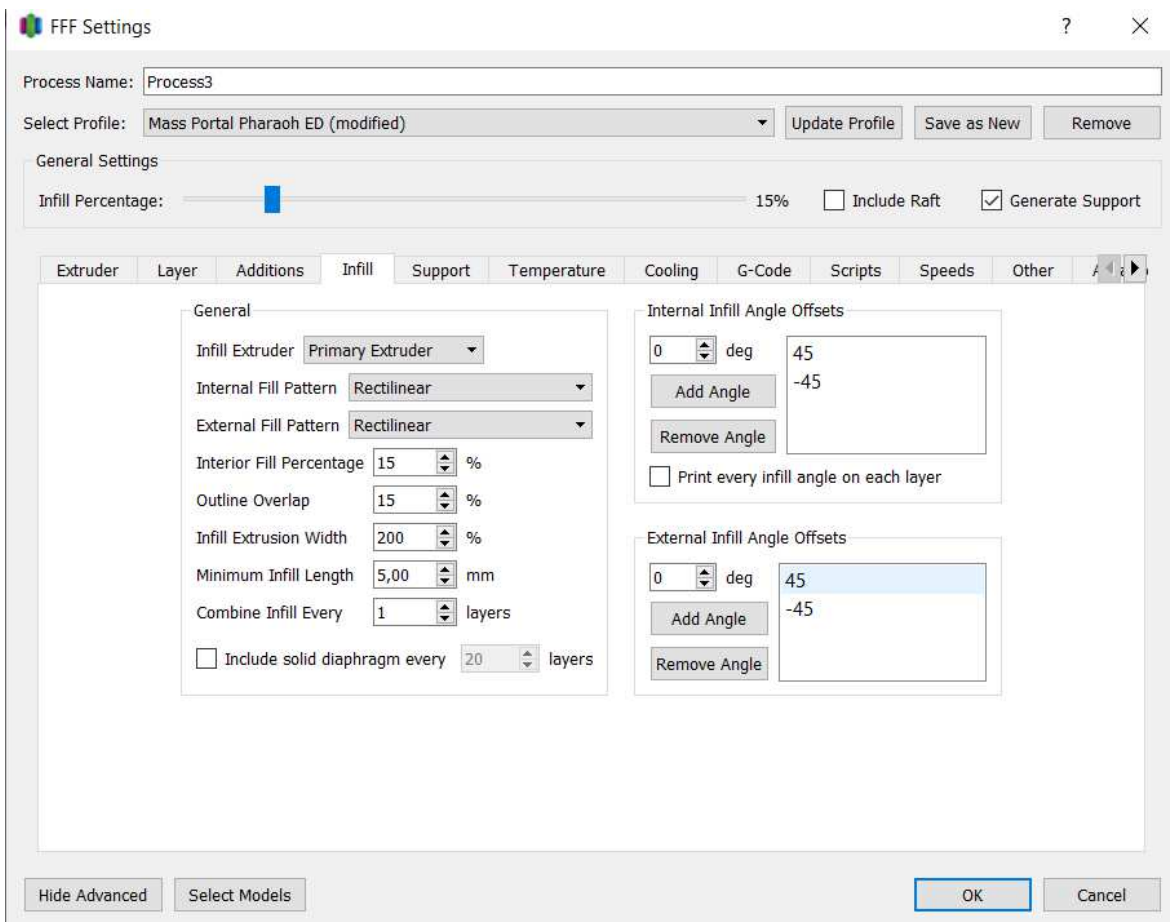


Рисунок 8. – Настройки закладки «Infill»

В данной закладке находятся настройки внутреннего заполнения модели, а также настройка (изменение формы).

Группа настроек **General** (общие):

**Infill Extruder** – выбор экструдера для печати заполнения.

**Internal Fill Pattern** – тип (форма) внутреннего заполнения модели, доступны 6 вариантов:

**Rectilinear** – линии;

**Grid** – сетка;

**Triangular** – треугольники;

**Wiggle** – волны;

**Fast Honeycomb** – быстрое сотовое заполнение;

**Full Honeycomb** – полное сотовое заполнение.

Скриншот, как выглядят эти типы внутреннего заполнения, представлен на рисунке 9. В основном используется тип заполнения **Rectilinear**:

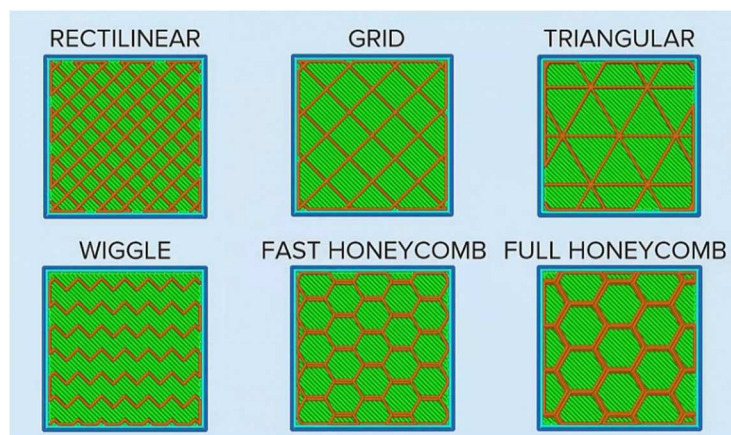


Рисунок 9. – Типы внутреннего заполнения

**External Fill Pattern** – тип (форма) сплошного заполнения дна и крышки модели. Доступны два варианта:

**Rectilinear** – линии;

**Concentric** – концентрические окружности.

**Interior Fill Percentage** – процент внутреннего заполнения моделей. Чем он выше, тем прочнее модель. В итоге будет получена модель, но с бóльшим расходом пластика.

**Outline Overlap** – данная настройка указывает, насколько заполнение заходит на боковые периметры (стенки) модели. Чем выше процент, тем больше заполнение заходит на периметры (обычно достаточно 15%).

**Infill Extrusion Width** – ширина экструзии внутреннего заполнения.

**Minimum Infill Length** – минимальная длина, при которой будет печататься внутреннее заполнение.

**Print Sparse Infill Every layers** – печать внутреннего заполнения через  $N$  количество слоев. Если в настройке указана 1, то печать внутреннего заполнения будет осуществляться на каждом слое.

**Include solid diagram every layers** – включить печать сплошного внутреннего заполнения через  $N$  количество слоев. Например, если в данной настройке поставить значение 10, то через каждые 9 слоев внутреннего заполнения, допустим, сотами уровнем 15%, будет напечатан один слой сплошного внутреннего заполнения. Данная настройка позволяет повысить прочность модели, не расходуя много пластика.

Группа настроек **Infill Angle Offsets** (угол заполнения) – в данной группе содержатся настройки углов печати линий внутреннего заполнения:

**Add Angle** – добавить угол печати линий внутреннего заполнения.

**Remove Angle** – удалить угол печати линий внутреннего заполнения.

**Print every infill angle on each layer** – печатать каждый угол, указанный в поле углов внутреннего заполнения на каждом слое. Обычно этот знак отключен.

### 3.5 Закладка «Support» (поддержки)

Настройки закладки «Support» представлены на рисунке 10.

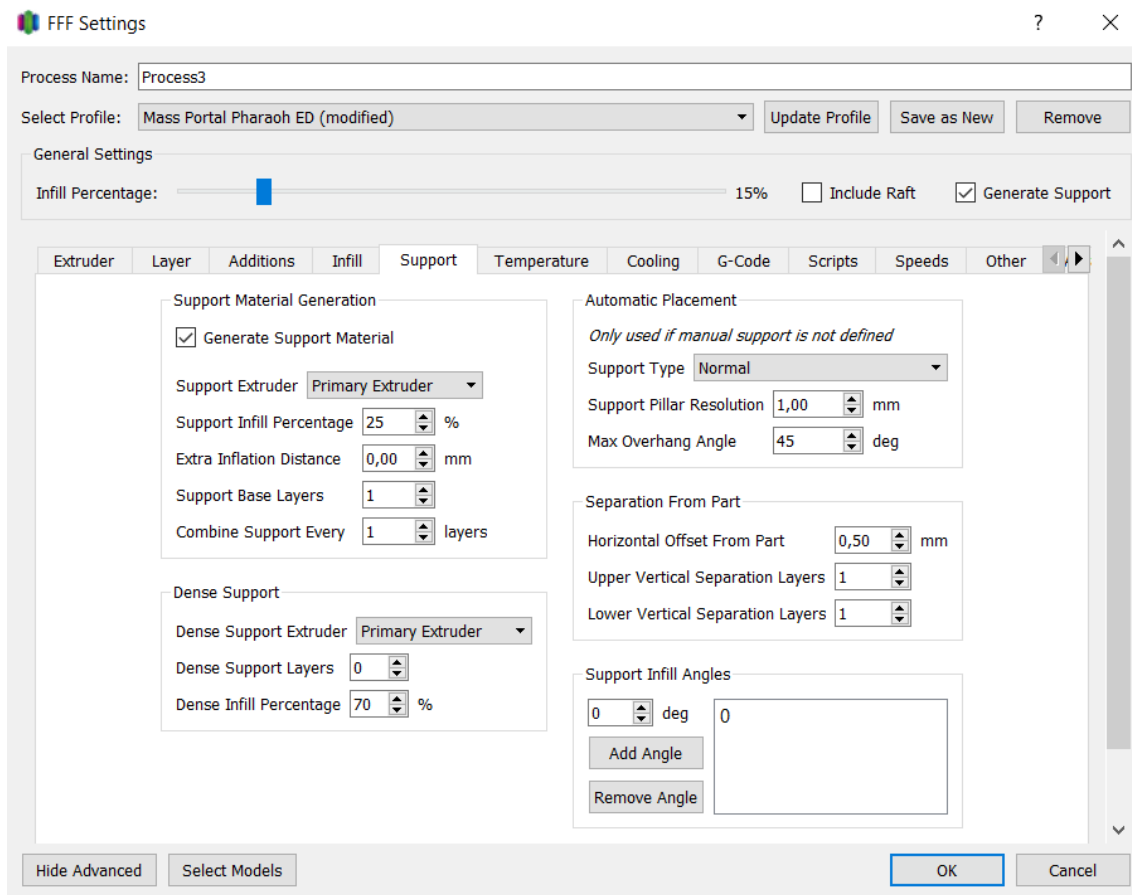


Рисунок 10. – Настройки закладки «Support»

В данной закладке находятся настройки поддержек, которые помогают напечатать нависающие элементы модели.

Группа настроек **Support Material Generation** (генерация материала поддержек):

**Generate Support Material** – включает/выключает генерацию поддержек.

**Support Extruder** – выбор экструдера для печати поддержек.

**Support Infill Percentage** – плотность основной части поддержек в процентах.

**Extra Inflation Distance** – параметр, указывающий, насколько поддержки выходят за пределы детали.

**Dense Support Layer** – параметр, указывающий, сколько слоев поддержек с увеличенной или уменьшенной плотностью будут строиться непосредственно под нависающими слоями модели.

**Dense Infill Percentage** – плотность слоя поддержек, которые будут строиться непосредственно под нависающими слоями модели.

**Print Support Every layers** – печать поддержек через  $N$  количество слоев. Если в настройке указана 1, то печать поддержек будет осуществляться на каждом слое. Если, например, в настройке указано 2, то поддержки будут печататься только каждый второй слой, т.е. через слой.

Группа настроек **Separation from Part** (расстояние между поддержками и моделью):

**Horizontal Offset From Part** – расстояние между вертикальными стенками модели и поддержками.

**Upper Vertical Separation Layers** – количество слоев между нависающей частью моделью и поддержками.

**Lower Vertical Separation Layers** – количество слоев между моделью и печатающимися сверху поддержками.

Группа настроек **Automatic Placement** (параметры автоматической расстановки поддержек):

**Support Type** – тип поддержек, доступны варианты:

**Normal** – поддержки будут построены под нависающими частями модели от стола и от частей модели;

**From Build Platform Only** – поддержки будут построены только от стола, поддержки от модели построены не будут.

**Support Pillar Resolution** – разрешение (резолуция) поддержек. Это минимальный размер столбика поддержки. Уточнение: – это минимальный размер выступа детали, для которого будет создана поддержка. Т.е. если

выступ детали будет менее 2 мм (как установлено на скриншоте), то слайсер не будет автоматически создавать поддержку под этим выступом.

**Max Overhang Angle** – максимальный угол свеса нависающей части модели, под которой будут построены поддержки.

Группа настроек **Support Infill Angles** (угол заполнения поддержек):

**Add Angle** – добавить угол печати заполнения поддержек.

**Remove Angle** – удалить выбранный угол печати заполнения поддержек.

### 3.6 Закладка «Temperature» (настройки температуры)

Настройки закладки «Temperature» представлены на рисунке 11.

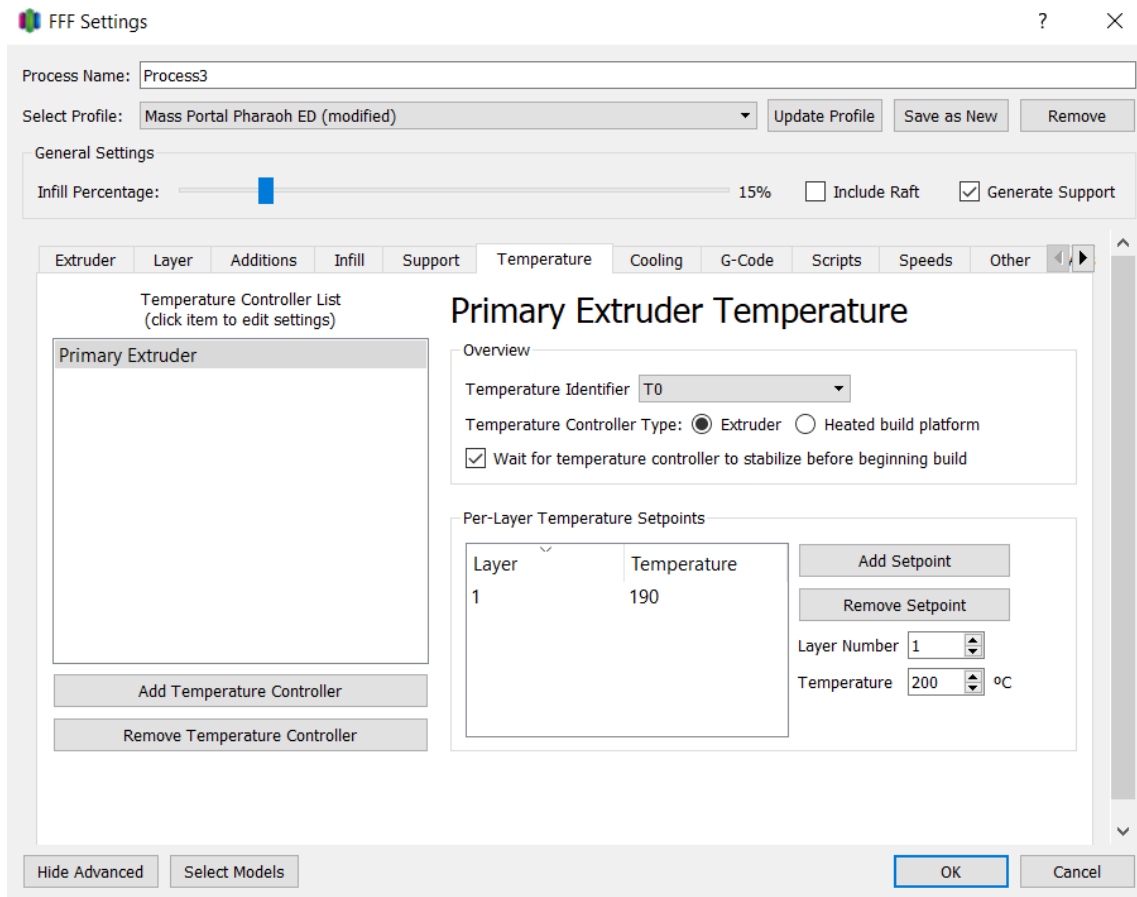


Рисунок 11. – Настройки закладки «Temperature»

В данной закладке находятся настройки температуры экструдера и нагревателя стола 3D-принтера.

**Temperature Controller List** – поле, в котором отображены доступные нагреватели, которым можно задать температуру нагрева (один экструдер и нагреватель стола 3D-принтера).

**Add Temperature Controller** – добавить нагреватель.

**Remove Temperature Controller** – удалить выбранный нагреватель.

Группа настроек **Overview**:

**Temperature Identifier** – идентификатор температуры.

**Temperature Controller Type** – выбор датчик температуры. Для экструдера следует выбрать **Extruder**, для нагревателя стола – **Heated build platform**.

**Relay Temperature Between Each** – передавать значения температуры после каждого слоя **Layer** или цикла **Loop**.

**Wait for temperature controller to stabilize before beginning build** – запускать начало печати только после стабилизации установленных температуры нагревателя.

Поле **PerLayer Temperature Setpoint** – поле, в котором указываются температуры нагревателя для слоев.

**Add Setpoint** – добавить температуру. Значение температуры и номер слоя вводятся в поля рядом ниже.

**Remove Setpoint** – удалить выбранное значение температуры.

### 3.7 Закладка «Cooling» (настройки охлаждения модели)

Настройки закладки «Cooling» представлены на рисунке 12.

В данной закладке находятся настройки вентилятора охлаждения модели при печати, а также настройки снижения скорости печати в зависимости от времени за которое печатается один слой модели.

Группа настроек **Overview**:

Поле **Per-Layer Fan Controls** – поле, где указываются номер слоя, с которого включается вентилятор на заданную скорость.

**Add Setpoint** – добавить номер слоя и значение скорости вентилятора обдува детали. Номер слоя и скорость вентилятора вводятся в поля рядом ниже.

**Remove Setpoint** – удалить выбранное значение скорости вентилятора обдува детали.

Группа настроек **Speed Overrides** (изменение скорости печати) – замедляет скорость печати небольших моделей:

**Adjust Printing speed for layers down** – разрешить слайсеру снижать скорость, если время печати одного слоя меньше, чем указано в поле рядом;

**Allow speed reduction down to** – уменьшить все скорости до значения, которое вводится в поле рядом, в процентах от установленных скоростей, если скорость печати одного слоя меньше, чем указано в предыдущей настройке.

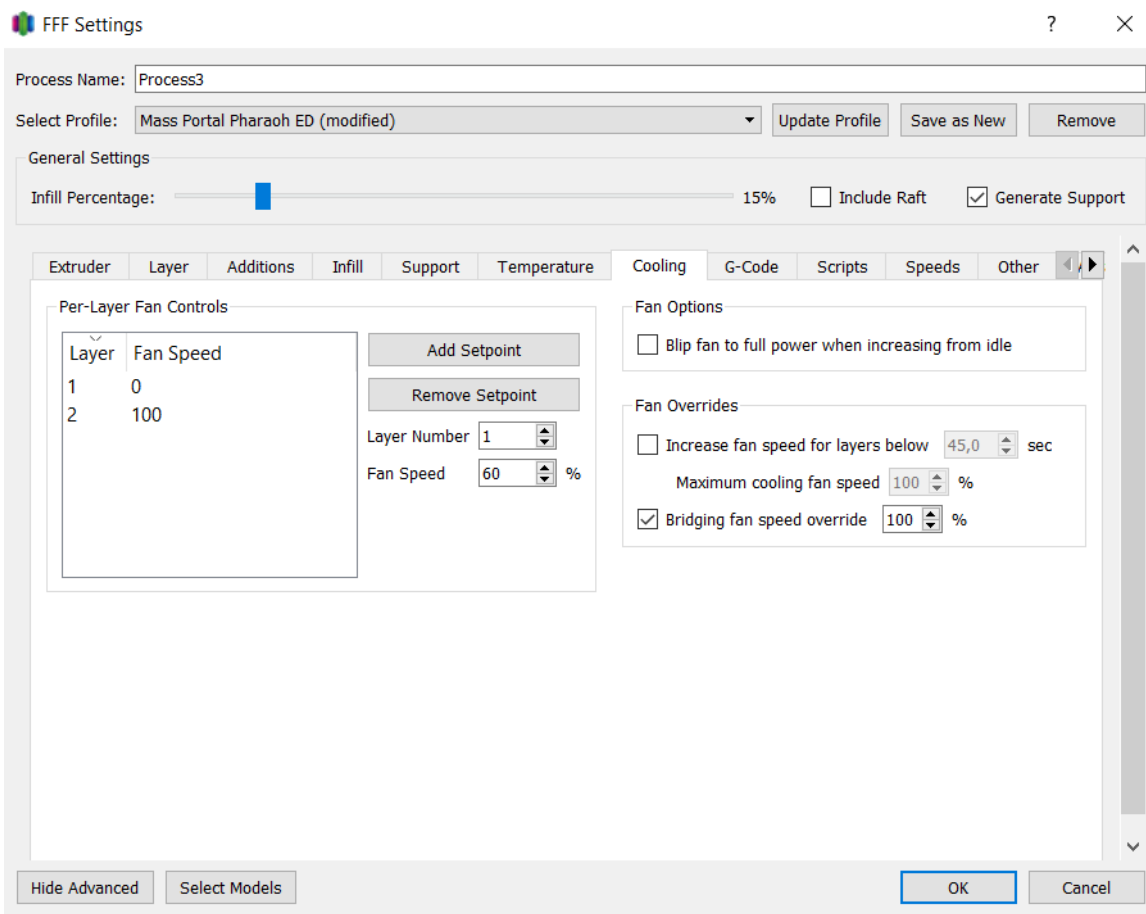


Рисунок 12. – Настройки закладки «Cooling»

Группа настроек **Fan Overrides** (изменение скорости вентилятора) – позволяет изменить скорость вентилятора на небольших моделях, если время печати одного слоя маленькое, что позволяет более эффективно охлаждать модель:

**Increase fan speed for layers bellow** – разрешить слайсеру увеличивать скорость вентилятора охлаждения модели, если время печати одного слоя меньше, чем указано в поле рядом;

**Maximum colling fan speed** – максимальная скорость вентилятора, которую может установить слайсер, если скорость печати одного слоя меньше, чем указано в предыдущей настройке;

**Bridging fan speed override** – скорость вентилятора охлаждения модели при печати мостов.

**Fan Options** (параметры вентилятора охлаждения модели):

**Blip fan to full power when increasing from idle** – включение вентилятор охлаждения модели сначала на полную мощность, затем переход на заданную мощность. Данная опция может быть полезна, если указана маленькая мощность вентилятора, но ее не хватает для старта вращения вентилятора.

### 3.8 Закладка «g-код» (изменения параметров генерации g-кодов)

Настройки закладки «g-код» представлены на рисунке 13.

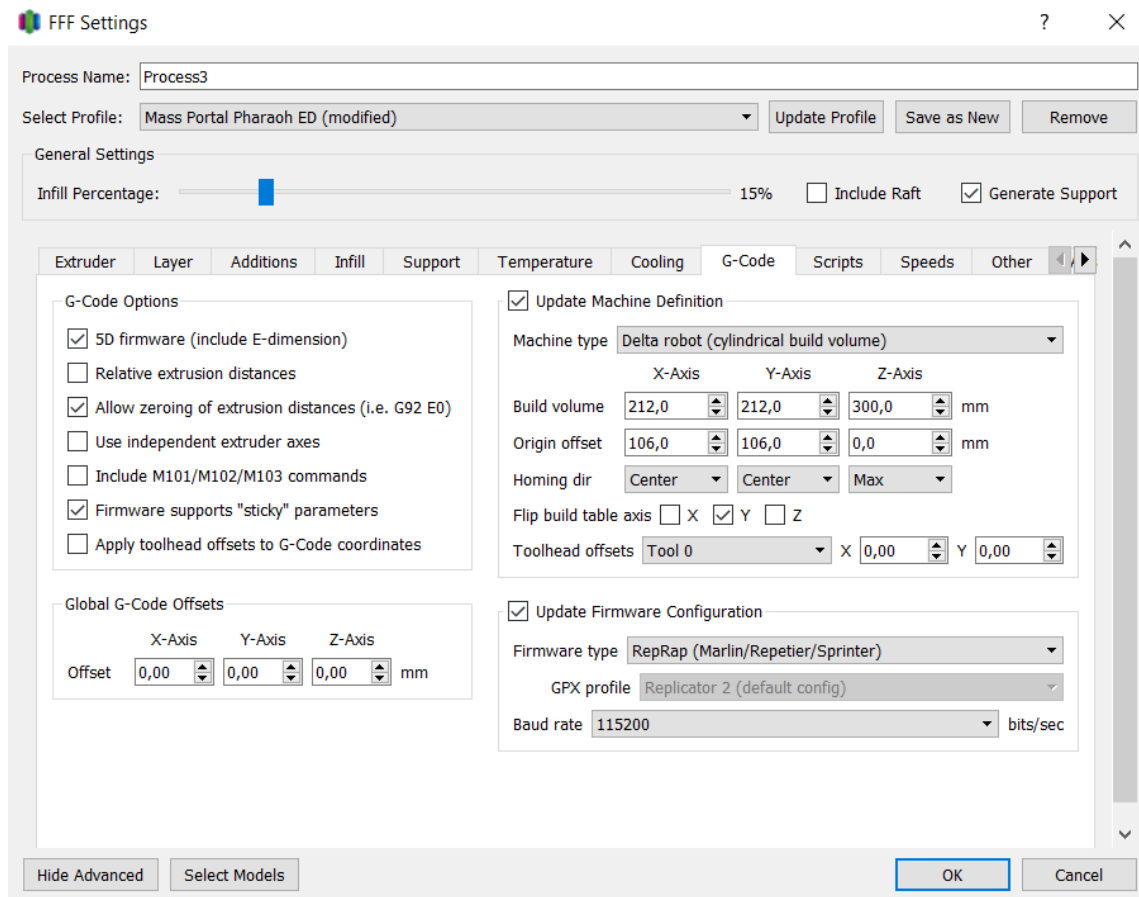


Рисунок 13. – Настройки закладки «g-код»

В данной закладке содержатся команды для изменения параметров генерации слайсером g-кода, установка смещений, изменений типа 3D-принтера, размера области печати, изменения информации для слайсера о типе прошивки принтера.

**Update Machine Definition** (обновить данные о 3D-принтере (тип принтера, размер области печати и др.).)

### 3.9 Закладка «Scripts» (скрипты)

Настройки закладки «Scripts» представлены на рисунке 14.

В данной закладке содержатся несколько подзакладок, в которых можно написать скрипты (наборы команд), которые слайсер вставит в g-код, а 3D-принтер выполнит их во время печати:

**Starting Script** – скрипт (набор команд), которые 3D-принтер выполнит перед началом печати.

**Layer Change Script** – скрипт (набор команд), которые 3D-принтер выполнит при переходе на следующий слой.

**Retraction Script** – скрипт (набор команд), которые 3D-принтер выполнит при ретракте.

**Tool Change Script** – скрипт (набор команд), которые 2-экструдерный 3D-принтер выполнит при смене экструдера во время печати.

**Ending Script** – скрипт (набор команд), которые 3D-принтер выполнит при окончании печати.

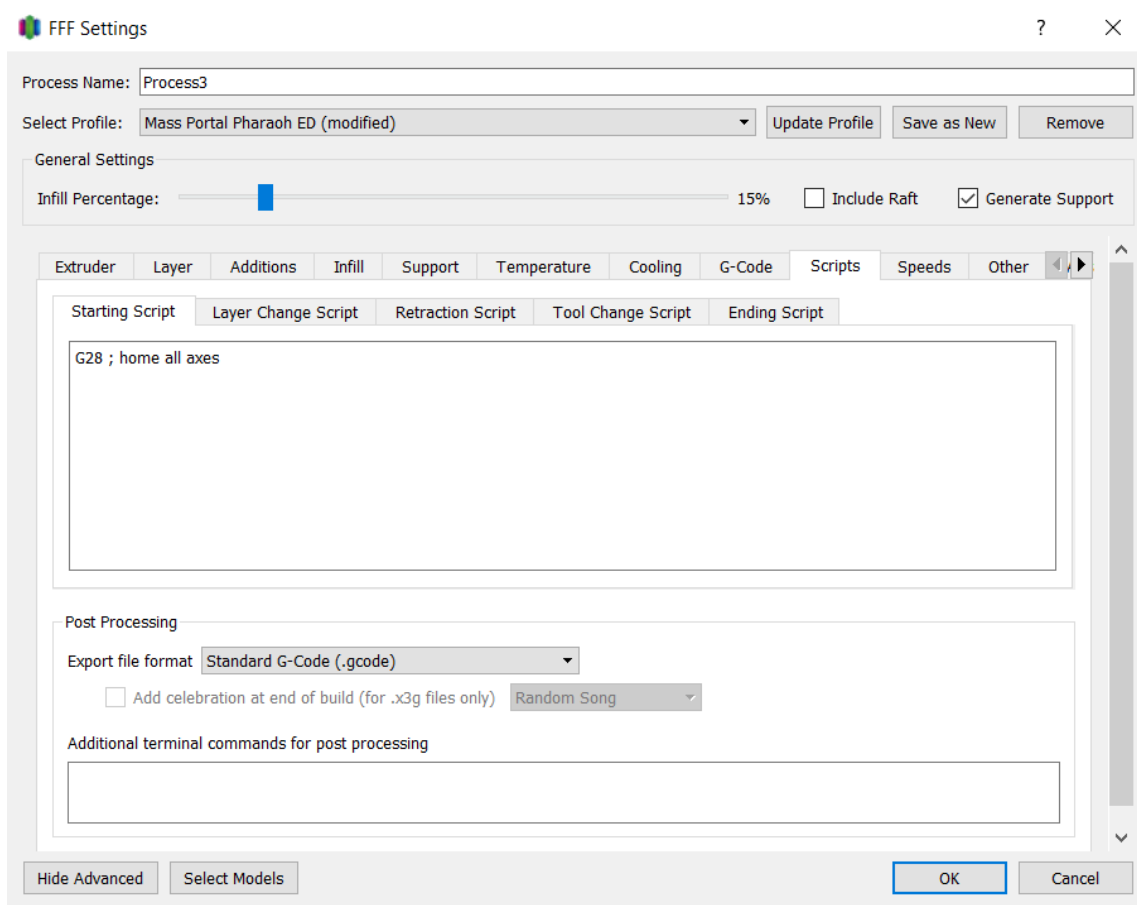


Рисунок 14. – Настройки закладки «Scripts»

Группа настроек **Post Processing**:

**Export file format** – выбор формата файла, в котором слайсер будет подготавливать модель к печати на 3D-принтере.

**Add celebration at end of build (for .x3g files only)** – включить/отключить проигрывание выбранной мелодии. Имеется только на 3D-принтерах, использующих для печати файлы формата .x3g

Поле **Additional terminal commands for post processing** – в данном поле вводятся команды постпроцессинга.

### 3.10 Закладка «Other» (другие настройки)

Настройки закладки «Other» представлены на рисунке 15.

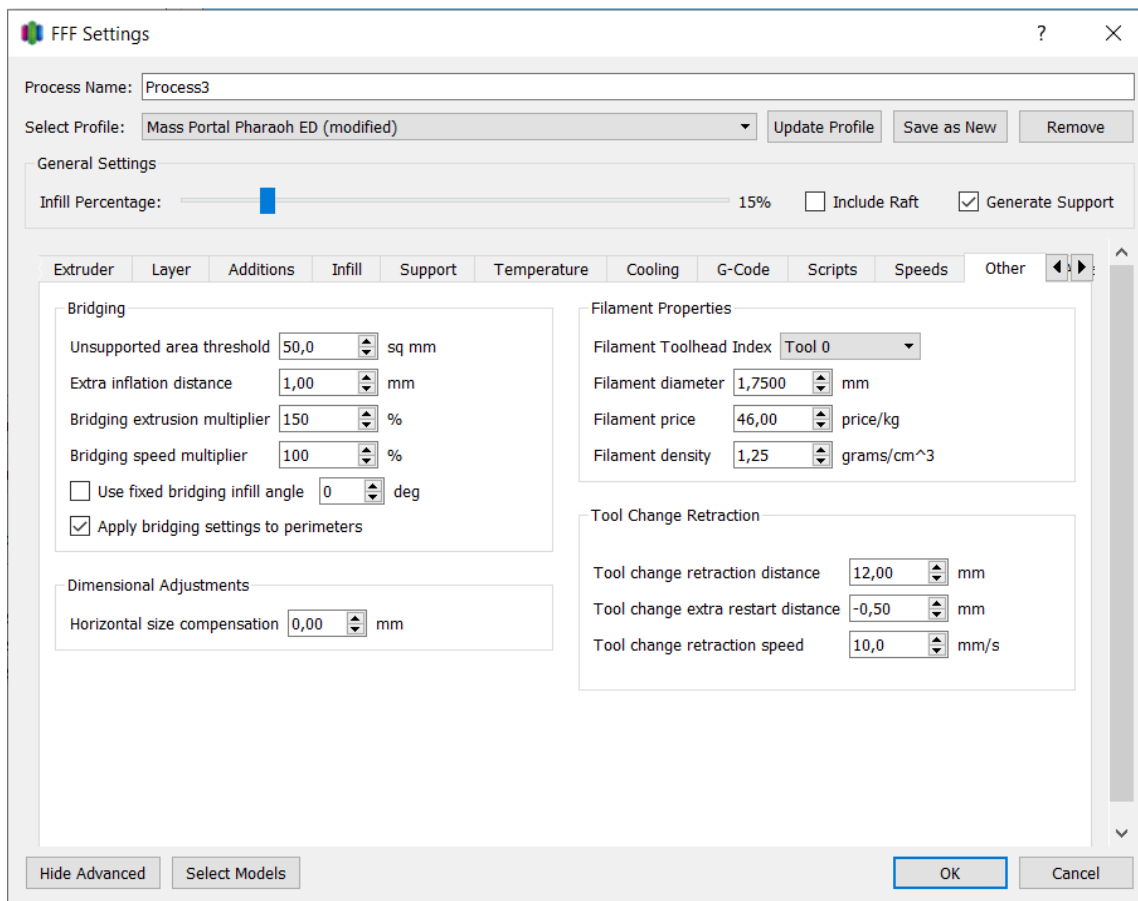


Рисунок 15. – Настройки закладки «Other»

В данной закладке содержатся настройки скоростей печати, компенсация размеров модели из-за усадки, указывается диаметр филамента (прутка пластика). Кроме того, здесь находятся настройки печати мостов.

Группа настроек **Speeds** (скорости):

**Default Printing Speed** – скорость печати по умолчанию.

**Outline Underspeed** – скорость печати внешнего периметра в процентах от скорости по умолчанию. Более низкая скорость печати внешнего периметра позволяет улучшить качество и внешний вид модели.

**Solid Infill Underspeed** – скорость печати сплошного заполнения верха и низа модели в процентах от скорости по умолчанию.

**Support Structure Underspeed** – скорость печати поддержек в процентах от скорости по умолчанию.

**X/Y Axis Movement Speed** – скорость холостого перемещения каретки принтера с соплом по осям *X* и *Y*.

**Z Axis Movement Speed** – скорость подъема каретки принтера или опускания стола по оси *Z* в зависимости от кинематики 3D-принтера.

Группа настроек **Dimensions Adjustments** (компенсация размеров):

**Horizontal Size Compensation** – данная настройка позволяет компенсировать отклонения размеров по осям *X/Y* полученной распечатанной модели от исходной, в случае, например, усадки пластика.

Группа настроек **Fillament Properties** (параметры филамента) – здесь устанавливаются диаметр прутка пластика, стоимость пластика и его плотность.

**Fillament Diameter** – диаметр прутка пластика, очень важный параметр, влияющий на печать всей модели.

**Fillament price** – стоимость килограмма пластика.

**Fillament density** – плотность пластика; параметр не влияет на саму печать.

Группа настроек **Bridging** (мосты) – здесь устанавливаются параметры, с которыми 3D-принтер печатает мосты. Мосты в 3D-печати – это печатающиеся в воздухе нити пластика, которыми 3 D -принтер соединяет две области:

**Unsupported area threshold** – минимальная площадь нависающей части модели без поддержек, которая будет определяться слайсером как мост.

**Extra inflation distance** – параметр, указывающий, насколько нити моста заходят на площадки, с которых он строится.

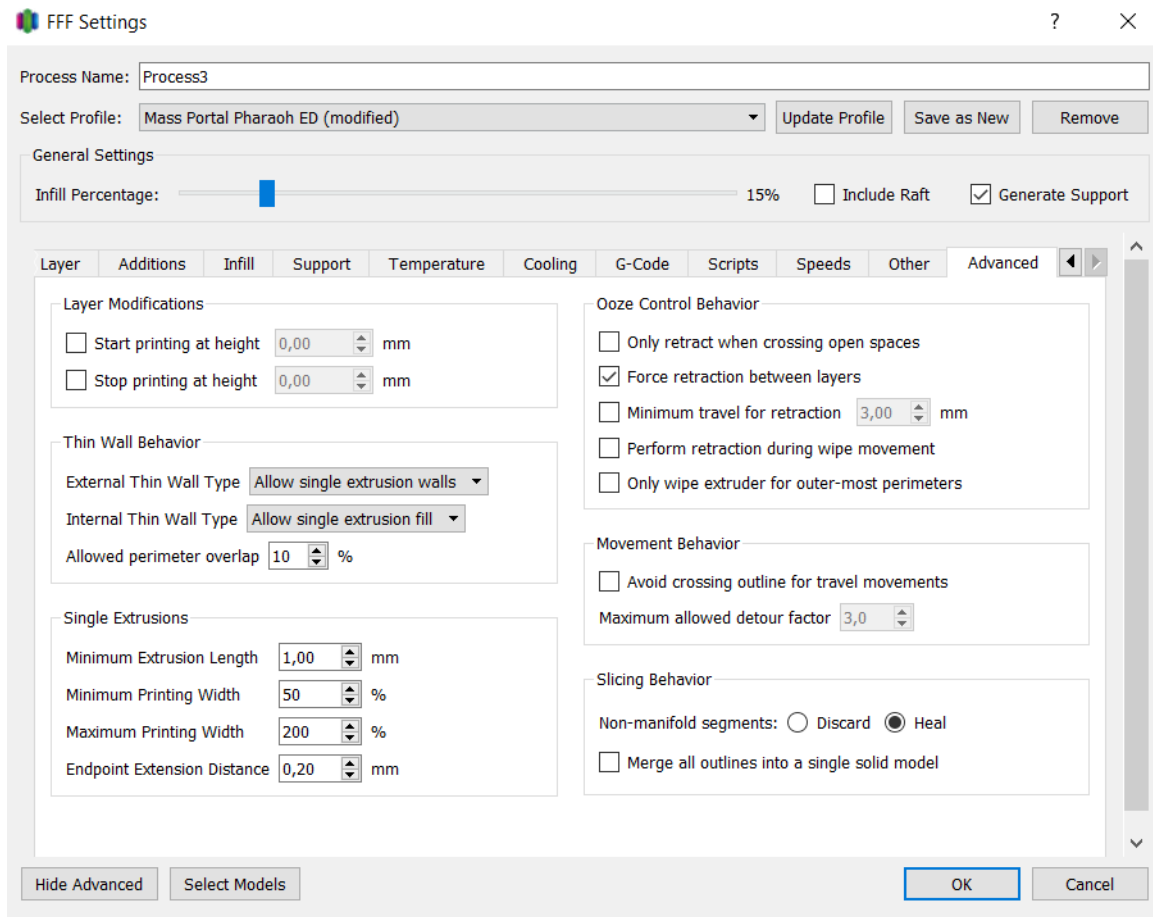
**Bridging extrusion multiplier** – коэффициент экструзии печати мостов в процентах от общей экструзии.

**Bridging speed multiplier** – скорость печати мостов в процентах от скорости по умолчанию.

### 3.11 Закладка «Advanced» (расширенные настройки)

Настройки закладки «Advanced» представлены на рисунке 16.

В данной закладке содержатся настройки высоты начала и окончания процесса, настройки поведения слайсера при обработке моделей, содержащих ошибки, настройки печати тонких стенок, дополнительные настройки ретракта.



**Рисунок 16. – Настройки закладки «Advanced»**

Группа настроек **Layer modifications** – здесь устанавливаются высота начала и высота окончания данного процесса печати.

**Start printing at height** – при включении этого значка данный процесс печати начнется с высоты модели, которая указывается в поле рядом.

**Stop printing at height** – при включении этого значка данный процесс печати остановится на высоте модели, которая указывается в поле рядом.

Группа настроек **Slicing Behavior** – здесь находятся настройки, которые указывают слайсеру, как подготавливать *g-код* моделей, которые содержат ошибки.

**Non-manifold segment** – в случае если слайсер находит ошибку в модели, то если включен знак **Discard**, он пропустит эту ошибку, если знак **Heal** – слайсер попытается ее исправить. Рекомендуется держать включенной **Heal**.

**Merge all outlines into a single solid model** – при включенном знаке, если в модели имеются ошибки в виде «дыр», слайсер попытается преобразовать всю внешнюю поверхность модели в одну целую поверхность.

Настройка очень специфическая, может как помочь, так и навредить. Следует следить за тем, что отображается в окне предпросмотра. Если в модели есть нужные отверстия, то скорее всего слайсер их заделает, если данная настройка включена.

Группа настроек **Thin Wall Behavior** – в данной группе настроек указывается слайсеру, как обрабатывать тонкие стенки.

**Only use perimeters for thin walls** – при включении этого знака слайсер будет подготавливать *g-код* так, что тонкие стенки будут печататься только с помощью периметров.

**Allow gap fill when necessary** – при включении этой галки слайсер будет пытаться заполнить промежутки в тонких стенках с помощью заполнения, если это возможно.

**Allowed perimeter overlap** – допустимое перекрытие периметрами в процентах при печати тонких стенок с заполнением.

Группа настроек **Ooze Control Behavior** – в данной группе настроек указывается расширенные (дополнительные) настройки ретракта.

**Only retract when crossing open spaces** – при включении значка ретракт будет делаться только тогда, когда сопло пересекает свободное пространство между моделями или частями модели. Внутри модели ретракт выполняться не будет.

**Forge retraction between layers** – при включении этого значка при переходе на следующий слой будет осуществляться ретракт.

**Minimum travel for retraction** – включает зависимость осуществления ретракта от минимального расстояния, которое должно пройти сопло в режиме холостого хода. Рядом вводится значение минимального расстояния холостого хода сопла. Если длина холостого хода сопла меньше этого значения, то ретракт осуществляться не будет. Рекомендуется включать эту настройку на гибких пластиках, если на модели имеются тонкие области, где может осуществляться частый ретракт.

**Perform retraction during wipe movement** – при включении этого значка слайсер делает ретракт при разглаживании места ретракта. Связанная функция – **Wipe nozzle** с вкладки **Extruder**.

**Only wipe extruder for outer-most perimeters** – при включении этой галки слайсер будет разглаживать место ретракта только для внешнего периметра. Связанная функция – **Wipe nozzle** с вкладки **Extruder**.

Группа настроек **Movement Behavior** – в данной группе настроек указывается слайсеру, что необходимо оптимизировать холостые перемещения

сопла так, чтобы минимизировать пересечения соплом при этих перемещениях внешних периметров.

**Avoid crossing outline for travel movements** – включить/отключить минимизацию пересечений соплом внешних периметров при холостых перемещениях сопла.

**Maximum allowed detour factor** – параметр, показывающий слайсеру, сколько раз он может отклониться от первоначального прямого пути, например, значение 3,0 – показывает что отклониться можно 3 раза.

Группа настроек **Tool Chance Retraction** – в данной группе настроек указывается ретракт при смене экструдеров для 3D-принтеров с двумя экструдерами.

**Tool chance retraction distance** – длина ретракта при смене экструдеров.

**Tool change extra restart distance** – количество подаваемого пластика обратно в экструдер после ретракта при смене экструдеров. Положительное значение увеличивает количество подаваемого пластика, отрицательное – уменьшает.

**Tool change retraction speed** – скорость ретракта при смене экструдеров.

Рекомендации по настройкам температурных режимов приведены в таблице 11.

Таблица 11. – Температурный режим работы с пластиками

Материал	T, °C (сопла)	T, °C (стола)	Примечание
ABS	245	90-105	+
ABS-GF	250	95	+
PLA	210-225	60	+
SBS	235	70	+
TPU-GF (стеклонаполненный)	250	60	+
TPU-CF (угленаполненный)	240	60	
PC (поликарбонат)	300(285)	110(90–120)	+
PA (полиамид)	265 (260)	70	+
PA-GF	265	70	+
PETG	235	70	
TPU Flex	235	60	-
PVB Polysmooth	210	60	+
SAN (ceramo)	240	100	

### Сушка материала

Отпечатанные изделия рекомендуется сушить 4–6 ч при температуре, близкой к температуре стеклования, т.е. 60–70 °C.

**Внимание!!!** PVB Polysmooth сушится долго, около 12 ч, но при **НИЗКОЙ** температуре, не выше 55 °С. Если выше – есть риск превратить катушку в кашу.

#### **Рекомендации**

*PVB, TPU (gf, cf) хранить в закрытом пакете обязательно, иначе увеличится время сушки.*

## **4 Технология FDM**

FDM (Fused Deposition Modeling) – моделирование методом послойного нанесения/наплавления [1].

Технология печати методом послойного наплавления была разработана С. Скоттом Трампом в конце 1980-х гг. и представлена на рынке компанией STRATASYS, начиная с 1990 г. На данный момент технология получила все более востребована для быстрого прототипирования, создающих принтеры с открытым исходным кодом, а также коммерческих компаний ввиду истечения срока действия оригинального патента. В свою очередь широкое распространение технологии привело к существенному снижению цен на 3D-принтеры, использующие данный метод производства.

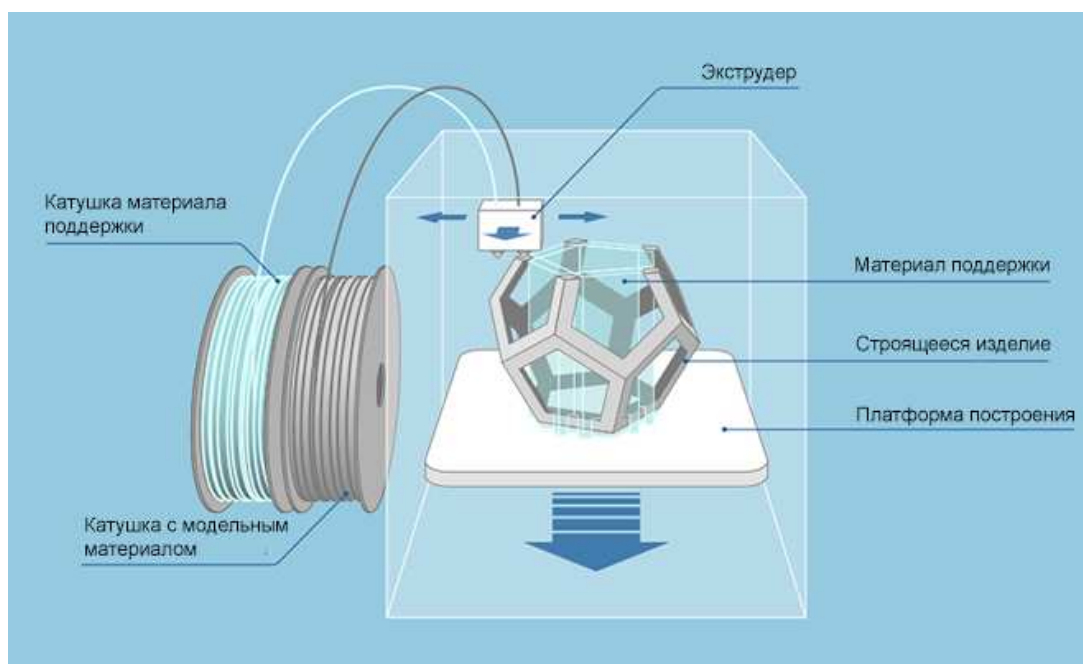
#### **Принцип построения изделия по технологии FDM**

3D-модель в формате STL передается в программное обеспечение 3D-принтера. В ручном режиме или с помощью программного обеспечения модель располагается в виртуальной рабочей зоне, затем генерируются элементы вспомогательных конструкций (из специального материала поддержки) и проводится расчет количества расходных материалов, а также времени выращивания прототипа. Перед запуском процесса печати модель автоматически разделяется на горизонтальные слои и производится расчет путей перемещения печатающей головки.

Затем запускается процесс непосредственной 3D-печати: нагревающая головка с фильерами (экструдер) расплавляет тонкую пластиковую нить (леску) и послойно укладывает ее согласно данным математической 3D-модели (рисунок 17).

После завершения процесса построения изделия вспомогательные конструкции удаляются (вручную или растворяются в специальном растворе). Готовое изделие может быть использовано в напечатанном виде или подвергнуто любому способу постобработки.

Данной технологией печатаются крупные изделия, которые должны обладать надежными механическими свойствами (прочность, износостойкость, гибкость).

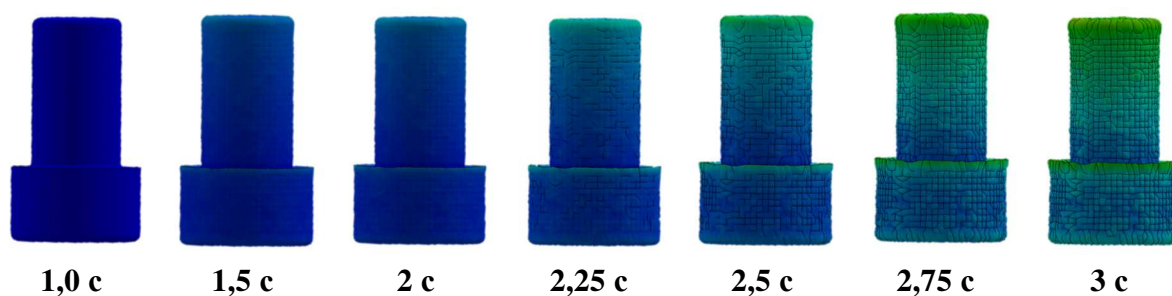


**Рисунок 17. – Процесс печати технологий FDM**

**Преимущества:** прочные износостойкие изделия, низкая стоимость материалов, широкие возможности постобработки.

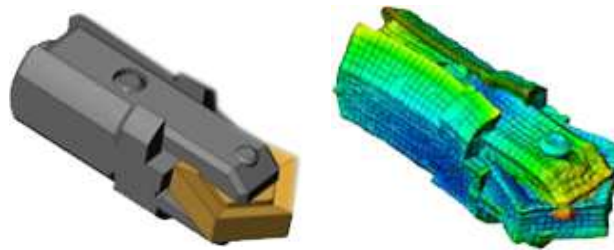
### **5 Тепловое воздействие на изделие при 3D-печати**

**Модель теплового воздействия.** Целью моделирования процесса нагрева макета блочно-модульного режущего инструмента являлась качественная оценка тепловых деформаций основных конструктивных элементов (в пределах текучести пластика) и выработка рекомендаций по корректировке (совершенствованию) рабочих чертежей. Время температурного воздействия на винт занимает 3 с. Наглядное представление об изменениях винта в процессе нагрева представлено на рисунке 18 [7].



**Рисунок 18. – Схема представления изменений винта в процесс нагрева**

Изменения внешнего вида блока резцового в процессе нагрева наглядно представлены на рисунке 19.



**Рисунок 19. – Схема изменений в процессе нагрева блока резцового**

Время температурного воздействия на блок резцовый и фрезы занимает 5 с. Наглядное изменение их вида в процессе нагрева представлены на рисунках 19 и 20.

**В результате моделирования тепловых деформаций можно отметить следующее:**

1. При нагреве крепежного винта он удлиняется, что необходимо учитывать при проектировании резьбового соединения.

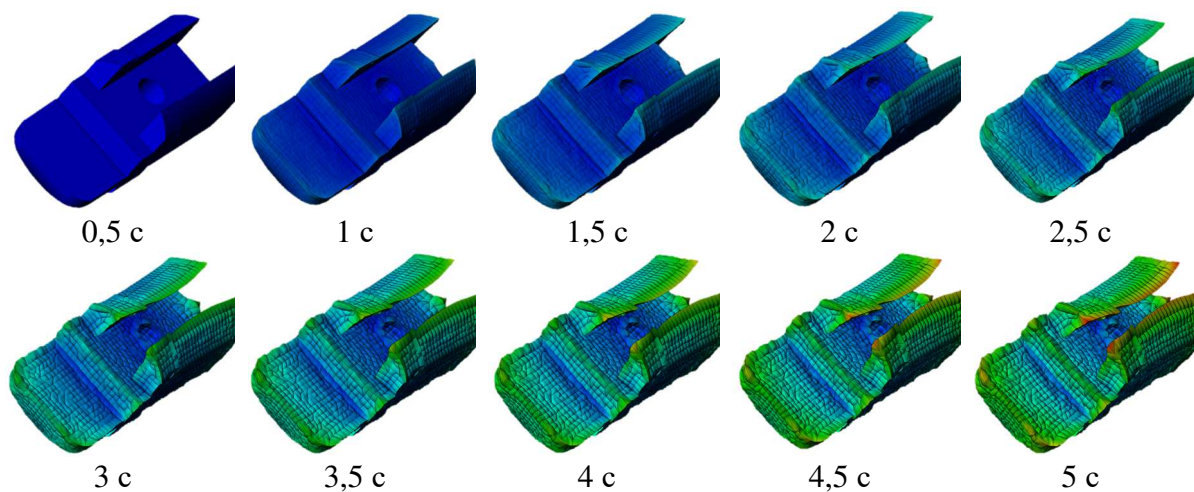
2. Режущая пластина увеличивается в диаметральном размере, что необходимо учитывать при определении размера паза для ее размещения;

3. Корпус блока резцового увеличивается в размерах. Наибольшей тепловой деформации подвергаются боковые стенки продольного паза для размещения прихвата, что необходимо учитывать при назначении допусков на ширину паза и прихвата.

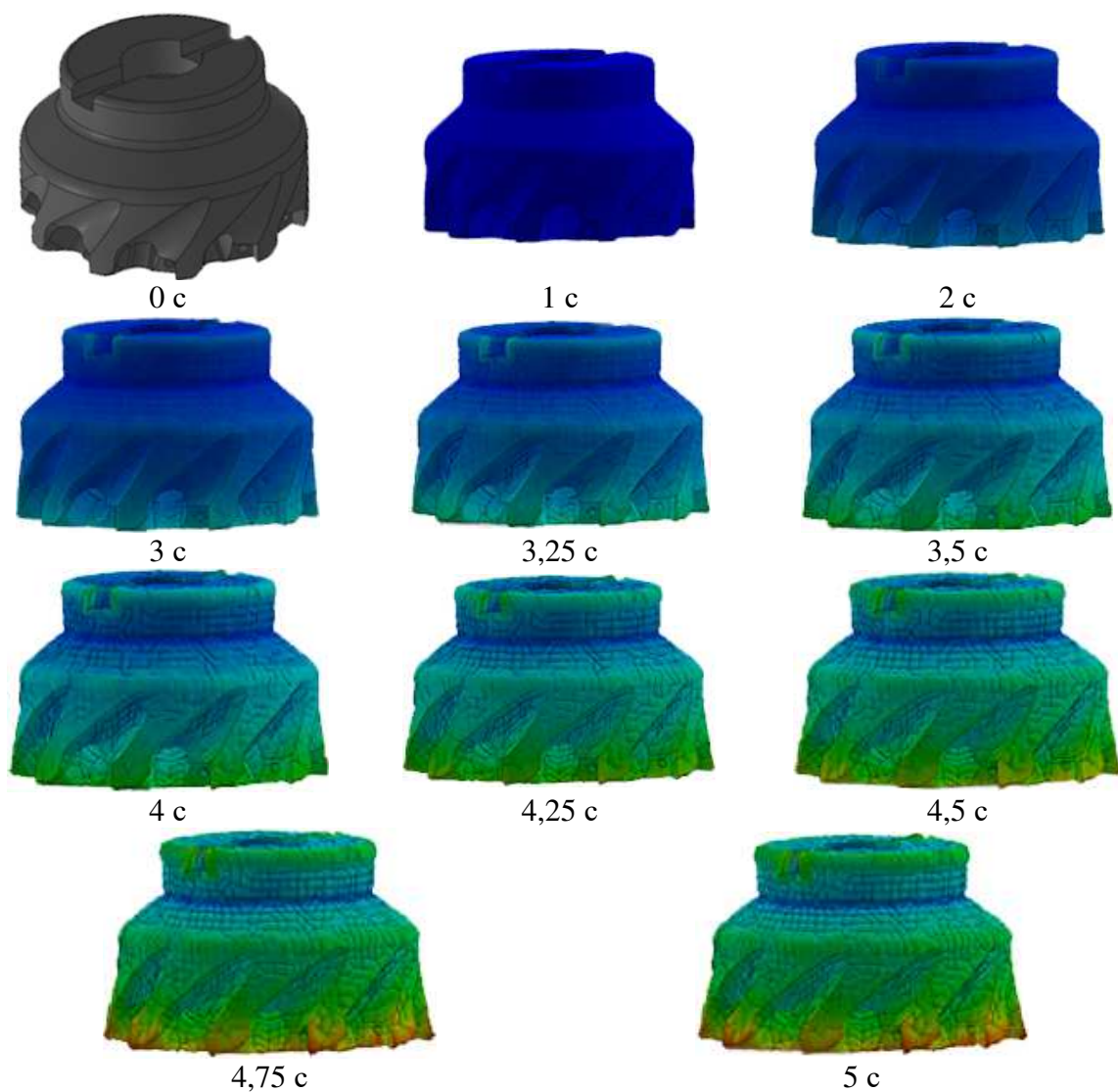
4. Тепловые деформации отдельных конструктивных элементов блока резцового сказываются на общей деформации блока резцового в сборе: режущая пластина «врастает» в корпус и прихват, размеры прихвата изменяются по высоте, ширине и длине, деформируется форма отверстия под штифт, увеличиваются диаметр штифта и диаметр винта зажимного. Эти тепловые деформации должны быть учтены при размерном анализе сборки резцового блока.

5. Качественные изменения тепловых деформаций торцевой фрезы свидетельствуют о максимальных их значениях в режущей пластине и блоке резцовом, однако ими нельзя пренебрегать и при проектировании корпуса фрезы, особенно в части торцевой шпонки, с помощью которой фреза закрепляется в хвостовике.

При моделировании установлено, что при температуре свыше 120° габаритные размеры пластины режущей увеличиваются на 6%, изменение других конструктивных элементов торцевых фрез при тепловом воздействии составляет порядка 10–15%.



**Рисунок 19. – Наглядное представление изменений в процессе нагрева корпуса блока резцового**



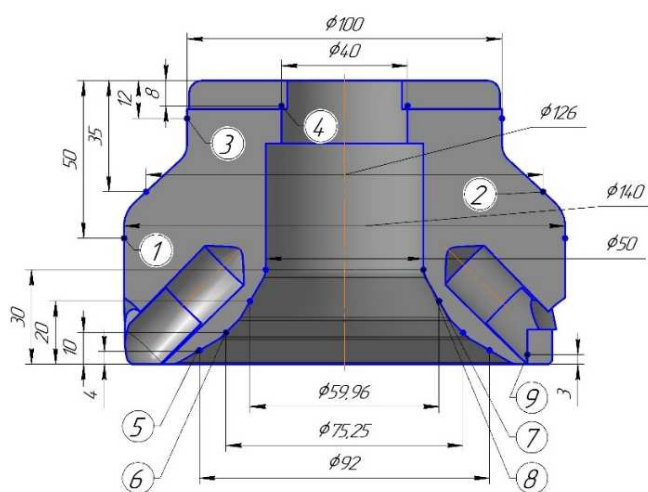
**Рисунок 20. – Схема наглядного представления изменений в процесс нагрева корпуса фрезы**

## 6 Анализ точности изготовления изделий: размерный анализ

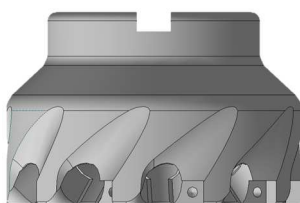
При изготовлении деталей с использованием 3D-технологий возникают вопросы, связанные с соответствием получаемых размеров и шероховатости поверхностей заданным на чертеже. Естественно предположить, что точность и шероховатость поверхностей деталей будут зависеть от особенностей трехмерной технологии и свойств используемых материалов [7].

Экспериментальные образцы блочно-модульных режущих инструментов были получены из пластика ABSplus-P430 на 3D-принтере Stratasys Mojo и из PLA-пластика Wanhao на 3D-принтере Mass Portal Pharaoh XD 30.

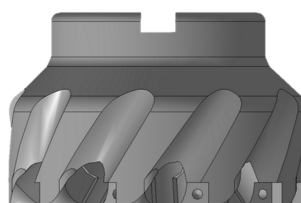
На рисунке 21 представлены эскиз и макеты полученных БМРИ.



Общий эскиз измерения линейных размеров



Модель 1



Модель 2



Макет 1 из пластика ABSplus-P430



Макет 2 из PLA-пластика

Рисунок 21. – Эскиз и макеты БМРИ

Измерение линейных размеров производилось на видеоизмерительном микроскопе (рисунок 22) с периодичностью 10 точек с вычислением среднего значения размера.

Технические характеристики видеоизмерительного микроскопа представлены в таблице 12.



**Рисунок 22. – Измерение линейных размеров**

**Таблица 12. – Технические характеристики видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORGAV**

	Диапазон перемещения по осям X и Y	400 мм x 300 мм
	Диапазон перемещения по оси Z	150 мм
	Погрешность E(x, y), мкм	$\leq (3+L/200)$
	Разрешение	0,001мм
	Тип датчика	цветная камера ПЗС 1/2"
	Увеличение: оптическая система	0,7–4,5 x; WD 92мм
	Цифровое увеличение	20–128 x
	Поле зрения	7–1,1 мм
	Питание	220V (AC), 50HZ, 30W
	Размер предметного стола	606 x 466 мм
	Габариты стекла предметного стола	450 мм x 350 мм
	Нагрузка	30 кг
	Габариты Д x Ш x В	720 x 950 x 1020 мм

На видеоизмерительном микроскопе измерялись не только линейные размеры конструктивных элементов (рисунок 23), но и изучалась структура наружной поверхности (рисунок 24).

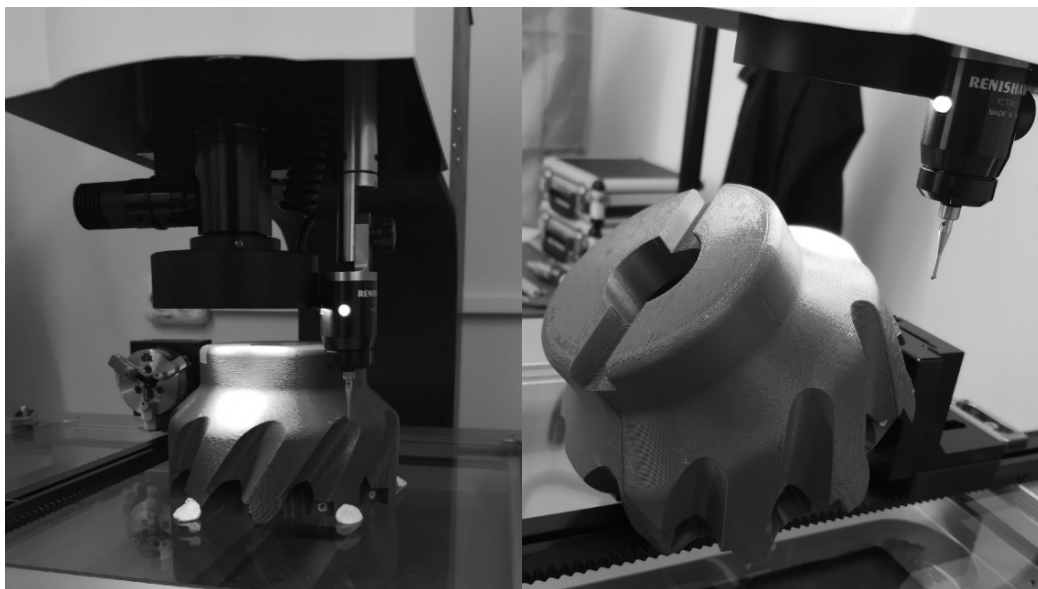
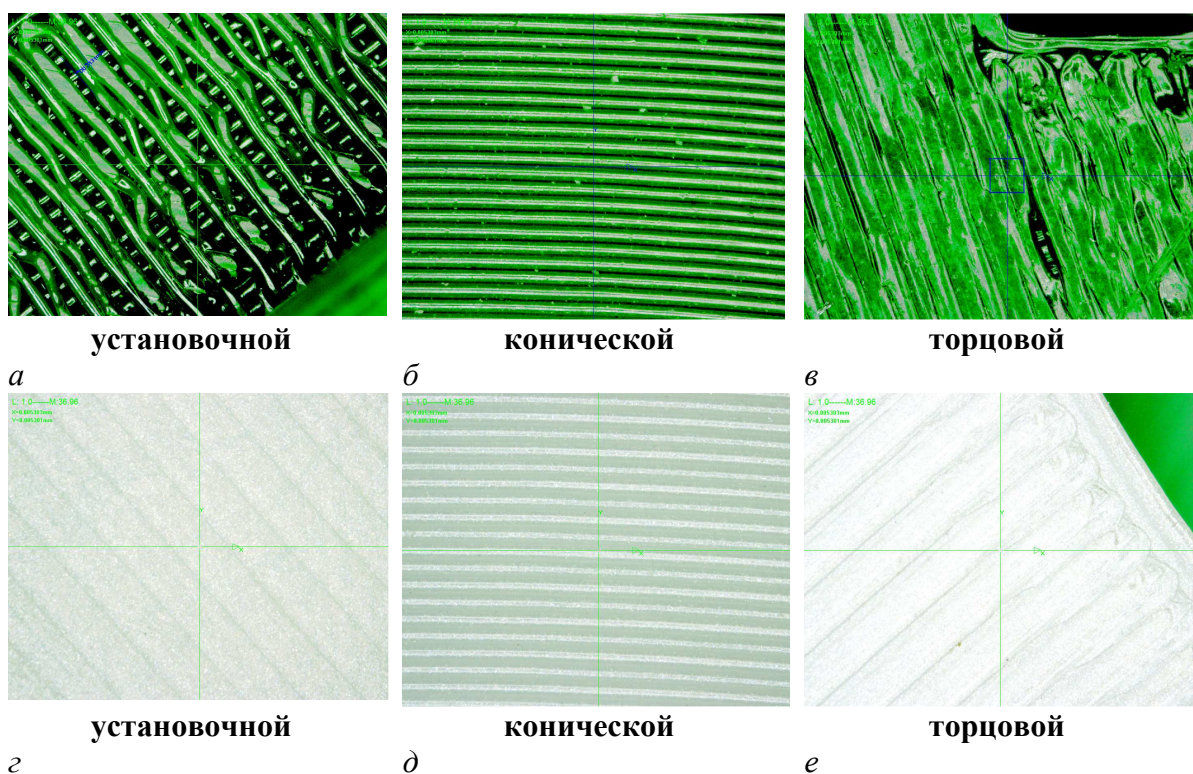


Рисунок 23. – Измерение линейных размеров конструктивных элементов



напечатанных: *a, б, в* – из пластика ABSplus-P430 на 3D-принтере Stratasys Mojo;  
*г, д, е* – из PLA-пластика Wanhao на 3D-принтере Mass Portal Pharaoh XD 30

Рисунок 24. – Структура наружной поверхности БМРИ

Шероховатость поверхностей детали оценивалась на профилографе-профилометре модели «Abris-PM7» (рисунок 25).

Прибор предназначен для измерений в лабораторных и цеховых условиях машиностроительных, приборостроительных и других предприятий, а также в полевых условиях, шероховатости поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию.

Измерение параметров шероховатости поверхности производили по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789.



Рисунок 25. – Профилограф-профилометр модели «Abris-PM7»

Прибор соответствует ГОСТу 19300.

**Технические характеристики:**

- 1.1. Измеряемые параметры шероховатости:  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $R_{max}$ ,  $Sm$ ,  $tp$ .
- 1.2. Вид отчета результатов измерения: цифровой.
- 1.3. Вид регистрации результатов измерения: профилограмма в прямоугольной системе координат профилографа.
- 1.4. Форма измеряемых поверхностей: плоские, цилиндрические, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию.
- 1.5. Наибольшая глубина измеряемого отверстия: 20 мм.
- 1.6. Минимальный диаметр измеряемого отверстия на глубине до 20 мм: 6 мм.
- 1.7. Принцип действия: контактный, последовательного преобразования профиля.
- 1.8. Метод измерения: непосредственной оценки.
- 1.9. Диапазон измерений по параметрам:
  - $Ra$ , мкм: 0,04...12,5;
  - $Rz$ ,  $R_{max}$ , мкм: 0,16...50,0;

–  $Sm$ , мкм: 8,0...250,0;

–  $tp$ , %: 0,1...99,9.

1.10. Номинальные значения увеличений профилографа:

– вертикальные: 500, 1000, 2000, 5000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000;

– горизонтальные: 20, 50, 100, 200, 500.

1.11. Максимальная длина трассы ощупывания: 7,5 мм.

1.12. Значения отсечек шага: 0,25; 0,8; 2,5 мм.

1.13. Скорость перемещения щупа, мм/с:

– при рабочем ходе  $1 \pm 0,05$ ;

– при возврате:  $2 \pm 0,4$ .

1.14. Радиус кривизны вершины щупа: 5 мкм.

1.15. Предел допускаемой основной погрешности: для профиля, близкого к трапецеидальному, с шагом не более  $0,25 \lambda_s$ , должен соответствовать значениям, определяемым по формулам:

$$\Delta Ra = 0.02 Ra_{в.п.} + 0.04 Ra \text{ (мкм);}$$

$$\Delta Rz = 0.03 Rz_{в.п.} + 0.05 Rz \text{ (мкм);}$$

$$\Delta R_{max} = 0.03 R_{max_{в.п.}} + 0.05 R_{max} \text{ (мкм);}$$

$$\Delta Sm = 0.02 Sm_{в.п.} + 0.1 Sm \text{ (мкм);}$$

$$\Delta tp = 8 + 0.02 tp \text{ (%).}$$

1.16. Допускаемое отклонение амплитудно-частотной характеристики от номинальной должно соответствовать первой степени точности по ГОСТ 19300.

1.17. Статическое измерительное усилие, Н, не более 0,016.

1.18. Постоянная изменения измерительного усилия, Н/м, не более 200.

1.19. Параметр шероховатости  $Rz$  рабочей поверхности опоры, мкм, не более 0.1.

1.20. Усилие воздействия опоры датчика на контролируемую поверхность, Н, не более 0,5.

В результате измерений установлено, что величина отклонений диаметральных размеров и круглости поверхности в пределах: для 3D-печати на принтере Stratasys Mojo ~ 0,32 мм и ~ 0,09 мм соответственно, для 3D-печати на принтере Mass Portal Pharaoh XD 30 ~ 0,38 мм и ~ 0,06 мм соответственно.

Изучение структуры и шероховатости поверхностного слоя деталей показывает, что плоское наложение слоев материала и их пересечение различно для рассматриваемых способов степени заливки материалов: для 100% – 6,3 мкм, для 50% – 6,8 мкм.

Анализ результатов оценки параметров точности и шероховатости поверхностей деталей показывает, что для свободных или нерабочих размеров поверхности и конструктивных элементов степень точности, обеспечиваемая 3D-принтерами, достаточна, а для сопрягаемых поверхностей пазов торцевой шпонки, отверстий для установки блоков резцовых и других требуется дополнительный подбор материала, учитывающий толщину и свойства нити.

### **7 Традиционные, аддитивные и «гибридные» технологии, их технические возможности**

Подготовка машиностроительного производства, как известно, включает разработку конструкций изделий и технологий их изготовления. Сокращению затрат времени на этом этапе производства способствуют автоматизация процедур и отработка предлагаемых конструкций и технологий на макетах, получаемых с использованием послойного синтеза.

Разработана методика 3D-проектирования и печати на 3D-принтерах макетов технологической оснастки, в частности (БМРИ) [9]. Методика включает расчет и проектирование 3D-конструкций с использованием программных продуктов «Ansys», «Компас-Вертикаль», «Solid Works» и технологий их изготовления механической обработкой на токарных и фрезерных трехосевых станках модели «Emko» и «Robodrill», печати на 3D-принтере типа «Mojo» и «гибридным» методом, совмещающим традиционные и аддитивные технологии (рисунок 26).



***a* – традиционный из металла; *б* – аддитивный из пластика;  
*в* – «гибридный» (нетрадиционный) из металлических резцовых блоков  
и пластикового корпуса**

**Рисунок 26. – Эскизы блочно-модульных режущих инструментов**

Отличительными особенностями полученных макетов БМРИ являются «обтекаемость» и рациональные формы корпусов с точки зрения законов гидро- и аэродинамики конструктивных элементов для стружко- и теплоотвода, а также использование специальных балансировочных устройств (элементов).

## **8 Экономическая оценка производства изделий на основе трехмерных технологий**

Применение «гибридного» метода изготовления макета блочно-модульного режущего инструмента из полимерного материала позволяет экономить средства, а также сократить время на конструкторскую и технологическую подготовку производства по сравнению с традиционным методом (однако уступает аддитивному по причине отсутствия необходимости дорогостоящей технологической оснастки, инструмента, большого количества оборудования) и позволяет отработать каждый элемент конструкции БМРИ на стадии проектирования (таблица 13) [10–12].

Таблица 13. – Оценка затрат на изготовление

Метод изготовления:		
Традиционный	Аддитивный	Гибридный
≈1000 бел. руб.	≈ 350 бел. руб.	≈ 720 бел. руб.

Как видно из таблицы 13, применение метода производства макета БМРИ из полимерных материалов позволяет сэкономить средства в среднем от 1,5 до 3 раз по сравнению с отработкой конструкций БМРИ на экспериментальных образцах из металла.

**ЗАДАНИЯ**  
**для лабораторных и практических занятий,**  
**курсовых и дипломных проектов**

**Задание по дисциплине**

**«ТИПОВЫЕ ОПЕРАЦИИ МЕХАНОСБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ»**

1. Ознакомиться с основными материалами, операциями и оборудованием послойного синтеза изделий (на примере 3D-принтеров моделей Pharaon Mass Portal, Mojo, Premier-3D-N1, Formlabs Form 3).
2. Создать 3D-детали в CAD системе, сохранить модель в STL формате, загрузить в слайсер и сгенерировать в g-код.
3. Распечатать на 3D-принтере модель детали.
4. Выполнить постобработку детали.
5. Сравнить полученные модели детали с размерами на чертеже детали.

**Задание по дисциплине**

**«МАТЕРИАЛЫ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА»**

1. Изучить марки применяемых материалов на 3D-принтере модели «Mass Portal» и сопоставить их технические характеристики.
2. Напечатать изделия из двух разных материалов и изучить их структуру.
3. Сделать выводы о преимуществах и недостатках материалов по техническим характеристикам и структуре поверхности изделий.

**Задание по дисциплине**

**«МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»**

1. Напечатать два изделия из разных материалов.
2. Измерить твердость изделий.
3. Исследовать прочность изделий на сжатие, разрыв и ударную вязкость.
4. Сделать выводы о преимуществах и недостатках материалов по твердости, прочности и ударной вязкости.

**Задание по дисциплине**

**«КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЙ»**

1. Изучить конструкцию и настройку 3D-принтера по инструкции.
2. Настроить 3D-принтер на печать отдельного изделия в соответствии с чертежом.

3. Измерить габаритные размеры изделия и сопоставить их точность с точностью перемещений механизма 3D-принтера.
4. Сделать выводы о точностных возможностях 3D-принтера.

#### **Задание по дисциплине**

#### **«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»**

1. Настроить 3D-принтер на печать изделия.
2. Настроить пирометр «Optris LS» для измерения теплового излучения при печати изделия.
3. Отпечатать изделие и измерить уровень теплового излучения при печати слоев материала.
4. Определить коэффициент тепловой усадки материала как отношение заданного размера к полученному.
5. Сделать выводы о влиянии теплового воздействия при печати на качество изделия.

#### **Задание по дисциплине**

#### **«МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ»**

1. Изучить методы исследований образцов, свойств, характеристик материалов и изделий, полученных на 3D-принтере.
2. Напечатать экспериментальный образец.
3. Освоить методику и получить навыки работы на приборах для изучения структуры, измерения твердости материала, размеров и шероховатости изделий.

#### **Задание по дисциплине**

#### **«АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ»**

1. Изучить виды (категории) аддитивных технологий, определить разницу субтрактивных и аддитивных технологий, их преимущества и недостатки.
2. Разработать технологический маршрут послойного синтеза заданной конструкции изделия.
3. Освоить программную и техническую загрузку 3D-принтера, напечатать изделия по технологии FDM и произвести его постобработку.
4. Проанализировать время подготовки, 3D-печати и постобработки, затраты на материалы и сделать выводы об эффективности технологии 3D-печати.

### **Задание по дисциплине**

#### **«ТЕОРИЯ РЕЗАНИЯ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ»**

1. Изучить основные виды обработки резанием и применяемые при этом типы режущих инструментов.
2. Для выбранного (заданию) типа режущего инструмента (по чертежу) осуществить программную и техническую загрузку 3D-принтера и напечатать режущий инструмент.
3. Провести измерения отпечатанной 3D-модели режущего инструмента.
4. Сопоставить полученные данные измерений 3D-модели с размерами режущего инструмента по чертежу и сделать выводы о точности 3D-печати.

### **Задание по дисциплине**

#### **«ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН»**

1. Изучить основные методы промышленного дизайна.
2. Для машиностроительного изделия (детали) создать 3D-модель объекта.
3. Осуществить программную и техническую загрузку 3D-принтера и напечатать машиностроительное изделие.
4. Сделать выводы о дизайне отпечатанной модели изделия.

## ТЕСТЫ И ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

### Тесты

1. Технология 3D-печати FDM – это:
  - 1) fused deposition modeling;
  - 2) лазерная стереолитография;
  - 3) selective laser sintering;
  - 4) three dimensional printing.
2. Технология спекания порошков SLS – это:
  - 1) stereolithography;
  - 2) лазерная стереолитография;
  - 3) selective laser sintering;
  - 4) three dimensional printing
3. Технология 3D-печати DLP – это:
  - 1) stereolithography;
  - 2) лазерная стереолитография;
  - 3) digital light processing, цифровая обработка светом.
4. Технология 3D-печати SLA – это:
  - 1) stereolithography;
  - 2) лазерная стереолитография;
  - 3) правильных ответов нет;
  - 4) 1 и 2.
5. Технология 3D-печати LOM – это:
  - 1) laminated object manufacturing;
  - 2) изготовление объектов методом ламинирования;
  - 3) правильных ответов нет;
  - 4) 1 и 2
6. Технология 3D-печати 3D-P – это:
  - 1) laminated object manufacturing;
  - 2) electron beam melting;
  - 3) selective laser melting;
  - 4) three dimensional printing
7. Технология 3D-печати EBM – это:
  - 1) правильных ответов нет;
  - 2) electron beam melting;

- 3) 2 и 4;
  - 4) электронно-лучевая плавка.
8. Технология 3D-печати SLM – это:
- 1) electron beam melting;
  - 2) selective laser melting;
  - 3) three dimensional printing.
9. Технология 3D-печати CJP – это:
- 1) laminated object manufacturing;
  - 2) color jet printing;
  - 3) 2 и 4;
  - 4) three dimensional printing.
10. Технология 3D-печати POLYJET – это:
- 1) послойное отверждение жидкого фотополимерного материала под воздействием ультрафиолетового излучения;
  - 2) многоструйное моделирование;
  - 3) лазерное инженерное нетто формирование.
11. Технология 3D-печати MJM – это:
- 1) multi jet modeling;
  - 2) многоструйное моделирование;
  - 3) правильных ответов нет;
  - 4) 1 и 2.
12. Технология 3D-печати Lens – это:
- 1) laser engineered net shaping;
  - 2) правильных ответов нет;
  - 3) лазерное инженерное нетто формирование;
  - 4) 1 и 3.
13. Технология 3D-печати DMD – это:
- 1) 2 и 3;
  - 2) Direct Metal Deposition;
  - 3) прямое нанесение металла;
  - 4) правильных ответов нет.
14. Технология 3D-печати DMLS – это:
- 1) Direct Metal Laser Sintering;
  - 2) 1 и 4;
  - 3) правильных ответов нет;
  - 4) прямое лазерное спекание металлов.

15. Технология 3D-печати SHS – это:

- 1) лазерное инженерное нетто формирование;
- 2) выборочное тепловое спекание;
- 3) прямое нанесение металла.

16. Ионно-лучевая обработка – это воздействие:

- 1) ионами и фотонами;
- 2) электронами и нейтронами;
- 3) светом и плазмой;
- 4) 2 и 3.

17. Процесс взаимодействия ионов с поверхностью происходит в режиме:

- 1) конденсации, распыления и имплантации;
- 2) испарения, внедрения, поглощения;
- 3) адгезии, диффузии, адсорбции;
- 4) абсорбции, адгезии, диффузии.

18. Технология CLAD – это:

- 1) прямое лазерное аддитивное построение;
- 2) сплавление металлического порошка лучом лазера;
- 3) прямое лазерное выращивание;
- 4) 1, 2 и 3.

19. Технология EBF3 – это:

- 1) произвольная электронно-лучевая плавка;
- 2) производство электронно-лучевой плавкой;
- 3) 1 и 2;
- 4) спекание металлических порошков.

20. Методы нанесения тонкопленочных покрытий:

- 1) физический и химический;
- 2) механический и физический;
- 3) электрический и магнитный;
- 4) лазерный и плазменный.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое аддитивные технологии?
2. Какая разница между субтрактивными и аддитивными технологиями?
3. Назовите основные виды аддитивных технологий.
4. Перечислите основные этапы реализации аддитивных технологий.

5. Перечислите переходы на операциях 3D-печати деталей.
6. Поясните устройство и принципы работы 3D-принтеров.
7. Какие скорость и производительность печати на 3D-принтерах?
8. Назовите основные группы материалов, применяемых при 3D-печати.
9. Каковы точность и качество поверхностей деталей, получаемых на 3D-принтерах?
10. Назовите основные преимущества и недостатки аддитивных технологий.
11. Назовите основные технические характеристики ABS филамента.
12. Назовите основные технические характеристики PLA пластика.
13. Назовите основные технические характеристики 3D-печати изделий из ABS филамента.
14. Назовите основные технические характеристики 3D-печати изделий из PLA пластика.
15. Назовите основные технические характеристики 3D-принтера модели Stratasys Mojo.
16. Назовите основные технические характеристики 3D-принтера модели Mass Portal Pharaoh XD30.
17. Назовите основные закладки программы настройки 3D-принтера.
18. Какова температурная усадка полимерного материала при 3D-печати в процентном выражении?
19. Дайте определение технологии FDM.
20. Назовите основные принципы построения изделий по технологии FDM.
21. Назовите основные технические характеристики видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORGAU.
22. Назовите основные технические характеристики профилографа-профилометра модели «Abris-PM7».
23. Какова величина отклонений линейных размеров при 3D-печати?
24. Какова величина шероховатости отпечатанной поверхности по параметру  $Ra$  при 100% и 50% заливке материала?
25. Какова экономия затрат при использовании аддитивных технологий по сравнению с субтрактивными технологиями?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение аддитивных технологий открывает новые перспективные возможности в развитии машиностроения. Каждая 3D-технология и соответствующее ей оборудование в силу той или иной специфики могут найти применение для получения как конечных изделий, так и заготовок. Важно, чтобы эти технологии не рассматривались как альтернативные механической обработке поверхностей деталей. При всех наглядных преимуществах в экономии материалов аддитивные технологии пока проигрывают субтрактивной обработке по точности и качеству изделий.

В данном пособии на реальных примерах макетирования технологической оснастки с использованием 3D-принтера показаны возможности в сокращении временных и финансовых затрат на этапе подготовки машиностроительного производства. При этом рассмотрены некоторые вопросы теплового воздействия на печатаемое изделие, формирование структуры и шероховатости поверхности, обеспечение точностных параметров.

Выполнение заданий для лабораторных работ и практических занятий по ряду дисциплин специальностей 6-05-0722-05 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» и 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» позволит изучить и освоить типовые переходы 3D-печати и постобработки, физико-механические свойства применяемых материалов (твердость, прочность, теплостойкость), влияние точности 3D-принтеров на точность получаемых изделий, толщины слоев и степени заливки на качество поверхности и т.д.

Выполнение практических заданий полезно при прохождении производственных практик, выполнении курсовых работ и дипломных проектов.

## КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

**3D-сканирование, 3D-оцифровка (3D-digitizing)** – способ получения данных о форме и размерах объекта в пространственном представлении путем записи  $x$ ,  $y$  и  $z$  координат точек поверхности объекта и преобразования набора точек в электронную геометрическую модель при помощи специализированного программного обеспечения.

**3D-печать (3D-printing)** – производство объектов путем послойного нанесения материала печатающей головкой, соплом или с использованием иной технологии печати.

**3D-принтер (3D-printer)** – установка для 3D-печати.

**Аддитивное производство (additive manufacturing)** – процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки).

**Деталь (part)** – вид изделия, изготовленного из однородного по наименованию и марке материала (или нескольких таких материалов одновременно), которое может быть частью сборки или отдельным элементом.

**Заготовка АП (as built)** – состояние детали, изготовленной аддитивным процессом, без какой-либо постобработки, кроме, при необходимости, удаления с платформы сборки, а также удаления вспомогательного и/или необработанного материала.

**Ламинация листовая (sheet lamination)** – процесс АП, в котором изготовление детали осуществляется послойным соединением листовых материалов.

**Модель поверхности (surface model)** – математическое или цифровое представление объекта в виде набора плоских и/или искривленных поверхностей, которые могут, но не обязательно должны, представлять собой замкнутый объем.

**Нанесение материала струйное (material jetting)** – процесс АП, в котором изготовление объекта осуществляют нанесением капель строительного материала.

**Нанесение связующего струйное (binder jetting)** – процесс АП, в котором порошковые материалы соединяются выборочным нанесением жидкого связующего.

**Оснастка для прототипа (prototype tooling)** – формы, штампы и другие приспособления для применения в прототипировании; иногда под этим термином подразумевается мостовая или мягкая оснастка.

**Отверждение (curing)** – химический процесс, результатом которого является материал с конечными свойствами или другой материал.

**Параметры технологические (process parameters)** – набор рабочих параметров и системных настроек, используемых во время цикла построения.

**Переориентация детали (part reorientation)** – вращение ограничительного блока вокруг геометрического центра детали относительно начальной ориентации построения.

**Печать трехмерная (3D-printing)** – производство объектов путем послойного нанесения материала печатающей головкой, соплом или с использованием иной технологии печати.

**Поверхность построения (build surface)** – область, где происходит нанесение материала, как правило, на последнем слое, который становится основанием для формирования следующего слоя.

**Повторяемость АП (repeatability)** – прецизионность АП в условиях повторяемости. К условиям повторяемости относятся: один и тот же или несколько методов измерений; идентичные объекты измерения; одно и то же оборудование и одни и те же условия.

**Подложка (powder bed, part bed)** – область построения в системе АП, в которой сырье наносится и выборочно спекается/сплавляется посредством энергии от внешнего источника тепла или связывается посредством адгезии для изготовления деталей.

**Пользователь аддитивной системы (AM system user)** – оператор или организация, использующие систему аддитивного производства или любую ее часть.

**Пользователь установки АП (AM machine user)** – оператор или организация, использующие установку АП.

**Пост-обработка (post-processing)** – «один или несколько» этапов процесса, выполняемых после завершения цикла построения АП для достижения желаемых свойств конечного продукта.

**Производство инструментальное быстрое (rapid tooling)** – применение АП, направленное на производство инструментов или элементов оснастки с сокращенным сроком изготовления по сравнению с традиционным инструментальным производством.

**Прототип (prototype)** – вид изделия, получаемый одношаговым или многошаговым процессом и являющийся опытным образцом или рабочей моделью, который служит для предварительной оценки характеристик, дизайна или свойств изделия.

**Прототипирование быстрое (rapid prototyping in additive manufacturing)** – применение АП, направленное на снижение времени для производства прототипов.

**Процесс многошаговый (многоэтапный процесс) (multi-step process)** – тип процесса АП, в котором детали изготавливают за две или более операции, при этом на 1-й стадии, как правило, обеспечивается получение заданной геометрической формы, а на последующих за счет консолидации детали формируются основные требуемые свойства используемого материала (металл, керамика, полимер, композит и др.).

**Процесс многоэтапный (одноэтапный процесс) (single-step process)** – тип процесса АП, в котором детали изготавливают за одну операцию, при этом основная геометрическая форма и свойства материала достигаются одновременно.

**Серия деталей (production run)** – все детали, произведенные в одном цикле построения или нескольких последовательных циклах построения с использованием одной и той же партии сырья и технологических условий.

**Синтез на подложке (powder bed fusion)** – процесс АП, в котором энергия от внешнего источника тепла используется для избирательного спекания/сплавления предварительно нанесенного слоя порошкового материала.

**Синтезирование (fusion)** – объединение двух или более частиц материала в одну единицу.

**Система аддитивная (AM machine)** – часть системы АП, необходимая для выполнения цикла построения деталей, включающая аппаратную часть, программное обеспечение для настройки и контроля установки, а также периферийные приспособления, используемые для завершения цикла построения.

**Система АП (additive manufacturing system)** – установка АП и вспомогательное оборудование, используемое для АП.

**Слой вещества (layer)** – материал, предварительно нанесенный для создания поверхности.

**Спекание/сплавление лазерное (laser sintering; LS)** – процесс синтеза на подложке, выполняемый для производства деталей из порошковых материалов с использованием одного или нескольких лазеров для выборочного спекания или сплавления частиц на поверхности, слой за слоем, в закрытой камере.

**Стандарт обмена исходной графической информацией (initial graphics exchange specification (IGES))** – нейтральный формат файлов, предназначенный для переноса двух- и трехмерных данных между различными системами автоматизированного проектирования.

**Точность АП (accuracy)** – степень близости результатов измерений геометрии детали к принятому эталонному значению.

**Установка АП ((установка аддитивная) (AM machine)** – часть системы АП, необходимая для выполнения цикла построения деталей, включающая аппаратную часть, программное обеспечение для настройки и контроля установки, а также периферийные.

**Фасет (facet)** – трех- или четырехсторонний полигон, представляющий собой элемент пространственной полигональной сетки поверхности модели.

**Формат файлов аддитивного производства ФФАП (Additive Manufacturing File Format, AMF)** – формат файлов для коммуникационной (для обмена данными) электронной геометрической модели АП, включающий в себя пространственное описание геометрии поверхности, со встроенной поддержкой цвета, материалов, сеток координат, групп элементов и метаданных.

**Фотополимеризация в ванне (vat photopolymerization)** – процесс АП, в котором жидкий фотополимер выборочно отверждается (полимеризуется) в ванне световым излучением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 1. Термины и определения : ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900-15. – Введ. 01.12.2017. – М. : Стандартиформ, 2017. – 16 с.
2. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования : ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900-15. – Введ. 01.12.2017. – М. : Стандартиформ, 2017. – 12 с.
3. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 3. Общие требования : ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900-15. – Введ. 09.08.2017. – М. : Стандартиформ, 2017. – 12 с.
4. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 4. Обработка данных : ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900-15. – Введ. 09.08.2017. – М. : Стандартиформ, 2017. – 26 с.
5. Попок, Н.Н. Методология исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения / Н.Н. Попок // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2019. – № 3. – С. 21–30.
6. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч. 3. Инструментальные системы для многоцелевой обработки / Н.Н. Попок // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2013. – № 3. – С. 19–37.
7. Попок, Н.Н. Методология исследования работоспособности фрезерных и осевых режущих инструментов на основе 3D-прототипирования / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2020. – № 11. – С. 29–39.
8. Попок, Н.Н. Технология FDM печати конструкции блочно-модульной торцовой фрезы / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 24–25 окт. 2019 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 38.
9. Попок, Н.Н. 3D-моделирование конструкций блочно-модульных торцовых фрез [Электронный ресурс] / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) : электрон. сб. ст. I междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. – Новополоцк : ПГУ, 2018. – С. 190–192.
10. Попок, Н.Н. 3D-макетирование сборных режущих инструментов для высокоскоростной обработки / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 97–98.
11. Попок, Н.Н. Подготовка машиностроительного производства на основе 3D-прототипирования технологической оснастки [Электронный ресурс] / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Инновационные технологии в машиностроении (ИнТехМаш-2020) : электрон. сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию машиностроит. специальностей и 15-летию науч.-технол. парка Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. – Новополоцк : ПГУ, 2020. – С. 40–41.
12. Попок, Н.Н. Автоматизация подготовки производства на основе 3D-макетирования технологической оснастки / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы VIII междунар. науч.-практ. конф., Минск / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 100.

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ СТРУКТУРА ОТЧЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ

#### **Цель работы:**

- ознакомиться с теоретическими и практическими указаниями;
- изучить описание оборудования и приборов, инструкции по работе с ними;
- получить практические навыки работы на 3D-принтере и с программой.

#### **Оборудование, оснастка, приборы и материалы:**

- 3D-принтер (указать модель);
- программное обеспечение (наименование);
- приспособления, инструмент режущий, приборы измерительные (указать наименования и модели);
- материалы пластиковые (указать марки).

#### **Порядок выполнения работы:**

- получить задание;
- создать 3D-модель в САД системе;
- сохранить модель в stl формате;
- закрыть слайсер и сформировать g-код;
- распечатать модель;
- выполнить постобработку;
- произвести необходимые измерения;
- оформить отчет.

#### **Содержание отчета**

- 1 Краткое описание аддитивных технологий;
- 2 Описание основной части работы
  - 2.1 Эскизы изделия и его модели;
  - 2.2 Подготовка к печати;
  - 2.3 Параметры печати;
  - 2.4 Переходы постобработки;
  - 2.5 Изменения параметров;
  - 2.6 Сравнение параметров модели со стандартными.

Выводы.



		Сборная торцовая фреза		3D-печать		1	
		РЧИП «НППГЧ»		3D-печать			
Портянко С.А. Полок Н.Н.						3D-печать	
Кравченко В.В.							
Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции	СМ	Проф.	Р	УТ
Наименование детали, сб. единицы или материала		Код, наименование оборудования		КР	КОИД	ЕН	ОП
		Наименование детали, сб. единицы или материала		ОПП	ЕВ	ЕН	КИ
				Обозначение документа		Тпз	Тшт.
				Обозначение, код		Н. расх.	
005 3D-печать "Модуля корпусного"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		0,27	
010 3D-печать "Державка"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		92,88	
015 3D-печать "Штифта"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		4,72	
020 3D-печать "Прихватка"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		19,87	
025 3D-печать "Шайбы"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		2,16	
030 3D-печать "Винт блока резцового"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		5,4	
035 3D-печать "Кулачок №1"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		24,3	
040 3D-печать "Кулачок №2"							
Тринтер Pharaoh Mass Portal XD 30				1 1 1 1		19,98	
Маршрутная карта						2	































Дубл.		Сборная торцовая фреза		3D-печать		1		1		
Взам.		РУИП «НППГЧ»		3D-печать		1		1		
Подл.										
Разраб.		Портянко С.А.						3D-печать		
Проверил		Полок Н.Н.								
Утвердил										
Н. контр.		Кравченко В.В.						040		
Наименование операции		Материал		Твердость		ЕВ		МД		
3D-печать "Кулачок №2"				кг				Профиль и размеры		
Оборудование, устройство ЧПУ		Обозначение программы		То		Тв		Тшт.		
3D-принтер Pharaoh Mass Portal XD 30				17		1,5		5		
				19,98				СОЖ		
Р		ПИ		D или B		L		t		
								i		
								s		
								n		
								v		
001	1. Передать 3D-модель "Кулачок №2" в формате STL в программное обеспечение 3D-принтера.									
002	2. Расположить модель в виртуальной рабочей зоне.									
003	3. Стенерировать элементы вспомогательных конструкций (из специального материала поддержки).									
004	4. Произвести расчёт путей перемещения печатной головки.									
005	5. Произвести расчёт времени вращения прототипа.									
006	6. Разогреть стол до температуры 60-120 градусов.									
007	7. Печатать изделие "Кулачок №2", в размере 8 штук, выдерживая температуру экструдера 210-285 градусов, при скорости перемещения сопла - 40 мм/с, согласно исходной 3D-модели.									
008	8. Убрать вспомогательные конструкции.									
10										
11										
12										
13										
ОК	Операционная карта									
	11									







Дубл. Взам. Подл.		Сборная торцовая фреза										3D-печать		1		1									
Разраб. Проверил Утвердил		РУИП «НППГ-У»										3D-печать													
Н. контр.		Материал										Твердость		ЕВ		МД		Профиль и размеры		МЗ		КОИД			
Наименование операции		Обозначение программы										Т <sub>0</sub>		Т <sub>в</sub>		Т пз.		Тшт.							
3D-печать "Модуля балансировочного"		Обозначение программы										14		0,45		5				15,61		СОЖ			
3D-принтер Pharaoh Mass Portal XD 30		ПИ										D или B		L		t		i		s		n		v	
001	1. Передать 3D-модель "Модуля балансировочного" в формате STL в программное обеспечение 3D-принтера.																								
002	2. Расположить модель в виртуальной рабочей зоне.																								
003	3. Сгенерировать элементы вспомогательных конструкций (из специального материала поддержки).																								
004	4. Произвести расчёт путей перемещения печатной головки.																								
005	5. Произвести расчёт времени выращивания прототипа.																								
006	6. Разогреть стол до температуры 60-120 градусов.																								
007	7. Печатать изделие "Балансировочная заглушка", в размере 8 штук, выдерживая температуру экструдера 210-285 градусов, при скорости перемещения сопла - 40 мм/с, согласно исходной 3D-модели.																								
008	8. Убрать вспомогательные конструкции.																								
10																									
11																									
12																									
13																									
OK	Операционная карта																								
	13																								













Дубл.		Взам.		Подл.		Сборная торцовая фреза		3D-печать		1		1	
Разраб.		Проверил		Утвердил		РЧИП «НППГ-У»		3D-печать					
Н. контр.		Наименование операции		Материал		Твердость		EB		МД		Профиль и размеры	
		Сборочная				То		Тв		Т пз.		Тшт.	
		Оборудование, устройство ЧПУ		Обозначение программы		25		2		5		29,16	
Р		D или B		L		t		i		s		n	
001	1. Собрать 8 механизмов зажима. Соединить кулачок №1 и кулачок №2, и закрепить винтом модуля зажимного.												
T02	Кулачок №1 (8)												
T03	Кулачок №2 (8)												
T04	Винт зажимного модуля (8)												
05													
06													
07													
08													
09													
10													
11													
12													
13													
OK	Операционная карта												17







**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

*Учебное издание*

ПОПОК Николай Николаевич  
ПОРТЯНКО Сергей Анатольевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
НА ОСНОВЕ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-ПРИНТЕРА.  
ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по химико-технологическому образованию в качестве пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по химико-технологическим специальностям*

Редактор *Т. А. Дарьянова*  
Дизайн обложки *М. А. Мухоморовой*

---

Подписано в печать 02.12.2022. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 5,57. Уч.-изд. л. 5,18. Тираж 30 экз. Заказ 576.

---

Издатель и полиграфическое исполнение –  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014, перерегистрация от 24.08.2022.

ЛП № 02330/278 от 27.05.2004.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.