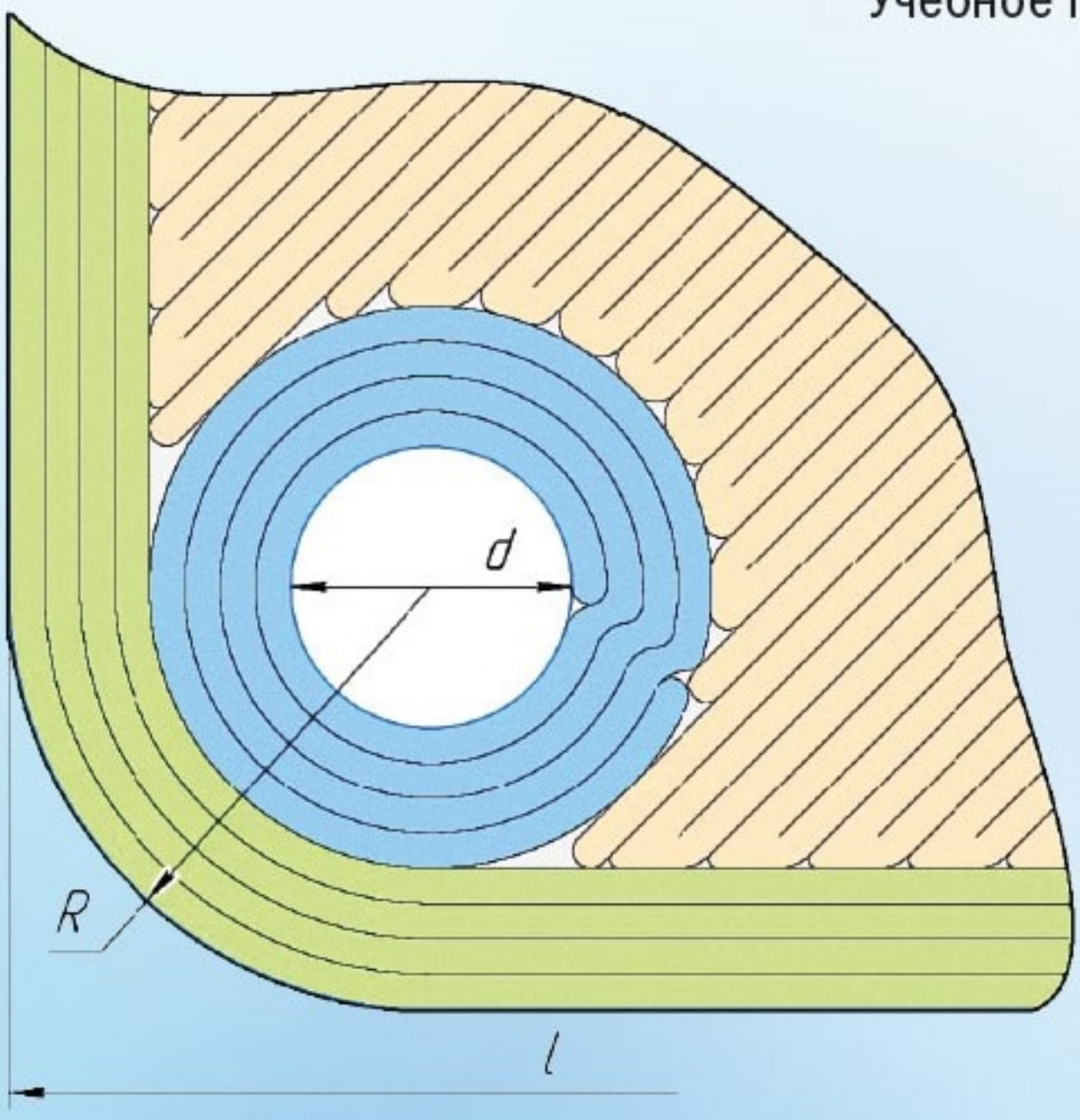
А. Д. Арташов
А. Д. Талыгин

ПОСОБИЕ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2024

А. Д. Арташов А. Д. Талыгин

ПОСОБИЕ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM

Учебное пособие

ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2024

ББК 34.4я73
А86

Р е ц е н з е н т ы:
Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
СПбФ АО «НПК «ТРИСТАН» *И. С. Лебедев*
Доктор физико-математических наук,
профессор СПбПУ *А. В. Кваснов*

Арташов А. Д. **Пособие по конструированию изделий, изготавливаемых по технологии FDM** : учеб. пособие / А. Д. Арташов, А. Д. Талыгин. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 121 с.

Рассмотрены некоторые особенности и отличия технологии FDM от традиционных субтрактивных технологий, требующие особого подхода при проектировании деталей и конструкций. Цель – помочь конструктору в усовершенствовании функциональных элементов изделий, повысить их надежность и технологичность, улучшить их внешний вид и снизить затраты на производство. Изложенные принципы, подходы и примеры решения некоторых задач, стоящих при конструировании деталей, следует воспринимать как рекомендации, которые помогут избежать наиболее часто встречающихся ошибок. Рекомендации не являются универсальными, они основаны на определенном практическом опыте и должны дать базовые понятия о особенностях конструирования для изготовления по технологии FDM.

Пособие адресовано студентам и преподавательскому составу ВУЗов, а также конструкторам, желающим ознакомиться с данной технологией. Рекомендовано по укрупненным группам специальностей и направлений подготовки в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлениям подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», 12.03.01 «Приборостроение», 15.03.03 «Прикладная механика», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 15.04.01 «Машиностроение», 15.04.03 «Прикладная механика», 15.06.01 «Машиностроение» и 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

© Арташов А. Д., Талыгин А. Д., 2024
© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

ISBN 978-5-7422-8786-5

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ 6
ПРЕДИСЛОВИЕ 9
1. Особенности технологии и общие рекомендации 11
1.1. Особенности технологии, основные достоинства и недостатки 11
1.2. Области применения технологии 14
1.3. Общие положения и условия применения технологии 14
1.4. Принципы формообразования деталей 15
2. Определение поверхности построения 19
3. Оформление кромок и тонких стенок 23
3.1. Оформление кромок на поверхности построения 23
3.2. Оформление кромок на поверхностях стенок 24
3.3. Оформление кромок на поверхностях крышек 27
3.4. Проектирование тонких стенок 27
4. Точность и минимально возможные элементы 32
4.1. Точность линейных размеров 32
4.2. Минимальный размер отдельно стоящего элемента 32
4.3. Минимальный размер рельефа стенки 34
4.4. Минимальный размер рельефа дна/крышки 36
5. Отношение объема детали к размеру её наименьших элементов 39
6. Особенности проектирования типовых элементов деталей 41
6.1. Резьба 41
6.2. Механизмы запирания 42
6.3. Оребрение 45
6.4. Косынки 46
6.5. Нагруженные консольные элементы 47
6.6. Арматура и крепежные изделия 48
6.7. Рельефный текст 50
6.8. Объединенные сборочные единицы 52
7.1. Рассечение детали для изготовления с наилучшим качеством плоскости опор без механической обработки 55

7.2. Рассечение детали по наибольшим поддерживаемым плоскостям 56
8.1. Оболочка детали 58
8.2. Параметрическое моделирование заполнения процессором САП 59
8.3. Параметрическое моделирование заполнения процессором САП с разделением детали на несколько тел с различной плотностью 63
8.4. Моделирование внутренней структуры в CAD 65
8.5. Зависимость прочностных характеристик от внутренней структуры детали 67
9.1. Припуски на обработку 72
9.2. Базовые поверхности 74
10. Особенности оформления конструкторской документации 75
10.1. Общие рекомендации по оформлению конструкторской документации 75
10.2. Общие технические требования к деталям 80
11. Влияние внешней среды и механических воздействий на изделия 84
12. Общие сведения о материалах 85
12.1. Особенности производства и испытаний материалов для потребителя 85
12.2. Краткий перечень материалов, применяемых в производстве полимерных нитей 87
12.2.1. Твердые полимеры 88
12.2.1.1 ПЛА (полилактид) 88
12.2.1.2 ПЭТГ (полиэтилентерефталат, модифицированный гликолем) 89
12.2.1.3 АБС (акрилонитрил бутадиен стирол) 89
12.2.1.4 АСА (акрилонитрил стирол акрилат) 91
12.2.1.5 ПП (полипропилен) 91
12.2.1.6 ПММА (полиметилметакрилат) 92
12.2.1.7 ПА (полиамид) 92
12.2.2. Эластомеры 93
12.2.2.1. ТПЭ (термопластичные эластомеры) и ТПУ (термопластичный полиуретан) 93
12.2.2.2. СЭБС (стирол этилен бутилен стирол) 94
12.2.3. Тугоплавкие полимеры 95
12.2.3.1. ПСФ (Полисульфон) 95

12.2.3.2 ПЭЭК (полиэфирэфиркетон) 95
12.2.3.3 ПЭКК (полиэфиркетонкетон) 96
12.2.4. Материалы поддерживающих структур 97
13. Общие сведения об FDM 3d-принтерах..... 98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 107
ЛИТЕРАТУРА..... 109
Приложение 1. Примеры оптимизации деталей для изготовления по технологии FDM..... 111

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем пособии применены термины по ГОСТ Р 57558 [1], ГОСТ Р 59100 [2], ГОСТ 33366.1 [3], ГОСТ Р 57911 [4], ГОСТ 23501.603 [5] а также следующие термины:

1) Трещина: нарушение сплошности, вызванное локальным перепадом температур или действием нагрузки, кроме случаев, описываемых термином «несплавление».

2) Несплавление: дефект, характеризующийся локальным отсутствием соединения между соседними слоями материала изделия.

3) Ретракт: процесс втягивания филамента в сопло перед началом холостого перемещения рабочего инструмента 3D-принтера и возврата филамента в исходное положение после окончания холостого перемещения. Характеризуется длиной втягивания и возврата, скоростью втягивания и возврата филамента.

4) Адгезив: вещество, служащее для соединения первого слоя изделия с платформой построения (например, клей).

5) Кайма: однослойная плоская область, охватывающая поверхность построения детали, предотвращающая её деформацию и деламинацию (отслаивание) от стола.

6) Наплыв на поверхности построения: материал, выдавливаемый за пределы геометрии детали, в частности за счёт отклонения действительной толщины первого слоя относительно заданной или при перегреве первых слоёв детали платформой построения.

7) Расщепление слоёв: частичное или полное расслаивание детали по слоям с обнажением структуры заполнения в следствие воздействия внутренних напряжений материала в детали.

8) **Смещение слоев**: изменение геометрии детали со смещением верхней её части относительно нижней, вызванное сбоем в системе координат оборудования в процессе построения.

9) **Линия (элемента детали)**: кривая или прямая линия, экструдированная в пространстве построения. Совокупность линий, экструдированных на одной высоте, образуют слой детали.

10) **Линия стенки**: замкнутая линия, охватывающая периметр слоя или отверстие в слое. Стенка детали, как правило, состоит из нескольких эквидистантно расположенных линий.

11) **Линия дна (крышки)**: линия, заполняющая пространство между линиями стенок согласно определенному шаблону (зигзаг, концентрический и др.). Линии дна заполняют указанное количество слоёв от поверхности построения, линии крышки заполняют указанное количество слоёв под верхними горизонтальными поверхностями детали.

12) **Заполнение**: пространство между дном, крышкой и стенками, заполняемое линиями по указанному шаблону. В отличие от дна, крышки и стенок, линии заполнения могут быть разрежены в пространстве. Плотность заполнения (расстояние между линиями заполнения) указывается в процентах.

13) **Паутина**: тонкие линии, натянутые между двух поверхностей или свободно висящие, находящиеся вне заданной геометрии детали. Дефект появляется в следствии вытекания расплава из сопла при его холостом перемещении.

14) **Тонкие стенки**: сочетание геометрии детали и конфигурации стенок, при котором к стенке или к её части не примыкает заполнение.

15) **Шов**: совокупность точек, определяющая начало и конец внешней линии стенки. На поверхности детали шов представляет из себя локальный дефект (лунку), где внешняя линия стенки заходит в тело детали.

16) **Оболочка детали**: совокупность дна, крышки и стенок детали.

17) Нависающая поверхность: поверхность, нависающая над платформой построения под углом более 45° (в общем случае) при построении детали.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Изложенные далее принципы, подходы, примеры решения некоторых задач, стоящих при конструировании деталей, следует воспринимать как рекомендации, которые могут быть полезны в большинстве случаев, но не являются универсальными. Данное пособие не охватывает полного перечня задач и их решений, сосредотачиваясь на наиболее часто встречающихся вопросах, что должно дать базовые понятия о технологии FDM и особенностях проектирования.

В описании типовых решений (например, изготовление резьб, рельефного текста и т.д.), даны рекомендации, при выполнении которых, как правило, не должно возникнуть трудностей при изготовлении. В действительности почти всегда возможно дополнительно оптимизировать геометрию модели, если имеющееся оборудование и технологическая подготовка производства по данной технологии это позволяют, однако, может понадобиться больше времени на отработку производства проектируемой детали.

Оси графиков для прочностных характеристик деталей намеренно приведены в условных единицах, так как призваны показать тенденции зависимости прочности деталей от конструктивных решений. Действительные значения могут быть получены только экспериментальным путем и зависят от множества факторов, таких как материал, совокупность примененных конструктивных решений, технологические режимы и т.д.

Следует учитывать, что благодаря в корне различным свойствам материалов, применяемых в технологии FDM, для некоторых из них может потребоваться особый подход, отличный от описанных в пособии решений.

Рекомендации по возможности даны таким образом, чтобы не зависеть от применяемого процессора САП, однако основываются на возможностях ПО Ultimaker Cura версии 5.

Технология FDM предоставляет возможности по контролю и оптимизации множества параметров, которые традиционно относятся к

разным службам производства. Как правило, работа с написанием управляющей программы для оборудования относится к технологической службе, однако в данном случае, управляющая программа, созданная в процессоре САП, в большой степени определяет характеристики изготавливаемой детали, что требует отличного подхода к разработке конструкторской документации и взаимодействию конструктора и технолога.

Пособие по возможности определяет базовые параметры, которыми может управлять конструктор и дает рекомендации по ним, что должно упростить упомянутое выше взаимодействие конструктора и технолога при проектировании деталей без специальных требований. Решение задач по проектированию специфических деталей и конструкций скорее всего потребует тесного взаимодействия между службами, взаимную корректировку модели детали и её представления в процессоре САП, как следствие, задавая более полное описание технических требований к детали (или другое решение, позволяющее описать внутреннюю структуру детали в КД, например, введение проекта изготовления детали в процессоре САП в комплект КД).

Для более полного понимания технологии в целом, применяемого оборудования, материалов и других аспектов, предлагается ознакомиться с дополнительными источниками, расположенными в сети интернет, в частности [15] и [16].

1. Особенности технологии и общие рекомендации

1.1. Особенности технологии, основные достоинства и недостатки

В данной работе рассматривается технология FDM (Fused Deposition Modeling), которая подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели.

Основными особенностями данной технологии для производства на предприятии являются:

1) сравнительно низкая стоимость оборудования и рабочего места;

2) сокращение производственных издержек и себестоимости при малых партиях, снижение затрат на электроэнергию, экономия производственных площадей за счет исключения ряда технологических операций;

3) сравнительно недорогие материалы (относительно материалов, используемых в других аддитивных технологиях);

4) доступность оборудования и материалов отечественного производства с необходимой нормативной документацией на них;

5) наиболее широкая из всех «полимерных» аддитивных технологий область применения за счёт номенклатуры материалов, включающей в себя как гибкие полимеры (полиуретан - ПУ, каучук), так и прочные конструкционные материалы, аналогичные традиционно применяемым на производстве (полиамиды - ПА6, ПА12, поликарбонат - ПК, полиэтилентерефталат – ПЭТ, полисульфон – ПСФ) и друшие. Многие материалы выпускаются с наполнением стекло/углеволокном, антипиреновыми и другими добавками.

6) расширение номенклатуры изделий, возможность изготовления изделий со сложной геометрией или даже с невозможной в традиционном производстве конфигурацией;

7) относительно высокая скорость изготовления единичных изделий (прототипов, дефицитных деталей) включая подготовку производства;

8) простота и оперативность внесения изменений в конструкцию деталей, изготавливаемых по данной технологии;

9) повышение коэффициента использования материалов.

Основными недостатками технологии являются:

1) Сравнительно низкая точность построения изделий;

2) Высокая шероховатость деталей без дополнительной обработки;

3) Анизотропность свойств изготавливаемых деталей;

4) Относительно длинный цикл изготовления крупно габаритных деталей;

5) Экономическая эффективность ограничена мелкосерийным производством.

Этапы производственного цикла изготовления изделия включают в себя:

- подготовку CAD-модели (CAD – «Computer-aided design»);

- создание STL-файла (STL – «stereolithografy», триангулированная 3D модель) или другого файла, пригодного к обработке в процессоре САП;

- разделение на слои (создание рабочего файла для 3D-печати в процессоре САП);

- 3D-печать (изготовление детали);

- финишная обработка (механическая, термическая или химическая);

- контроль качества.

Наибольший размер изготавливаемой детали зависит от применяемого оборудования. В большинстве случаев, изготовленные по технологии FDM имеют габаритные размеры от 5 до 300-400 мм, размеры наименьших различимых элементов деталей начинаются от 0,5 мм (0,2 мм в некоторых плоскостях).

Точность изготовленных деталей без механической обработки соответствует квалитетам от H12, h12, IT12/2 до H14, h14, IT14/2 по ГОСТ 30893.1 [6].

Шероховатость деталей, выполненных по технологии FDM без механической обработки, в большинстве случаев от Rz=80 и выше. На поверхностях деталей явно различимы слои и линии печати.

Прочность детали в относительно равных пропорциях определяется материалом (термопластичным полимером), из которого она изготовлена, температурными и скоростными режимами оборудования (3D-принтера) и внутренней структурой детали, описанной процессором САП. В связи с этим точное прогнозирование прочностных характеристик детали на этапе конструирования затруднено, а при использовании опытно-статистического метода оценки, должен быть применен высокий коэффициент запаса прочности. Все вышеперечисленное на данный момент ограничивает применение деталей, выполненных по технологии FDM в высоконагруженных деталях.

Отношение массы к прочности (удельная прочность) у деталей, выполненных по технологии FDM, при качественной подготовке производства, как правило высокое.

Малонагруженные детали, выполненные по технологии FDM, как правило выдерживают механические и климатические испытания, например, для авиационного приборостроения.

Стойкость деталей к агрессивным средам определяется материалом детали.

Внутренняя структура детали при любом заполнении пористая, имеет сквозные микроканалы, негативно влияющие на герметичность детали при перепадах давления (достижение герметичности возможно в частных случаях).

Теплопроводность определяется применяемым материалом и внутренней структурой детали, обычно низкая.

1.2. Области применения технологии

Технология успешно применяется в таких изделиях, как:

1) фурнитура (транспортировочные заглушки, ручки, гайки-барашки, флажки, прижимы, приборные ножки, подставки и держатели для радиоэлементов, декоративные детали и прочее)

2) корпусные изделия (корпуса для радиоэлектронных и механических устройств, различные оболочки, контейнеры, панели и прочее);

3) эргономичные детали (рукоятки, ручки и т.д.);

4) элементы вентиляционных систем (воздуховоды, коллекторы, сопла, фланцы, переходники, прокладки и прочее);

5) элементы кинематических схем (зубчатые, кулачковые, фрикционные передачи и прочее);

6) несущие элементы (угольники, кронштейны, фермы и прочее. Чаще пространственные);

7) технологическая оснастка, в том числе формообразующая;

8) макеты деталей и сборок (например, для оценки собираемости);

9) мастер-модели для заливки и выплавляемые модели.

1.3. Общие положения и условия применения технологии

В ГОСТ Р 59037 [7] описаны общие положения, принципы и этапы конструирования металлических изделий, изготавливаемых аддитивными технологиями. Данные положения, принципы и этапы практически в полном объеме могут и должны быть применены к проектированию изделий, изготавливаемых по технологии FDM. Кроме того, в ГОСТ Р 59037 [7] описаны общие условия для применения аддитивных технологий в проектируемой конструкции.

1.4. Принципы формообразования деталей

Общие принципы при проектировании большинства типов деталей, имеют больше сходств с литьем пластмассовых изделий под давлением, нежели с субтрактивными технологиями изготовления. В частности, подход к проектированию, призванный минимизировать количество обрабатываемых поверхностей детали и упростить геометрию, присущий субтрактивным технологиям, как правило существенно ограничивает потенциал аддитивных технологий производства и область применения деталей, спроектированных таким образом. Пример таких ограничений- невозможность замены детали на аналогичную, выполненную по технологии FDM в конструкции, изначально спроектированной для изготовления традиционными технологиями в следствии того, что классическая конструкция опирается на исходную прочность применяемого материала, тогда как аддитивная технология опирается на оптимизацию внешней геометрии и внутренней структуры детали, например, для достижения высокой удельной прочности и прочности в заданных направлениях приложения нагрузки (добавление сложных ребер жесткости, применение топологической оптимизации и т.д.). Пример минимизации свободного объема детали показан на рисунке 1.

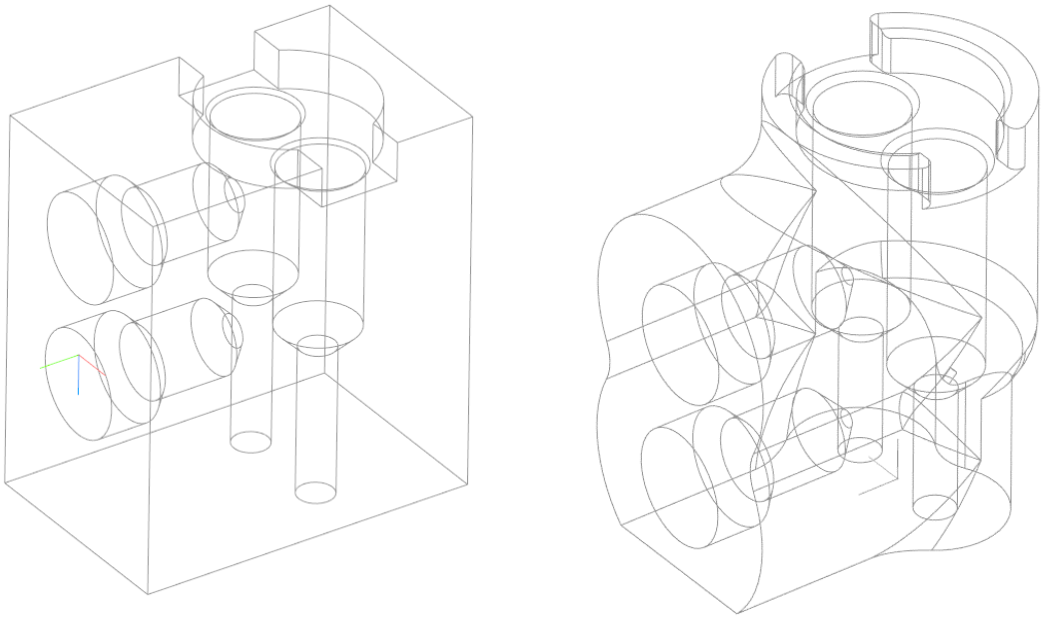
Одно из ключевых преимуществ технологии FDM, на ровне с другими аддитивными технологиями- возможность реализации концепции «бесплатная сложность» (Complexity For Free). Концепция основана на разрешении

проблемы конструкционной сложности путем размещения необходимого количества материала в требуемой области изделия без увеличения материально-временных затрат, что в какой-то мере раскрыто в данном пособии. Краткое описание концепции можно найти в работе [11]

При традиционном проектировании может быть полезен подход, схожий с топологической оптимизацией, т.е. наращивание объема модели детали

между заранее определенными функциональными поверхностями. Такой метод проектирования позволяет исключить лишний объем материала в детали.

Наибольшую выгоду от применения аддитивных технологий возможно получить в новых разработках, для которых изначально предполагается изготовление части деталей таким способом, а ограничения (например, габаритные), связанные с особенностями технологии могут быть решены за счет компромиссов при проектировании сборок.



Исходная конструкция Улучшенная конструкция

Рисунок 1 - Пример оптимизации конструкции для технологии FDM

С другой стороны, при проектировании заведомо объемных деталей, может встать выбор между сохранением объема детали и её тонкостенным аналогом, как принято поступать при литье пластмасс под давлением, например. Возможные варианты конструкции подобной детали показаны на рисунке 2.

В таком случае важно учитывать количество возникающих в тонкостенном исполнении детали нависающих поверхностей, для которых

потребуется затрачивать время и материал на поддерживающие структуры, а также увеличение объема оболочки детали- стенок, дна и крышки.

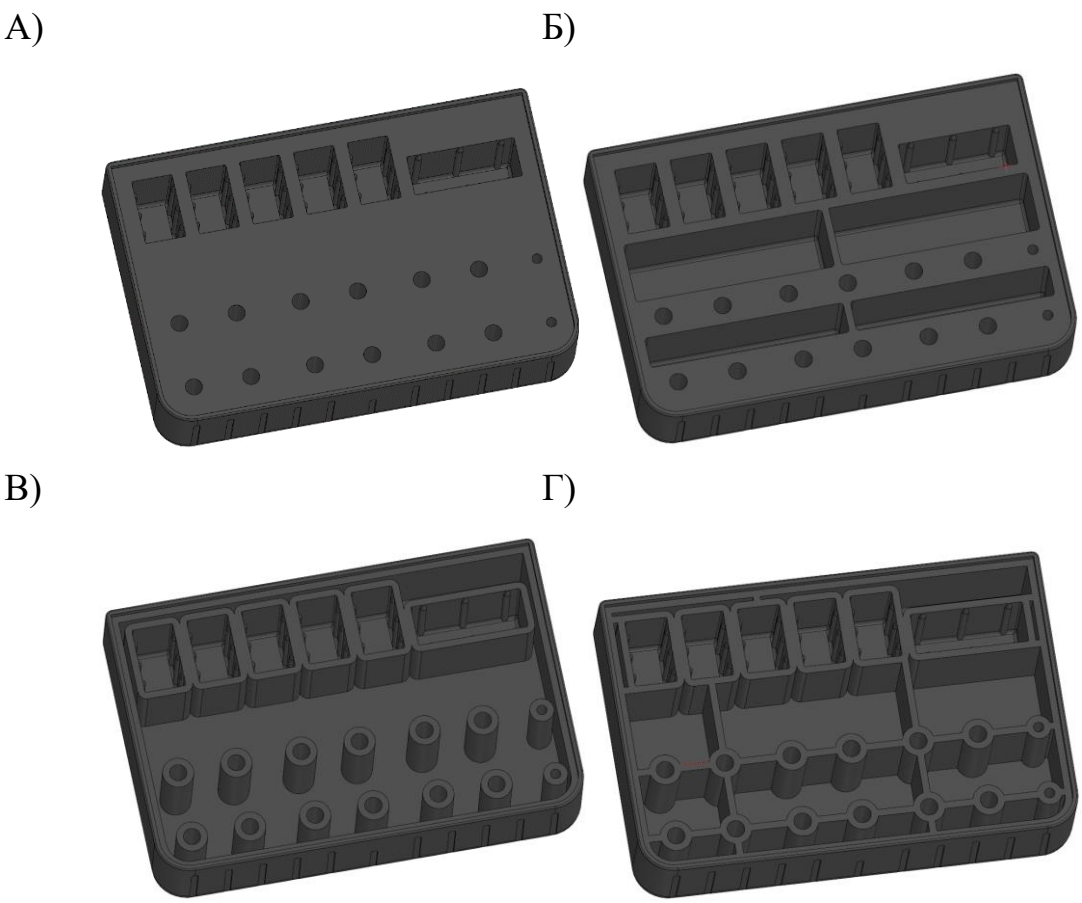


Рисунок 2 - Варианты конструкции подставки для набора технологической оснастки для технологии FDM.

А) свободный объем детали сохранен;

Б) свободный объем детали уменьшен с помощью дополнительных обнижений;

В) свободный объем полностью вычтен из детали;

Г) свободный объем полностью вычтен из детали, функциональные элементы усилены ребрами жесткости.

На рисунке 2 видно, что ни один вариант конструкции подставки для набора технологической оснастки не требует поддерживающих структур. При этом вариант А с сохранением свободного объема является оптимальным с точки зрения сочетания технологичности, прочности и эргономичности при

заполнении детали 15%. Относительно варианта А, вариант Б с уменьшением свободного объема с помощью не функциональных обнижений, будет изготавливаться на 13% дольше и потребует на 2% больше материала за счёт увеличения объема оболочки. Вариант В, с полностью вычтенным свободным объемом будет изготовлен на 4% быстрее, а выигрыш в материале составит значительные 35% за счёт полного отсутствия заполнения и крышки, однако и прочность тонкостенных бобышек без крышки значительно упадет и эргономичность детали снизится. В случае, когда внешний вид крышки не имеет значения, наиболее технологичным вариантом изготовления может стать вариант Г, усиленный ребрами жесткости. Такой вариант исполнения детали потребует на 3% больше машинного времени на изготовление, чем вариант А, но позволит сэкономить 30% материала.

Важно отметить, что при изготовлении детали по технологии FDM любого объема и сложности, значительно изменяется машинное время изготовления, тогда как время оператора 3D-принтера остаётся практически неизменным (около 0,5 нормачаса на цикл печати для одной или нескольких деталей, изготавливаемых совместно).

Для приблизительной оценки технологичности детали достаточно использования умозрительного подхода (базовые сведения для такой оценки содержатся в данном пособии). Для выбора оптимальной конструкции следует сравнивать данные о времени и материалоёмкости возможных вариантов изделия в процессоре САП с учётом их внутренней структуры. Дополнительно улучшить технологичность на стадии проектирования детали (без использования процессора САП) возможно при применении эволюционного метода проектирования пустотелой модели с желаемой толщиной оболочки.

2. Определение поверхности построения

На начальном этапе конструирования следует определить поверхность построения.

Поверхность построения для детали- плоскость, прилегающая в процессе изготовления к платформе построения, с которой наращивается вся деталь. Система координат модели для деталей, изготавливаемых по технологии FDM и наименования её поверхностей и структур описаны на рисунке 3.

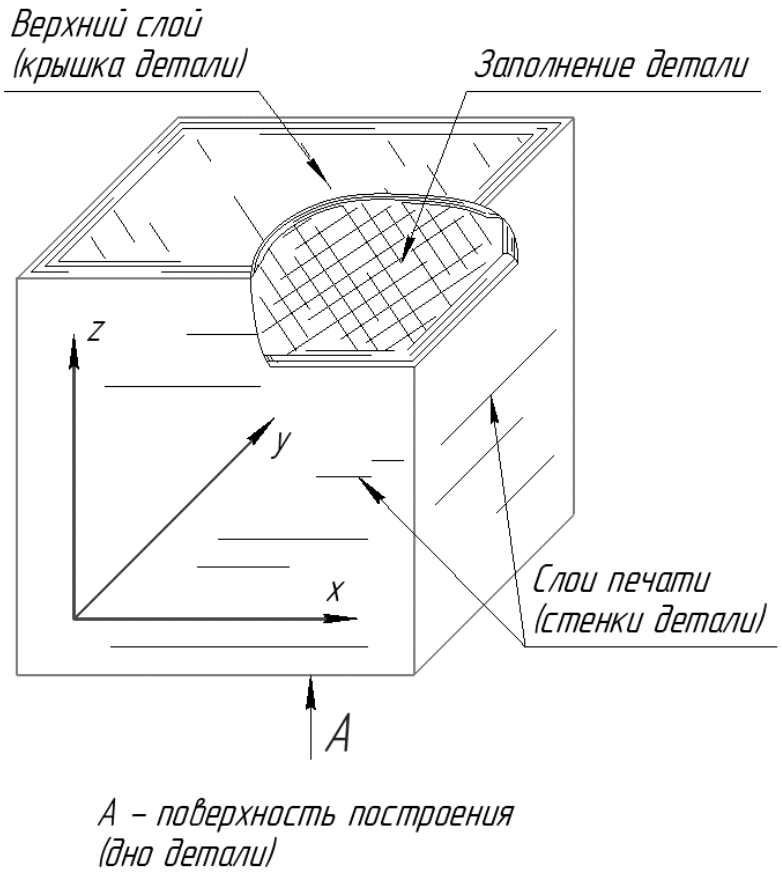


Рисунок 3 - Система координат модели для FDM и наименования её поверхностей и структур

В идеальном случае поверхностью построения выбирается наибольшая плоскость детали, при этом остальные поверхности детали не должны нависать над платформой построения под углом более 45° (угол 45° для нависающих поверхностей здесь и далее указан как базовый. Реальный угол

нависания, который возможно изготовить, зависит от используемого материала, оборудования и качества подготовки производства, однако рекомендуется, если возможно, не отступать от него в целях обеспечения возможности изготовления детали на наибольшем количестве 3d-принтеров).

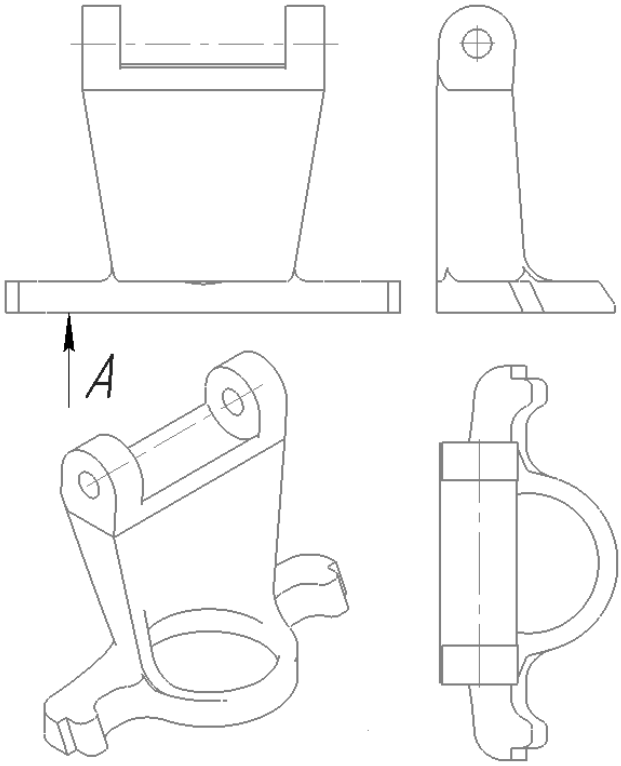


Рисунок 4 - Деталь, спроектированная для изготовления по технологии FDM.

А- поверхность построения.

Деталь, показанная на рисунке 4 спроектирована таким образом, чтобы построение происходило от наибольшей плоскости, остальные поверхности детали расположены так, чтобы не нависать над поверхностью построения под большим углом. Исключением являются отверстия, часть поверхности которых является нависающей. В цилиндрических отверстиях с диаметром до 10-20 мм (в зависимости от толщины слоя и ширины линии), ось которых параллельна поверхности построения, нависания ухудшают качество детали незначительно, поэтому ими в большинстве случаев можно пренебречь.

В случае, когда проектируемая деталь не соответствует идеальным условиям, следует выбирать поверхность построения таким образом, чтобы объем поддерживающих структур был минимальным. Объем поддерживающих структур, как показано на рисунке 5, зависит от площади проекции (l*b) нависающих под углом более 40° от поверхности построения поверхностей и высоты этих поверхностей (h1, h2). Следует также учитывать, что поддержки, располагаемые в труднодоступных местах детали более трудоемки при слесарной обработке. Поддерживающая структура, расположенная у внешней поверхности детали гораздо более проста для удаления, чем структура, окруженная поверхностями детали (расположенная в отверстии или в пазе). Наиболее сложны для удаления структуры поддержки, сечение которых больше, чем сечение отверстия, через которое их предполагается извлекать.

Сокращение площади поддерживаемых поверхностей с помощью уклонов, фасок и радиусов позволяет увеличить технологичность в тех случаях, когда добавляемый ими объем материала меньше объема поддерживающих структур.

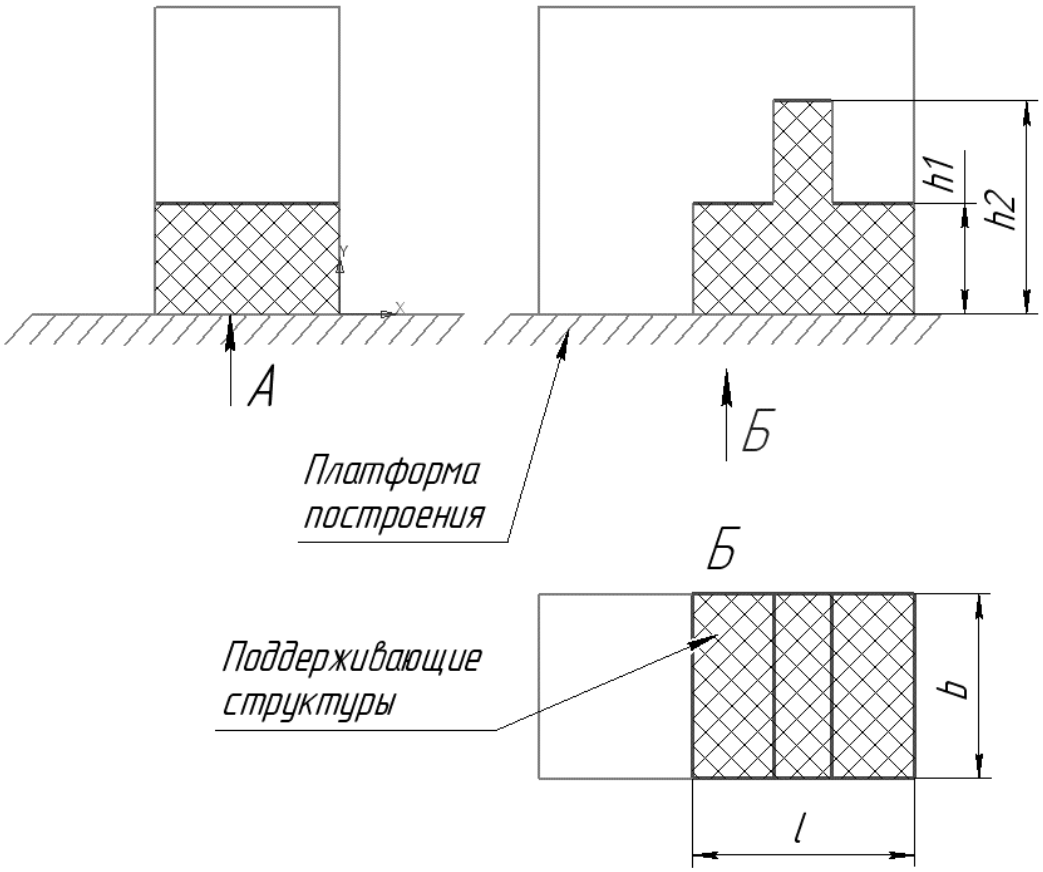


Рисунок 5 - Объем и расположение поддерживающих структур

Элементы малых сечений, таких как бобышки диаметром менее 4 мм, тонкие решетки, и прочие, рекомендуется по возможности располагать вдоль осей «X», «Y» или заменять их отдельными деталями, устанавливаемыми с натягом или на клеевое соединение.

Кроме этого, при выборе поверхности построения следует учитывать анизотропность свойств изделий, изготовленных по технологии FDM. Например, прочность детали на разрыв при приложении нагрузки по оси «Z» значительно ниже прочности при приложении нагрузки вдоль осей «X», «Y» из-за меньшей по сравнению с исходным материалом прочности межслоевых соединений. Наибольшая прочность детали в общем случае достигается при деформации вдоль линий печати.

Поверхность построения рекомендуется указывать в КД на деталь, кроме случаев, когда она является очевидной или безразличной.

3. Оформление кромок и тонких стенок

3.1. Оформление кромок на поверхности построения

Поверхность построения детали как правило оформляют по периметру фаской 0,5х45 или больше. Такое решение обусловлено тем, что первые слои детали могут быть деформированы под влиянием температуры стола и из-за разной фактической толщины первого слоя печати, образовывая локальное расширение слоёв дна детали (наплыв), как показано на рисунке 6.

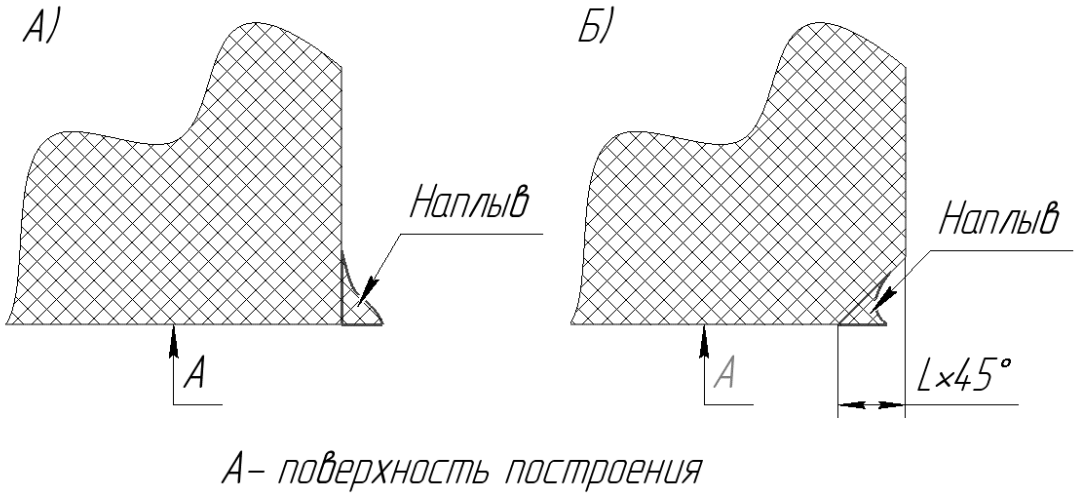


Рисунок 6 - Наплыв материала по периметру первых слоёв детали.
А) без фаски. Наплыв может выходить за предельные размеры детали;
Б) с фаской. При возникновении наплыва, он находится в области фаски, не выходя за предельные размеры детали. При необходимости легко удаляется механически.

При оформлении таких кромок радиусами, нижняя часть радиуса должна быть дополнена фаской под углом 45° таким образом, чтобы поверхность, образованная радиусом, не нависала над поверхностью построения на угол больше 45°, как показано на рисунке 7.

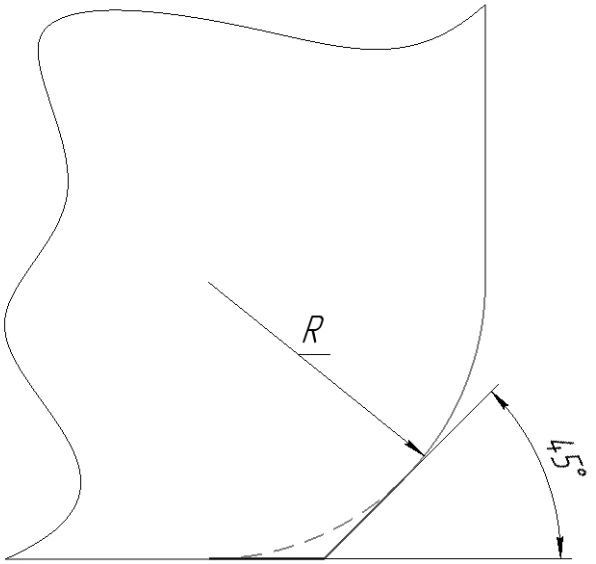


Рисунок 7 - Скругление углов, образованных поверхностью построения при изготовлении деталей методом 3D-печати.

3.2. Оформление кромок на поверхностях стенок

Вертикальные кромки на поверхности стенок как правило оформляют радиусом. Радиусы, выполненные в модели, позволяют изготавливать более точные детали с лучшей прочностью и лучшим качеством поверхностей. В общем случае рекомендуется применять радиусы 1-3 мм в зависимости от размеров детали и сопла 3D-принтера. При возможности рекомендуется увеличивать радиусы, если это не вредит функциональности детали.

Радиусы размером менее одного диаметра сопла (в общем случае менее 0,5 мм) можно не моделировать, т.к. на изготовленной детали наличие или отсутствие такого радиуса в модели практически не различимы, однако такие углы могут выходить за предельные размеры детали в связи с особенностями технологии FDM, как показано на рисунке 8. Причинами возникновения радиуса на внешних углах детали является усадка материала и способ его нанесения (см. рисунок 9).

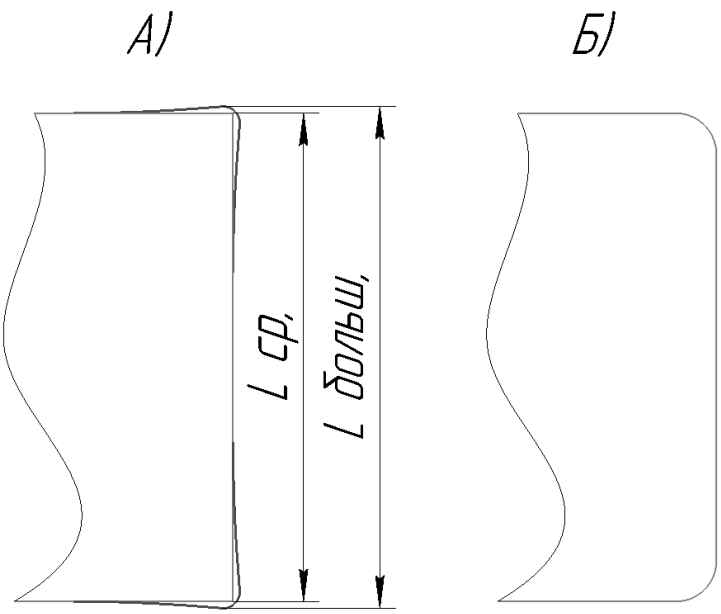


Рисунок 8 – Деформация углов на стенках детали

А) не скругленные в модели углы детали вызывают локальное увеличение размера Lср (средний размер между стенками) до размера Lбольш.;

Б) скругленные в модели углы не вызывают значимой деформации ввиду более плавного изменения скорости и направления сопла при печати линий стенки.

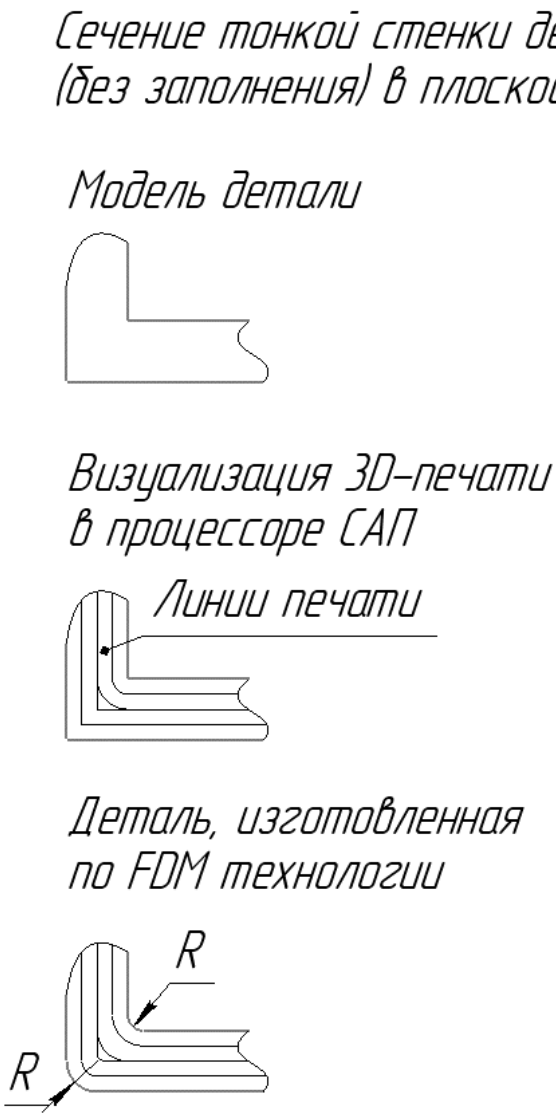


Рисунок 9 - образование радиусов в углах стенок детали в следствии усадки материала.

При проектировании сопрягаемых деталей для посадки с минимальным зазором или без него (см. рисунок 10), рекомендуется выполнять радиусы на соприкасающихся гранях.

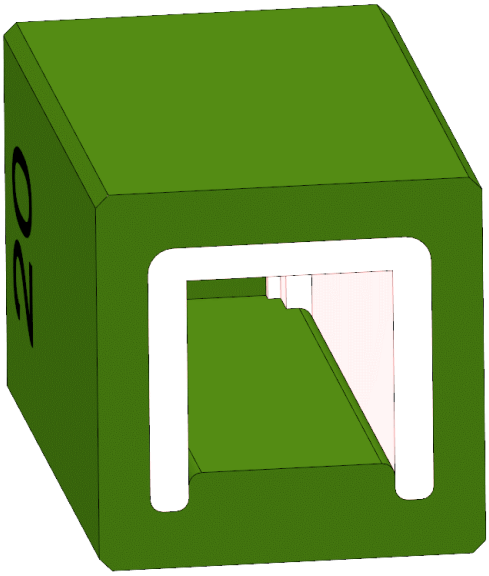


Рисунок 10 - Пример скругления углов в конструкции сопрягаемых деталей.

3.3. Оформление кромок на поверхностях крышек

Оформление горизонтальных кромок крышек обычно не оказывает существенного влияния на характеристики детали. При изготовлении детали без радиусов или фасок на поверхности крышки, фактический выполненный радиус будет приблизительно равен половине толщины слоя.

3.4. Проектирование тонких стенок

Тонкая стенка- это стенка, к которой не прилегает структура заполнения. Например, для сопла диаметром 0,4 мм при 4 линиях стенки, любая стенка толщиной менее 3,2 мм (0,4 мм*(4+4)) будет являться тонкой. При толщине более 3,2 мм стенка будет состоять из двух стенок толщиной 1,6 мм, между которыми будет находиться заполнение. Наглядно структура слоя детали с тонкими стенками и без них продемонстрирована на рисунке 11. Стандартные значения количества линий стенки- от 3 до 8 в зависимости от нагруженности детали и диаметра сопла.

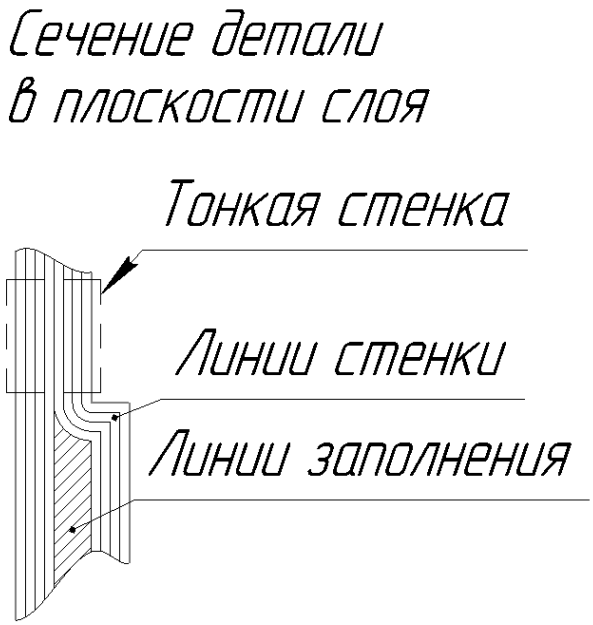


Рисунок 11 - Визуализация тонкой стенки и стенок с заполнением.

Тонкие стенки рекомендуется проектировать равнотолщинными там, где это возможно, во избежание появления дополнительных дефектов печати и ослабления конструкции. Равномерная толщина тонких стенок, как видно на рисунке 12, позволяет выполнять их замкнутыми линиями, что обеспечивает наибольшую прочность.

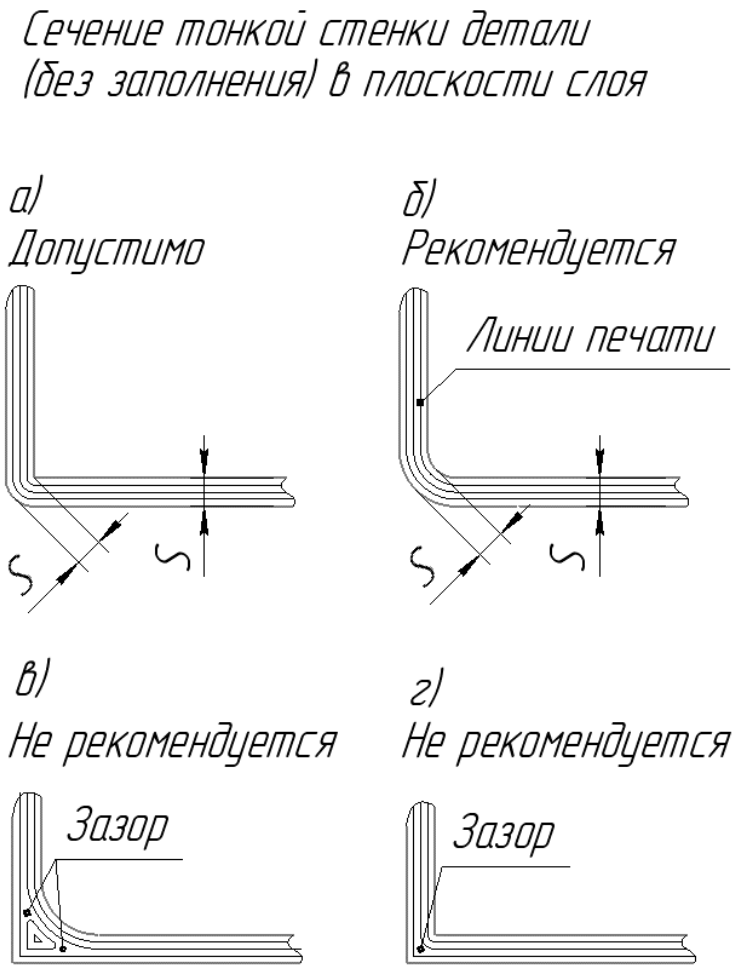


Рисунок 12 - форма углов тонких стенок.

А) равномерная толщина стенок;

Б) равномерная толщина стенок, дополнительное скругление угла;

В) зазор между линиями стенки, ослабляющий конструкцию;

Г) зазор между линиями стенки, ослабляющий конструкцию.

При наличии на тонкой стенке локального утолщения, как в показано на рисунке 13а, сглаживание вновь возникающих углов (рисунок 13б) или соблюдение равной толщины стенки (рисунок 13в) могут позволить получить более прочную или технологичную деталь соответственно.

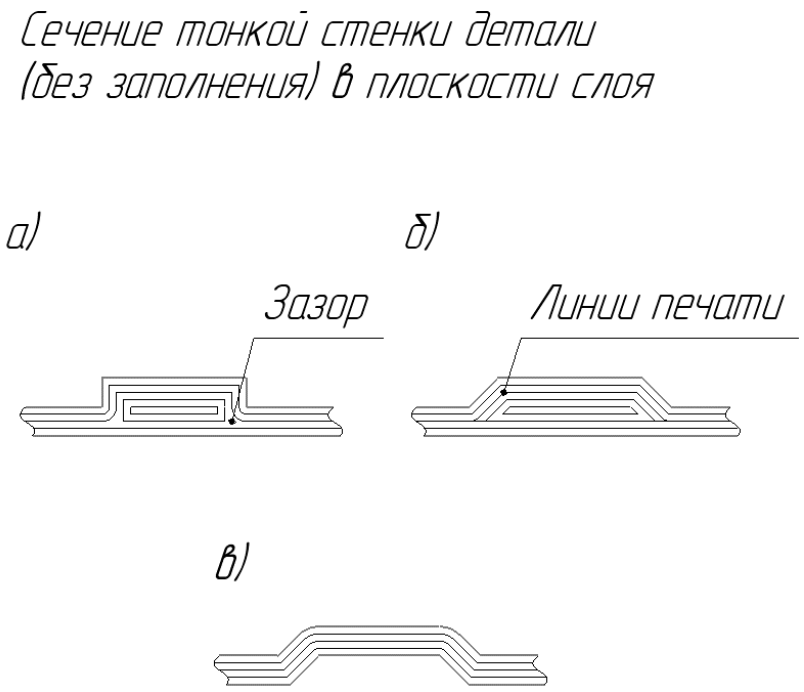


Рисунок 13 - локальное утолщение тонкой стенки.

А) зазор между линиями стенки, ослабляющий конструкцию;

Б) небольшие зазоры между линиями стенки, но повышенная прочность на разрыв силой, направленной вдоль стенки;

В) равномерная толщина стенок, наименьшее количество материала.

При проектировании крепежных отверстий, расположенных вертикально в системе координат 3D-принтера, их расположение вблизи стенки может значительно повысить несущую способность, особенно при заполнении детали менее 100%. Стенки таких отверстий будут прочно связаны с внешними стенками детали по всей высоте детали, а не только в дне и крышке. В таких случаях ось радиуса внешней стенки детали должна совпадать с осью крепежного отверстия. Полученная таким образом тонкая стенка должна быть по возможности равнотолщинной, как показано на рисунке 14.

Такой подход можно использовать не только для цилиндрических отверстий, но и для любых близкорасположенных вертикальных элементов модели, которые можно укрепить, исключив наличие заполнения между ними.

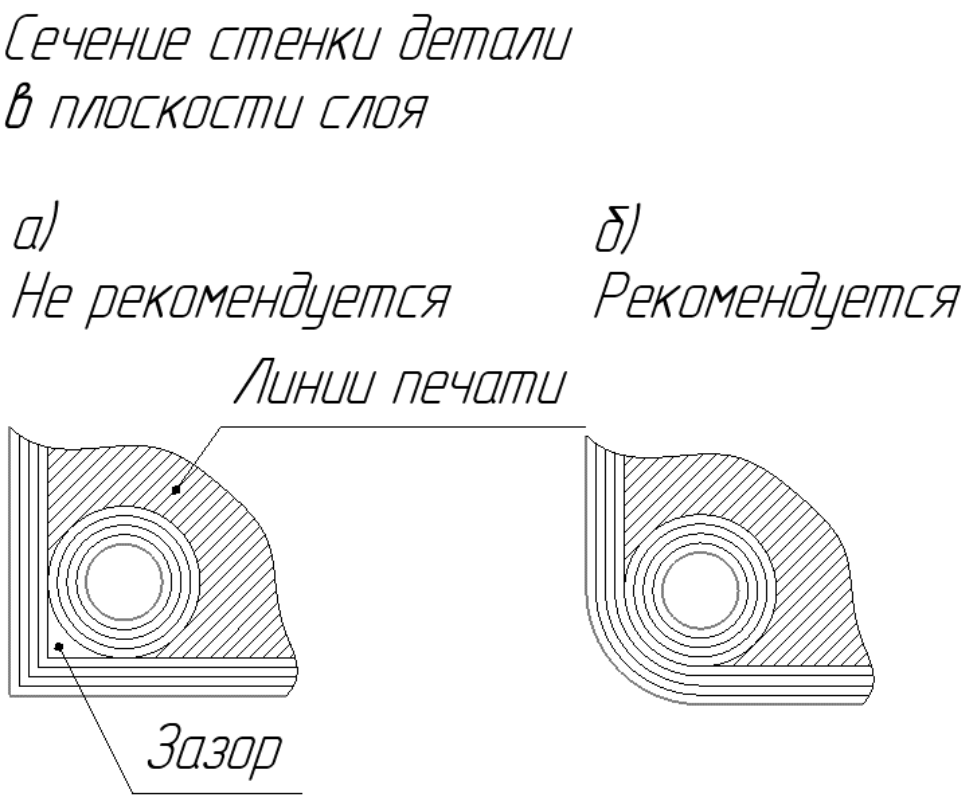


Рисунок 14 - Стенки детали с расположенным в углу вертикальным отверстием.

А) зазор между линиями стенки, ослабляющий конструкцию;

Б) за счёт оформления угла соответствующим радиусом, между ним и отверстием образуется тонкая стенка без зазора, стенка отверстия прочно соединяется с внешней стенкой детали.

В случае, если деталь имеет тонкие стенки и связанные с ними элементы, как на рисунках 13б, 14б, рекомендуется указывать толщину стенок детали в КД.

4. Точность и минимально возможные элементы

4.1. Точность линейных размеров

При правильной подготовке производства, соблюдении технологических режимов и данных рекомендаций, для большинства поверхностей деталей точность изготовления соответствует H12, h12, IT12/2 по ГОСТ 30893.1 [6]. На практике, отклонения от заданной точности чаще всего проявляются на размерах менее 5мм (особенно на размерах, близких к минимально возможным для изготовления), на поддерживаемых поверхностях при изготовлении поддерживающих структур из того же материала, что и деталь, на неподдерживаемых нависающих поверхностях, на крупных деталях из материалов с высокой усадкой. Точность поверхностей, обрамленных острыми углами как правило будет снижена, как описано в разделе 3.2.

Горизонтальные цилиндрические отверстия на изготовленных деталях практически всегда имеют овальность, вызванную нависанием части поверхности отверстия над поверхностью построения. Такие отверстия для достижения требуемой точности могут быть развернуты при постобработке согласно КД или ТД.

Примечание. Для технологии FDM характерны двухсторонние симметричные отклонения от номинального размера. Для достижения односторонних отклонений по H12, h12 требуется отработка режимов изготовления деталей на имеющемся оборудовании в процессоре САП.

4.2. Минимальный размер отдельно стоящего элемента

Минимальный размер элемента в теории представляет собой цилиндр с высотой, равной 0,05 мм и диаметром, равным диаметру сопла (устоявшийся размерный ряд диаметров сопел, применимый для 3D-принтеров для технологии FDM- 0,4;0,6;0,8 мм. Для отдельных задач применяются сопла диаметром от 0,1 до 1,5 мм). На практике качественное изготовление такого

элемента не достижимо в следствии особенностей нанесения материала (технологии FDM) и алгоритмов работы процессоров САП для 3D-печати.

Деталь при печати представляет собой набор линий, как прямых, так и изогнутых. Заполнение некоторых областей «точками» применяется процессорами САП, но, как правило, с ухудшением качества поверхности, т.к. завершением нанесения каждой линии является процедура «отката» материала внутрь сопла для холостого перемещения печатающей головки к месту нанесения следующей линии. При откате часть возвращаемого в сопло материала остается над концом напечатанной линии в виде вытянутой нити (паутины), а начало следующей нити может быть напечатано с небольшим недостатком материала, что приводит к различным дефектам поверхности. Таким образом, в области, где близко расположены подобные «точечные» элементы, происходит накопление дефектов. Такие дефекты частично нивелируются тонкой настройкой параметров печати в процессоре САП, но полностью избавиться от них обычно не представляется возможным. Некоторые сочетания геометрии с элементами, близкими к минимальным невозможно качественно изготовить. Пример такой геометрии показан на рисунках 15, 16.

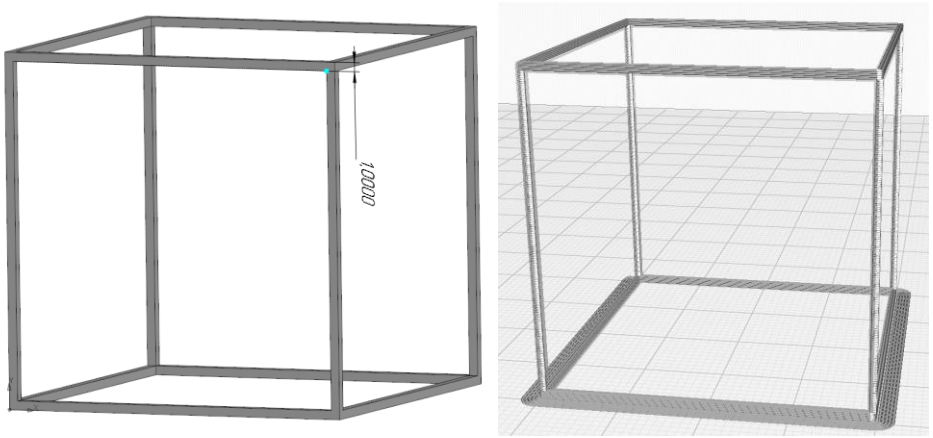


Рисунок 15 - Пример детали, которую несмотря на теоретическую возможность изготовления, невозможно качественно изготовить на практике.

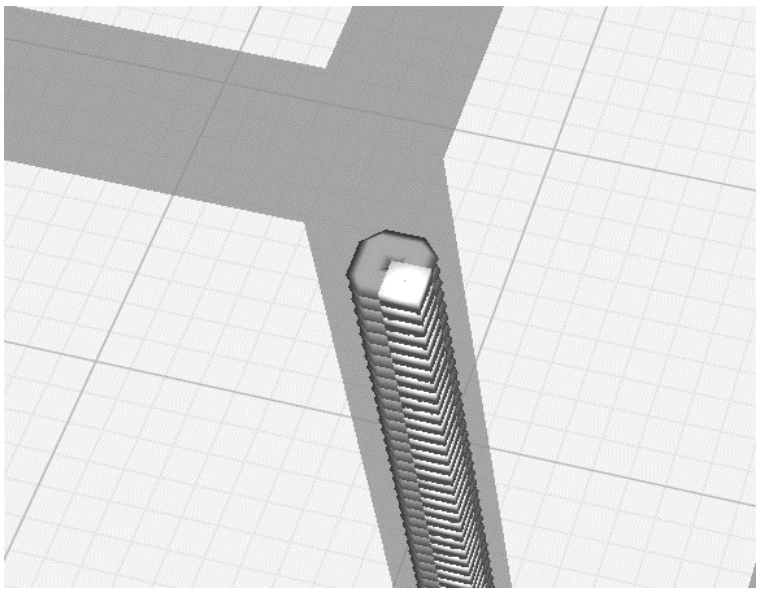


Рисунок 16 - Сечение одной из колонн куба (белые квадраты- начало и конец линии на каждом слое)

4.3. Минимальный размер рельефа стенки

Элементы геометрии, расположенные на вертикальных поверхностях детали (стенках), близкие к минимальным выполнимым размерам (рельефный текст, имитация накатки и т.д.) при изготовлении будут сглажены за счёт усадки при охлаждении материала так же, как и углы. На рисунке 17 приведен пример того, как выглядят подобные элементы в модели, в процессоре САП и в изготовленной детали.

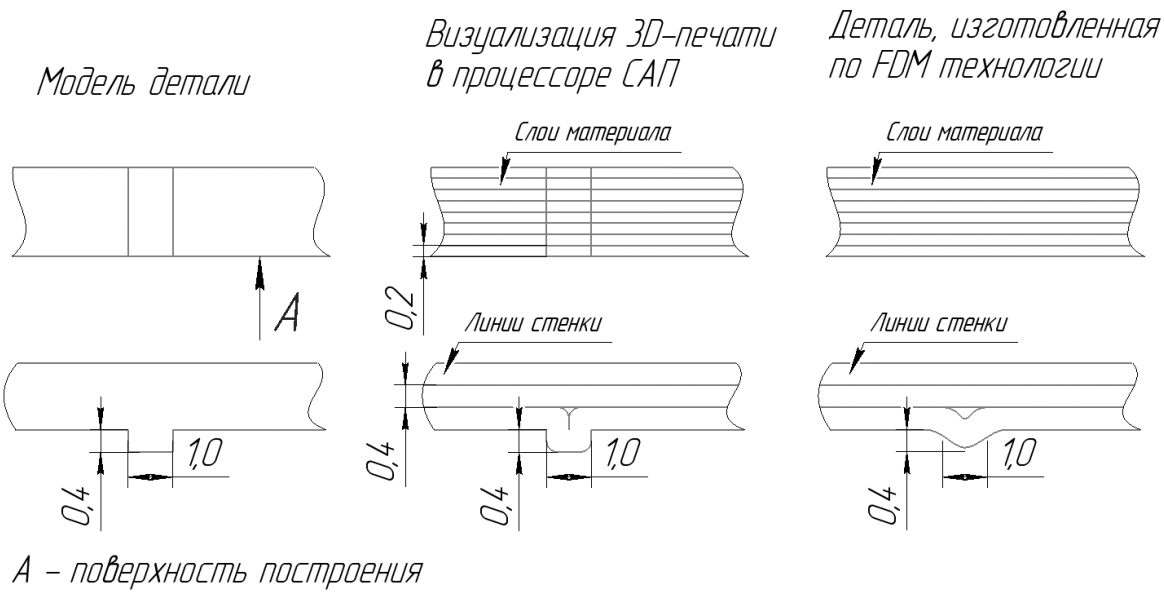


Рисунок 17 - Сглаживание элементов, близких к минимальным при изготовлении деталей методом 3D-печати (для примера применено сопло диаметром 0,4 мм)

При выполнении вертикальных углублений (пазов) на поверхностях стенки, их минимальная ширина для различимости после изготовления детали по технологии FDM должна быть от одного диаметра сопла или более. Уверенно различаются углубления шириной от двух диаметров сопла. Это правило распространяется и на минимальный зазор между двумя отдельно стоящими параллельными стенками детали. Ширина выступа должна быть не менее двух диаметров сопла. Допустимая геометрия пазов на поверхности стенок показана на рисунке 18.

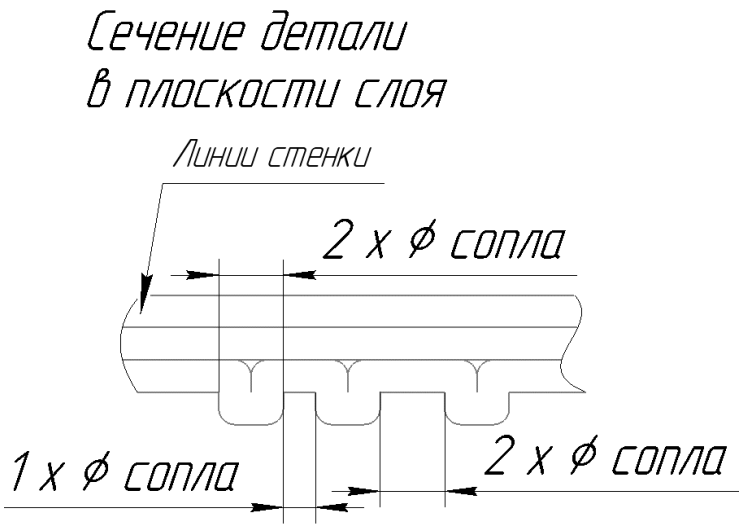


Рисунок 18 - Минимальная и рекомендуемая минимальная ширина вертикального паза в стенке детали, минимальная ширина выступа.

4.4. Минимальный размер рельефа дна/крышки

Минимальный размер рельефа крышки зависит от высоты слоя, с которым выполнена деталь. В общем случае толщина слоя составляет 0,5 диаметра сопла, но может быть уменьшена вплоть до 0,05 мм в обоснованных случаях, либо увеличена до 0,75 диаметра сопла при изготовлении не функциональных макетов или аналогичных им деталей. Рельеф, имеющий глубину меньше толщины слоя будет потерян при изготовлении детали.

Следует учитывать, что уменьшение толщины слоя пропорционально увеличивает время изготовления детали.

Наклонные относительно поверхности построения и криволинейные поверхности, как видно на рисунках 19, 20, будут выполнены со ступенями, образованными слоями материала. Такие поверхности обычно имеют наибольшую шероховатость во всей детали.



Рисунок 19 - Шероховатость криволинейной поверхности при изготовлении деталей методом 3D-печати

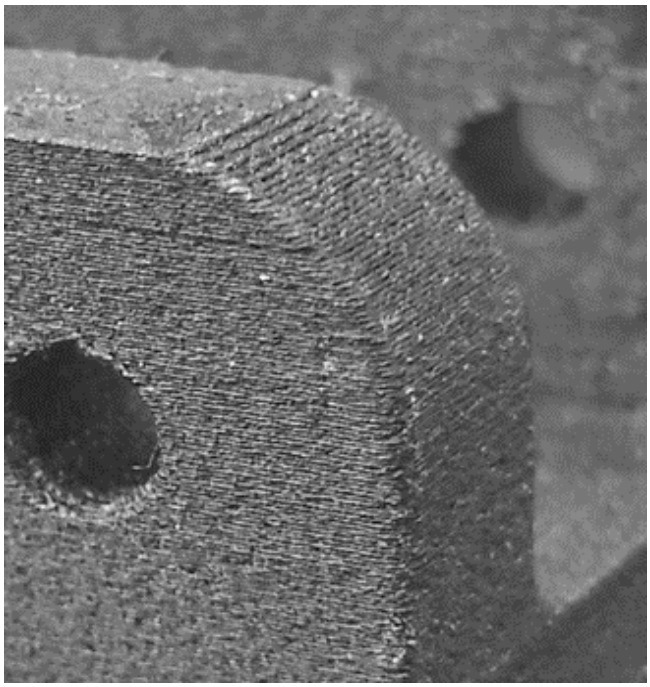


Рисунок 20 - Пример шероховатости криволинейной поверхности при изготовлении деталей методом 3D-печати

При выполнении горизонтальных углублений (пазов) или выступов на поверхностях крышки и дна, их минимальная ширина для различимости после

изготовления детали по технологии FDM должна быть не менее одного диаметра сопла, а глубина не менее одной толщины слоя.

Длина углублений должна быть не менее одного диаметра сопла, а длина выступа не менее пяти диаметров сопла.

5. Отношение объема детали к размеру её наименьших элементов

При конструировании важно учитывать соотношение объема детали к наименьшим её элементам, т.к. наименьший размер элементов детали напрямую связан с диаметром сопла, которым целесообразно её изготавливать. Например, при необходимости выполнить в операции 3D-печати вертикальную резьбу с шагом 1 мм, деталь должна быть изготовлена с толщиной слоя 0,1-0,2 мм, чтобы на виток резьбы приходилось как минимум 5 слоёв. При наличии вертикальной стенки толщиной 1 мм, деталь должна быть выполнена соплом с диаметром отверстия не более 0,4 мм.

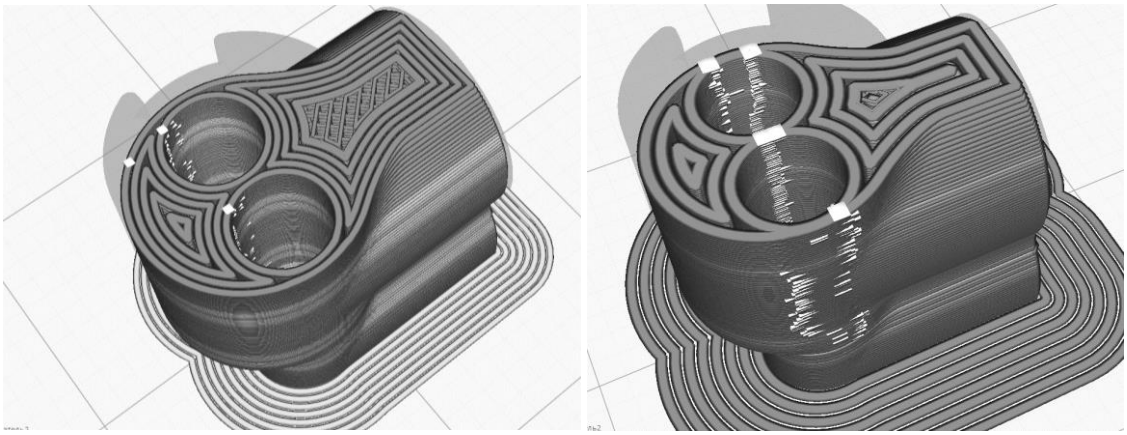


Рисунок 21 - Верное и неверное сочетание диаметра сопла и толщины стенки. Внешняя и внутренняя стенки замкнуты.

Как видно на рисунке 21, внешняя и внутренняя стенки при неверном сочетании диаметра сопла и толщины стенки сливаются в одну. Белые квадраты на рисунке обозначают прерывание подачи материала из сопла. Подобные короткие отрезки толщиной в одну линию не могут быть качественно изготовлены, тонкая стенка будет иметь низкое качество поверхности и не будет герметична.

Толщина тонких стенок, кроме обоснованных случаев, должна быть не меньше 2,5 диаметров сопла. Предпочтительная толщина- 3,5 диаметра сопла (3 линии). Прибавка в 0,5 диаметра как правило необходима для правильного

распознавания стенки процессором САП и возможности регулировать компенсацию усадки материала.

Обоснованным случаем применения стенки толщиной в 1 линию являются различные кожухи, сосуды и другие детали, имеющие замкнутую и непрерывную внешнюю поверхность без критичных нависаний. Такие детали могут быть изготовлены спиральной печатью стенки без заполнения. К преимуществам такого способа печати относится отсутствие швов, т.к. нить подается непрерывно. Часто в таких случаях применяются сопла большого диаметра, а ширина линии может даже превышать его, создавая прочную и герметичную непрерывную стенку. К недостаткам способа можно отнести ограничения в геометрии детали, которую можно изготовить непрерывной подачей материала по спирали.

6. Особенности проектирования типовых элементов деталей

6.1. Резьба

Выполнение резьбы в операции 3D-печати рекомендуется в том случае, если:

-шаг резьбы не меньше 1 мм (для сопел диаметром 0,4-0,6 мм.);

-номинальный диаметр резьбы не меньше 10 мм (для сопел диаметром 0,4мм);

-ось резьбового отверстия расположена перпендикулярно поверхности построения или близка к этому.

- к резьбе не предъявляются жесткие требования согласно ГОСТ, например, ГОСТ 24705 [8].

Резьба, выполненная в операции 3D-печати всегда будет менее прочной, чем нарезанная при механической обработке за счёт влияния слоистости и дефектов печати. Нарезанная резьба при изготовлении наоборот уплотняет материал.

При проектировании детали с резьбой для изготовления по технологии FDM, необходимо выполнять резьбу в 3D модели детали.

В КД рекомендуется такую резьбу не обозначать или обозначать для справки, как спиральную поверхность определенного сечения.

Для обеспечения и проверки качества резьбы, рекомендуется указывать в технических требованиях чертежа необходимость проверки резьбы инструментом, например:

*«Размер * проверить инструментом на соответствие М20х2,5 по ГОСТ 8724-2002»*

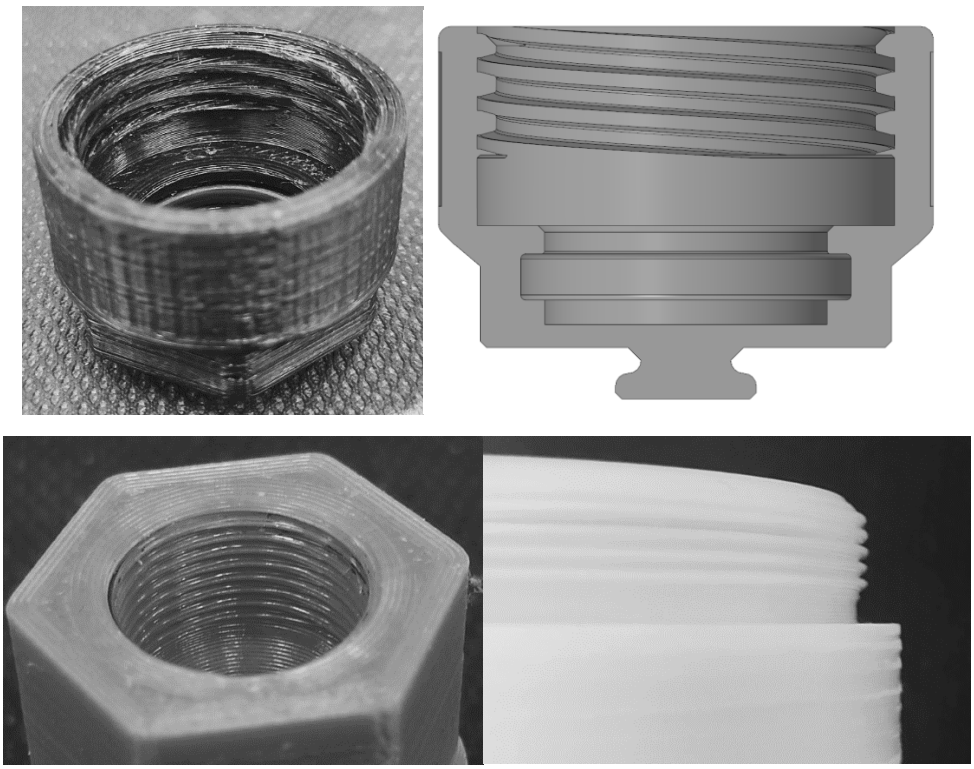


Рисунок 22 - пример выполнения резьбы в деталях, изготовленных по технологии FDM.

6.2. Механизмы запирания

Механизмы запирания могут быть выполнены как лабиринты, байонет и т.д.

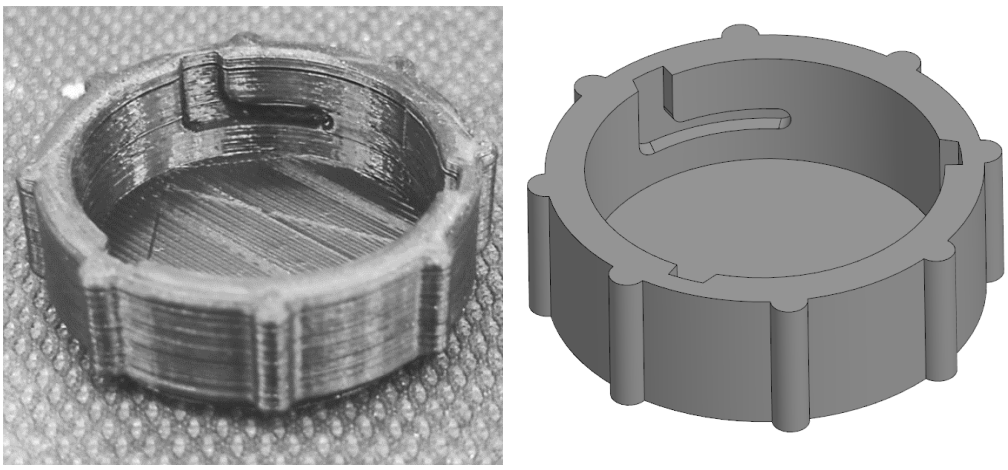
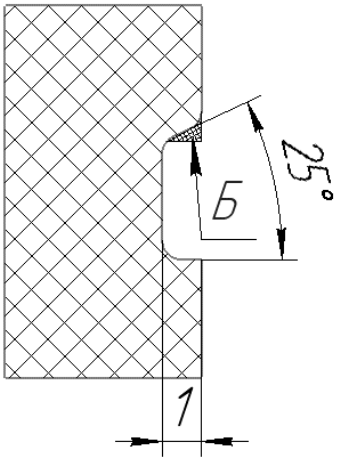


Рисунок 23 - Пример исполнения заглушки байонетного разъема по технологии FDM.

При проектировании неглубоких пазов в труднодоступных для постобработки местах, как на рисунке 23, рекомендуется выполнять нависающие поверхности паза под небольшим углом, который не повлияет на прочность замка, а грани паза оформлять минимальными радиусами. Таким образом можно изготавливать пазы до 1-2мм глубиной (в зависимости от сечения и длины паза) без использования поддерживающих структур, т.к. площадь нависающей поверхности уменьшается за счёт радиусов и угла наклона верхней поверхности паза, а провисающие нити будут расположены в допустимой области, не мешая сочленению деталей. Пример сечения паза показан на рисунке 24.



Неуказанные радиусы R0,5 мм.
Б – область, в которой допустимо провисание нитей.

Рисунок 24 - Пример сечения паза для заглушки байонетного разъема.

При проектировании пазов полукруглого сечения, например, под уплотнительное кольцо, как на рисунке 25, достаточно выполнить фаску по касательной к радиусу под углом 40° или более. Предполагается, что под нависающей поверхностью паза так же есть некоторое пространство, в котором допустимо провисание нитей без ущерба работоспособности детали.

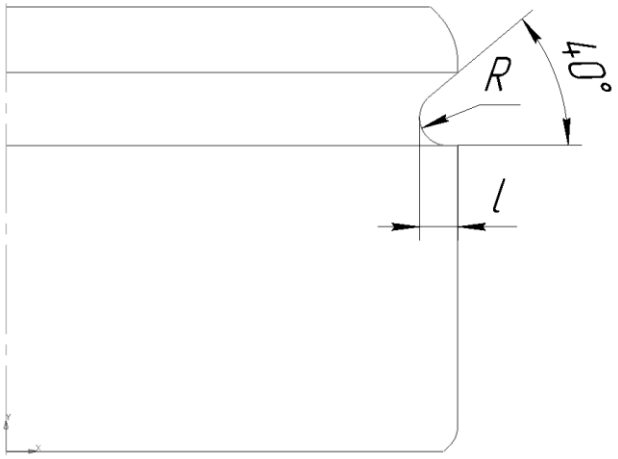


Рисунок 25 - Пример оформления круговой канавки под уплотнительное кольцо.

При проектировании замков с упругим элементом, как на рисунке 26, должна быть учтена ориентация детали при изготовлении. Крючок с длинной стороной, перпендикулярной слоям материала до двух раз более хрупкий, чем материал. Подавляющее большинство материалов при подобной нагрузке ведут себя как хрупкие (удлинение на разрыв слоёв 1-5 %). Такие крючки лучше конструировать с несколько большим сечением и длиной. Глубина вхождения упругого элемента в ответный паз должна быть не слишком большой- обычно 0,4-0,8 мм.

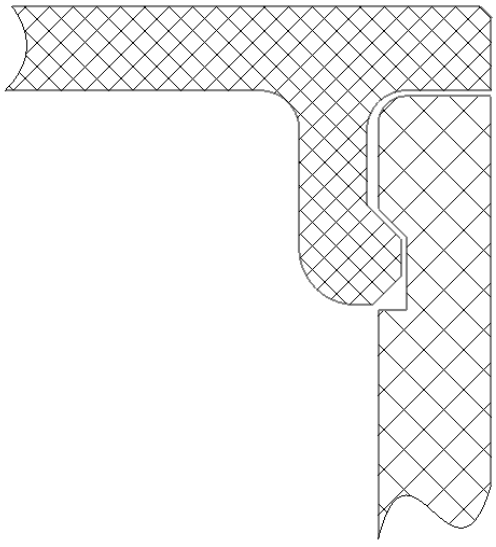


Рисунок 26 - Пример замкового соединения с упругим элементом

6.3. Оребрение

Использование ребер, как на рисунке 27, позволяет повысить жесткость детали на изгиб и скручивание. При не полном заполнении детали, внутри нее так же образуется каркас из множества ребер (заполнение детали), но их толщина равна диаметру сопла (либо до полутора диаметров), что может быть недостаточно. При изготовлении детали по технологии FDM возможно располагать ребра жесткости внутри тела детали, вырезая в ней полости. Пример детали со скрытыми ребрами показан на рисунке 28. Такие ребра будут работать, как и обычные, но будут закрыты плоскостями со всех сторон.

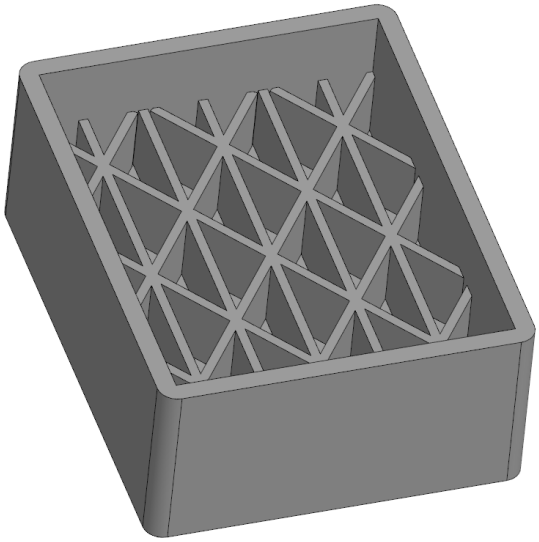


Рисунок 27 - Открытое расположение ребер в детали.

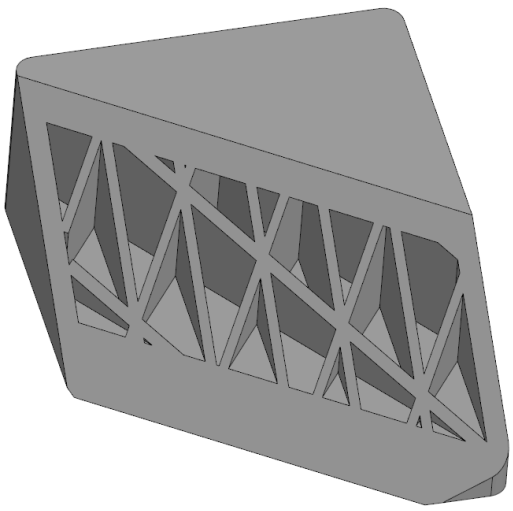


Рисунок 28 - Скрытое расположение ребер (сечение детали).

6.4. Косынки

При проектировании отдельно стоящей пустотелой бобышки, как на рисунке 29, целесообразно применять усиливающие косынки. При изготовлении детали с отверстием в объемной части, можно вычитать косынки из детали, получая «негатив» с теми же свойствами, как у бобышки (рисунок 30).

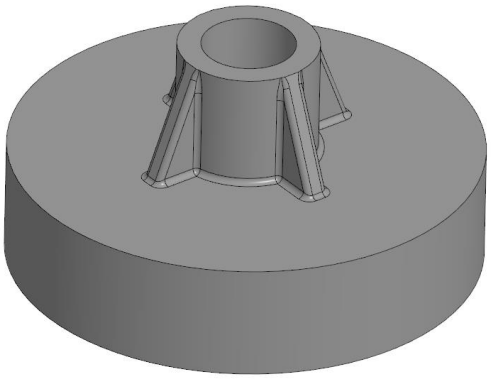


Рисунок 29 - Пустотелая бобышка с усиливающими косынками.

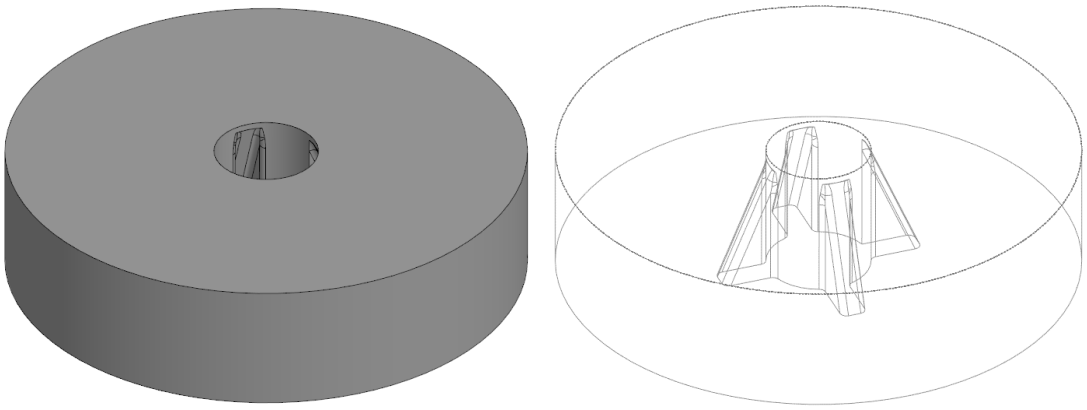


Рисунок 30 - Отверстие, выполненными аналогично пустотелой бобышке с косынками.

6.5. Нагруженные консольные элементы

При проектировании консольных элементов, как выступающие за общий габарит опоры корпуса на рисунке 31, следует по возможности укреплять их косынками или скруглениями, как показано на рисунке 32. Такое оформление, кроме прочего, распределяет нагрузку на большее количество слоёв, и уменьшает рычаг между местом приложения силы и концентратором напряжений, находящимся в соединении слоёв выступающего элемента и основной части корпуса.

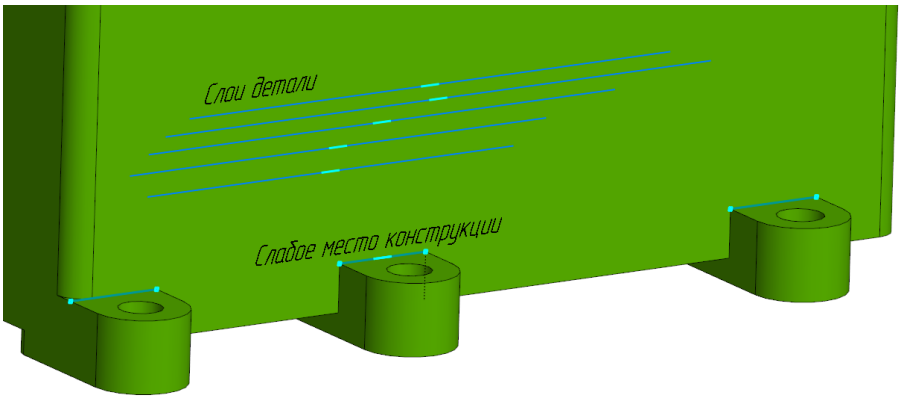


Рисунок 31 - Пример неверной конструкции консольных опор.

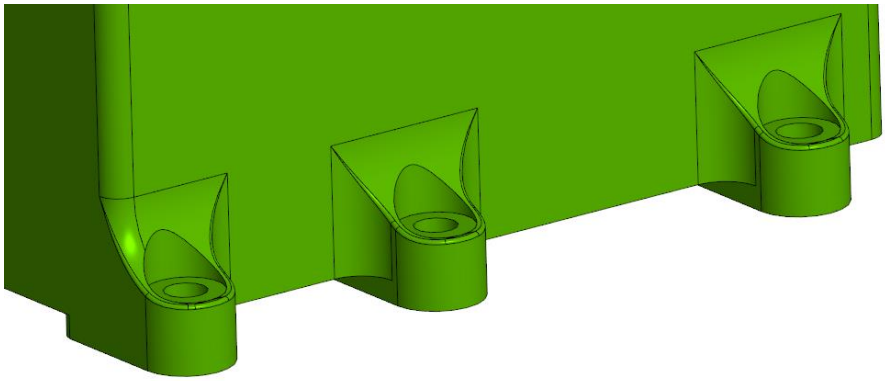


Рисунок 32 - Улучшенная для технологии FDM конструкция консольных опор.

6.6. Арматура и крепежные изделия

Применение впрессовываемой, вклеиваемой и т.д. арматуры значительно расширяет возможности деталей, выполненных 3D-печатью.

Для увеличения прочности детали поперёк слоёв, используются крепежные изделия в качестве арматуры. При этом отверстие в детали может быть выполнено таким образом, чтобы крепежный элемент нарезал при установке неполную резьбу. Типовые элементы геометрии детали для установки крепежных изделий показаны на рисунке 33.

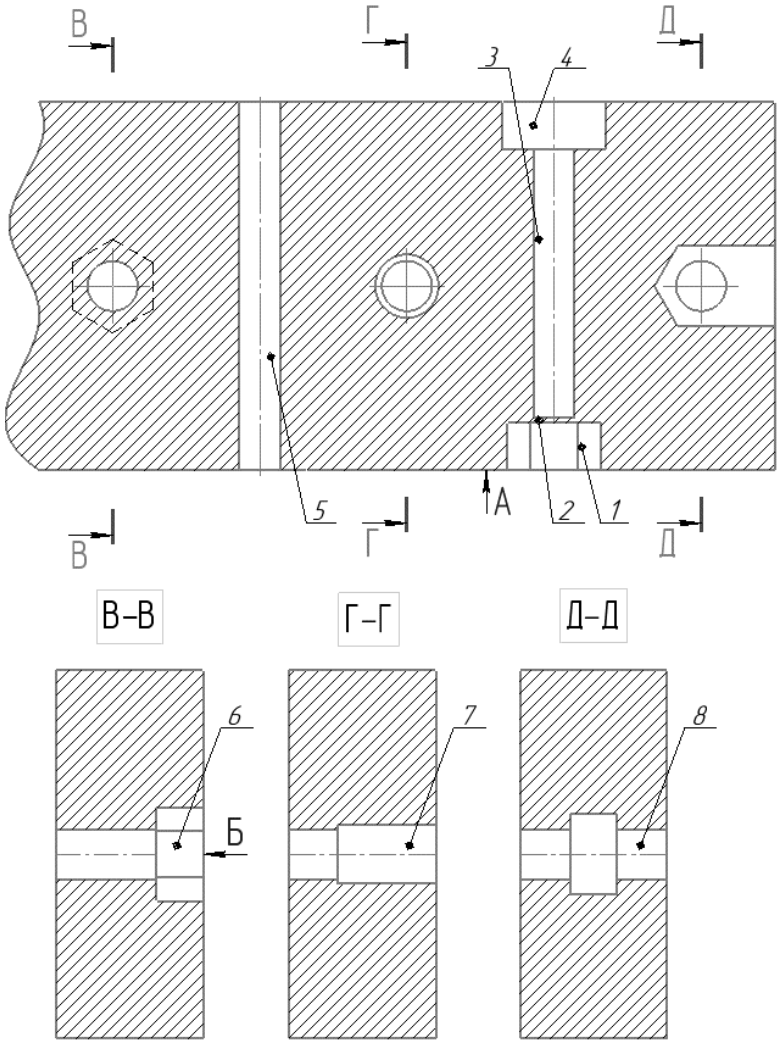


Рисунок 33 - Элементы геометрии детали для установки арматуры.

1 – обнижение под запрессовку гайки (соотв. номинальным размерам гайки);

2 – жертвенная стенка (толщиной в 2 толщины слоя);

3 – отверстие под винт, используемый как арматура (диаметр винта без половины толщины резьбы. При установке нарезается частичная резьба);

4 – обнижение под головку винта (примечание. 1-4 – скрытая установка арматуры для усиления детали поперек слоёв);

5 – аналогично 3, но установка арматуры открытая;

6 – крепежная арматура, вариант под запрессовку гайки (соотв. номинальным размерам гайки);

7 - крепежная арматура, вариант под впаивание резьбовой закладной втулки DIN 16903 (существуют усовершенствованные варианты втулок, в том числе специально предназначенные для впаивания в 3d-печать, они не стандартизированы даже DIN, но есть чертежи и 3D-модели);

8 – закладная установка гайки.

Типовые элементы конструкций, обеспечивающие гарантированное примыкание сочленяемых деталей друг к другу, защиту от чрезмерной деформации деталей при сборке и т.д. могут быть подчерпнуты из практики проектирования литья деталей из пластмасс под давлением, в частности, в работе [10].

Крепежные изделия, устанавливаемые в детали, выполненные методом 3D-печати, как правило в дополнительном стопорении не нуждаются (зависит от материала детали). Стопорение происходит за счёт упругости материала стягиваемых деталей или натяга в резьбе.

Для соединений, не требующих периодического разъема, целесообразно применять самонарезающие винты, например, ГОСТ 10619, DIN 7981, DIN 7982 с тупым (притупленным) или острым концом.

Соединение деталей из пластмасс металлическими полнотелыми заклепками возможно, но требует больших трудозатрат и аккуратности при

сборке, чем обычно. При возможности рекомендуется применять другие способы соединения деталей. При необходимости создания неразъемного соединения, рекомендуется применять пустотелые заклепки, либо резьбовые соединения совместно с клеями.

6.7. Рельефный текст

Качество поверхностей и маркировки на стенках детали по сравнению с гравированием ухудшается, но остаётся удовлетворительным- текст разборчивый и контрастный. Затертый краской рельефный текст на стенке заглушки показан на рисунке 34.



Рисунок 34 - Пример выполнения рельефного текста на стенке детали с затиркой краской (высота шрифта 4).

Рекомендуется соблюдать следующие условия:

1) поверхность может быть прямолинейной или криволинейной, но должна быть перпендикулярна поверхности построения или близка к этому (отклонение ±15°);

2) шрифт по ГОСТ Р 50140-92, высота шрифта не менее 4 для толщин слоя до 0,2 мм включительно, не менее 6 для толщины слоя 0,3 мм, буквы только заглавные. При увеличении высоты шрифта вдвое возможно применять строчные буквы;

3) глубина шрифта в детали должна быть равна диаметру сопла;

4) наименьшая толщина детали в области расположения текста должна быть не менее 2,5 диаметров сопла (рекомендуется от 4 диаметров во избежание проявления дефектов на противоположной стенке);

5) желательно применять материалы, дающие матовую поверхность на изделии и/или механически обрабатывать поверхность, на которой расположен текст.

Качество маркировки на крышке и дне детали как правило хуже, чем на стенках за счет большой шероховатости этих поверхностей и меньшему, чем у стенок разрешению печати. Минимальная рекомендуемая высота шрифта 6 для сопла диаметром 0,4 мм, 8 для сопла диаметром 0,6 мм. Глубина шрифта рекомендуется от 2 толщин слоя и более. Механическая обработка поверхности перед затиркой краской так же рекомендуется.

Хорошей альтернативой рельефному тексту в модели является лазерная гравировка с последующей затиркой краской или без нее. При затирке текста краской, основной проблемой в обоих случаях является шероховатость поверхности детали (см. рисунок 34), в которой остаются следы краски. При нанесении гравировки лазером, поверхность детали может быть заранее сглажена в области текста, путем выжигания тем же лазером на низкой мощности. Поверхность, обработанная таким образом, сглаживается, значительно сокращая количество краски вокруг текста после затирки. Деталь после такой обработки как правило имеет лучший внешний вид, чем после механической обработки (см. рисунок 35).



Рисунок 35 - Пример выполнения рельефного текста на стенке детали лазерной гравировкой.

6.8. Объединенные сборочные единицы

Объединенная сборочная единица, пример которой показан на рисунке 36, представляет собой несколько деталей, изготавливаемых совместно таким образом, что после изготовления их разъединение невозможно. Такая конструкция может в некоторых случаях сократить количество деталей в сборке и уменьшить её массу и габариты, а также позволяет получить детали, невозможные для изготовления с помощью других технологий.

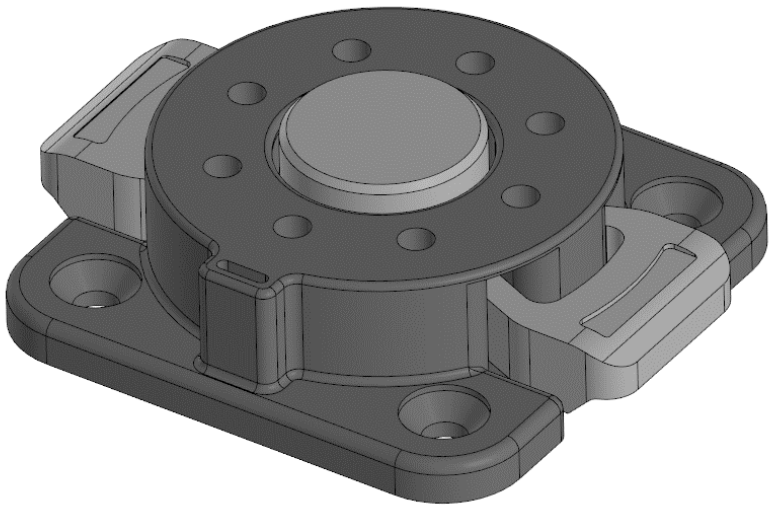


Рисунок 36 - Пример объединенной сборочной единицы

При проектировании объединенных сборочных единиц, параллельные поверхности построения зазоры должны составлять две толщины слоя, а перпендикулярные зазоры должны быть не менее одного диаметра сопла.

Для сопла диаметром 0,4 мм при толщине слоя 0,2 мм это как правило 0,4 и 0,4 мм соответственно; для диаметра 0,6 мм при толщине слоя 0,25 мм это 0,5 и 0,6 мм соответственно и т.д.

Рекомендуется располагать нависающие поверхности (в местах, где одна деталь находится над другой) таким образом, чтобы их можно было протянуть между двумя опорами (т.н. мосты). Это позволит не строить под нависающей поверхностью поддерживающие структуры, которые в ином случае может быть сложно удалить.

Подробно допустимые зазоры для прилегающих поверхностей показаны на рисунке 37.

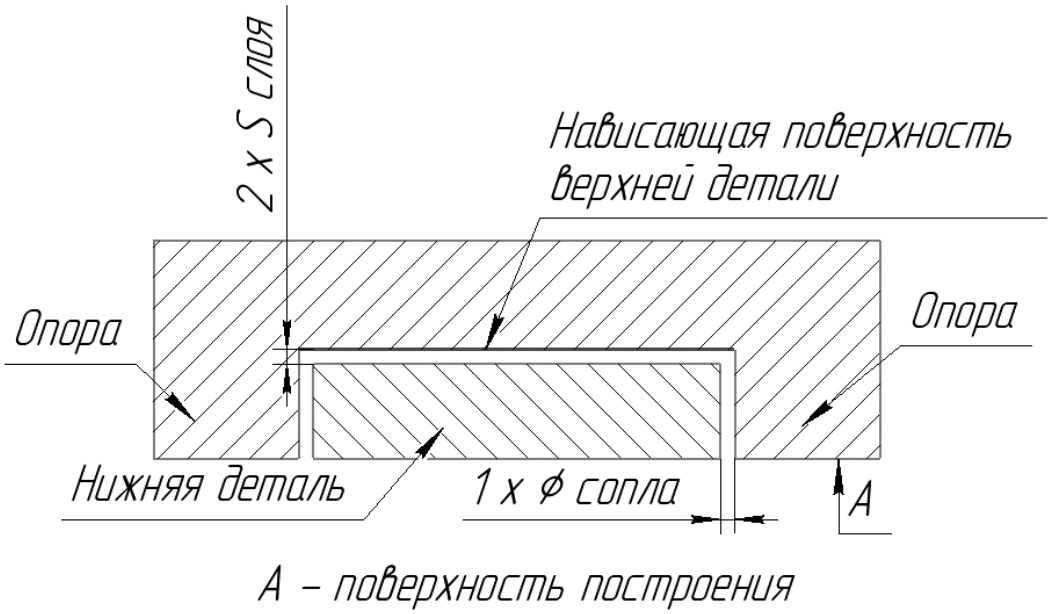


Рисунок 37 - Сечение прилегающих поверхностей деталей в объединенной сборочной единице.

Рекомендуется дополнительно уменьшить площадь нависающей поверхности, например, оформив ее крышку фасками по периметру, как показано на рисунке 38 (одна из деталей объединенной сборочной единицы с рисунка 36).

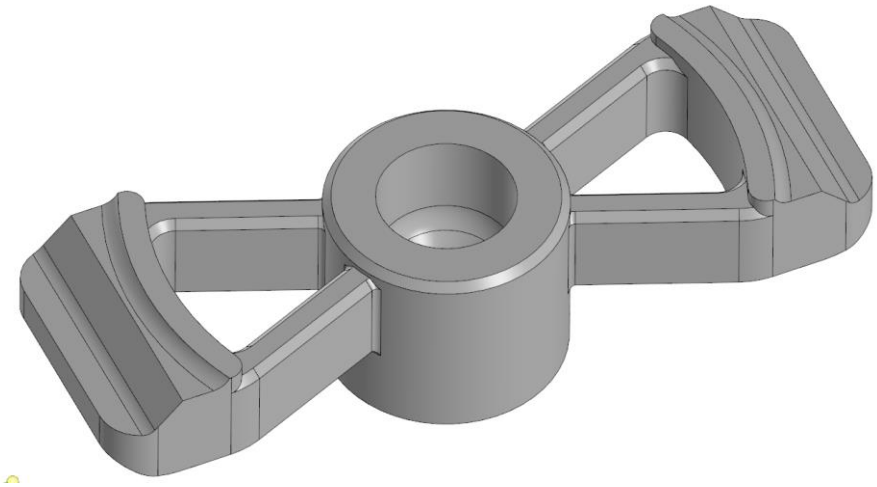


Рисунок 38 - Вид снизу на внутреннюю деталь объединенной сборочной единицы (оформление нависающей поверхности фасками и опоры).

7. Разделение детали на части с последующей сборкой

В случае, когда необходимо изготовить деталь, размеры которой не позволяют разместить её в имеющемся оборудовании, целесообразно разделить её на несколько частей для последующей сборки или склеивания. Так же это позволяет изготовить части детали, меняя ориентацию (направление слоев) каждой из них при построении таким образом, чтобы получить наибольшую прочность в различных направлениях для различных её частей.

При использовании некоторых материалов, таких, как ABS, возможно склеить их вместе, получив монолитную деталь, не уступающую по прочности аналогичной цельной детали (при прочих равных условиях) или даже превосходящей её.

7.1. Рассечение детали для изготовления с наилучшим качеством плоскости опор без механической обработки

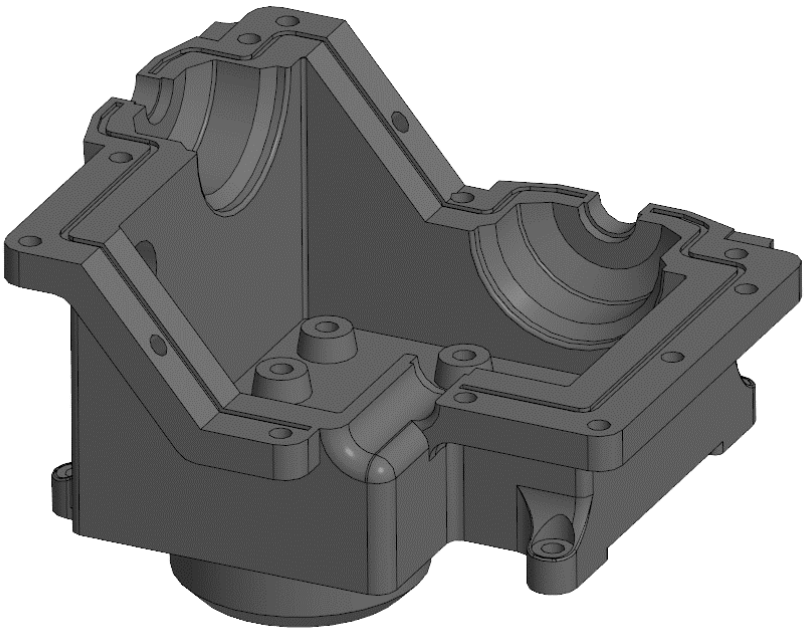


Рисунок 39 - Пример габаритной детали для разделения на части с последующим склеиванием.

На рисунке 40 выбраны сечения, позволяющие сохранить общую плоскость опор (нижнее) и опустить наибольшую нависающую плоскость на уровень платформы построения (верхнее) для детали с рисунка 39.

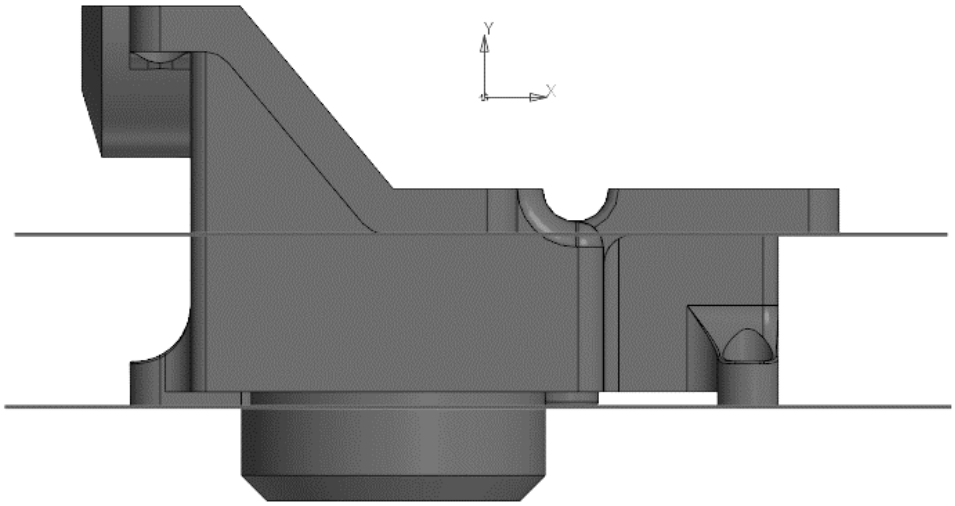


Рисунок 40 - Предпочтительные для данной детали сечения при разделении.

7.2. Рассечение детали по наибольшим поддерживаемым плоскостям

В некоторых случаях целесообразно уменьшить время изготовления детали и количество затрачиваемого на неё материала. Например, в случае, когда объем поддерживающих структур сравним или превышает объем самой детали, как на рисунке 41.

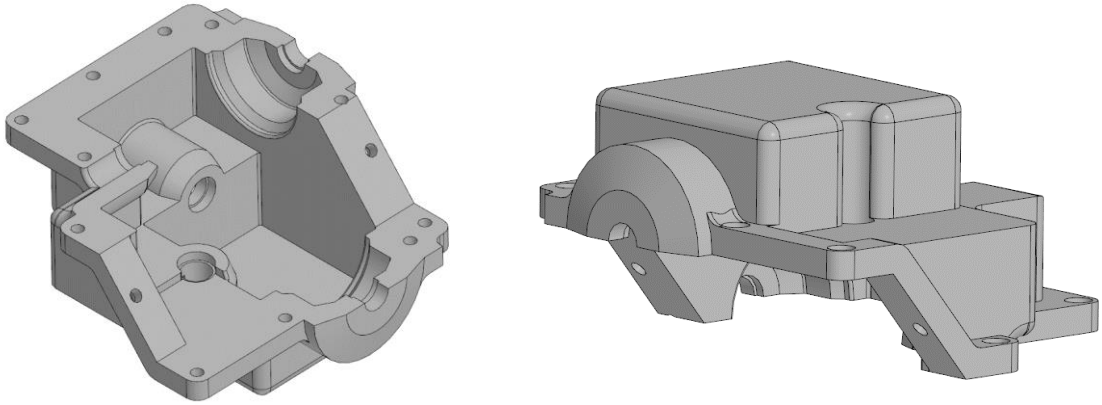


Рисунок 41 - Пример детали с большим количеством поддерживающих структур, необходимых для её построения.

Сечения на рисунке 42 выбраны таким образом, чтобы свести объем поддерживающих структур к минимуму.

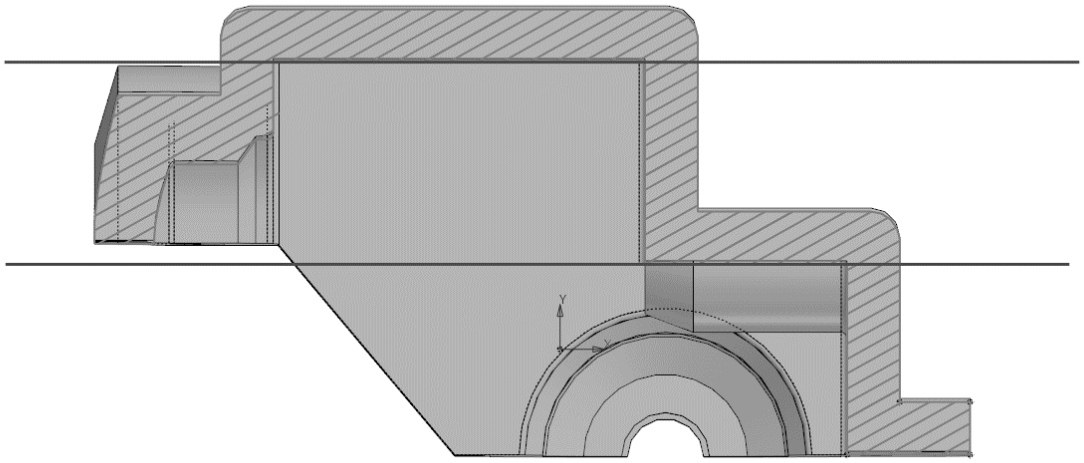


Рисунок 42 - Предпочтительные для данной детали сечения при разделении.

8. Варианты проектирования внутренней структуры детали

8.1. Оболочка детали

Независимо от наличия в детали заполнения, в ней как правило присутствуют такие структуры, как слои дна, крышки и линии стенок, образующие оболочку детали. Слои дна и крышки представляют из себя периметр из стенок, заполненный типом заполнения «зигзаг» (в особых случаях может быть использован концентрический или какой-либо ещё тип заполнения) с плотностью 100%. В случае, малого сечения слоёв детали, она может полностью состоять только из стенок. Такие случаи, как печать детали без стенок (состоящей полностью из заполнения, например) в данном пособии не рассматриваются.

Количество слоёв дна и крышки как правило одинаково, зависит от толщины слоя и нагруженности детали.

Рекомендуемое количество слоёв дна и крышки для толщины слоя, составляющей половину диаметра сопла:

- 3 для ненагруженных деталей;
- от 4 до 6 для средненагруженных деталей;
- 8 для высоконагруженных деталей с заполнением менее 100%.

Для других соотношений толщины слоя к диаметру сопла, количество слоёв корректируется соответственно.

В случае, если толщина слоя в КД не регламентируется, а заполнение составляет менее 100%, рекомендуется указывать толщину дна и крышки в миллиметрах. При отсутствии требований к прочности детали, количество слоёв дна, крышки допустимо в КД не указывать.

Количество линий стенки зависит от диаметра сопла и нагруженности детали.

Рекомендуемое количество линий стенки:

- от 2 до 3 для ненагруженных деталей;

- 4 для деталей без особых требований к прочности;

- от 6 до 8 для высоконагруженных деталей независимо от плотности заполнения.

Рекомендации по количеству линий стенок наиболее точны для сопел диаметром от 0,4 до 0,6 мм. При использовании сопла 0,8 мм целесообразно уменьшать их количество, при использовании сопел диаметром менее 0,4 мм, соответственно, увеличивать.

В случае, если диаметр сопла в КД не регламентируется, рекомендуется указывать толщину стенок в миллиметрах. При отсутствии требований к прочности детали, количество линий стенок допустимо в КД не указывать.

При необходимости уменьшить проницаемость детали газами и жидкостями, следует увеличивать толщину оболочки детали.

Завышение толщины оболочки без необходимости ведет к снижению технологичности производства изделий. При заполнении менее 100%, выполнение оболочки детали как правило является наиболее длительным процессом при изготовлении детали, т.к. кроме очевидной плотности, она как правило строится 3D-принтером на меньших скоростях (обычно в 2 раза медленнее), чем заполнение.

8.2. Параметрическое моделирование заполнения процессором САП

При моделировании заполнения детали процессором САП, следует указывать в КД тип и плотность заполнения. Весь внутренний объем детали за пределами стенок будет заполнен одним из типов заполнения, как показано на рисунке 43.

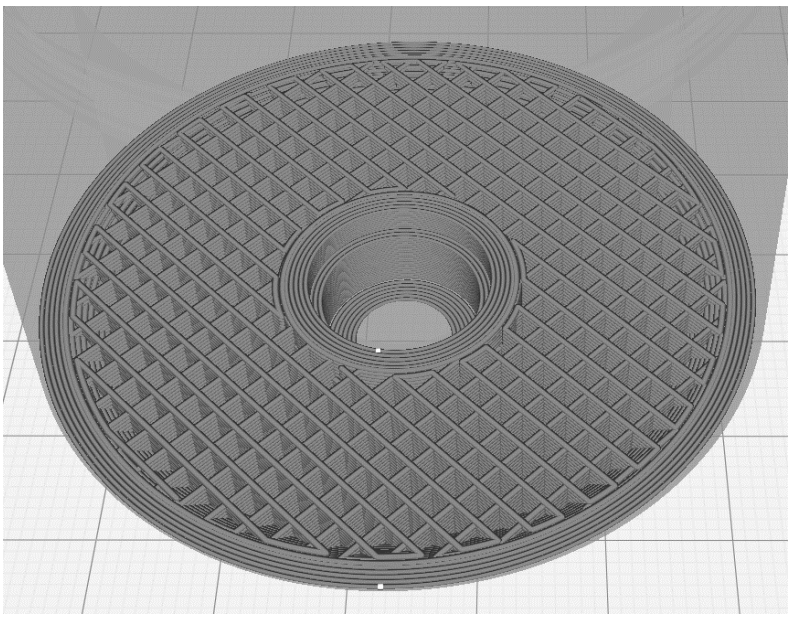


Рисунок 43 - Заполнение детали зигзагом с плотностью 25%.

Тип заполнения определяется в зависимости от необходимых свойств детали:

- «зигзаг» рекомендуется для большинства деталей и деталей, где требуется повышенная жесткость (рисунок 44). Для данного типа заполнения характерна наибольшая прочность вдоль линий печати и значительная анизотропность свойств при других нагрузках;

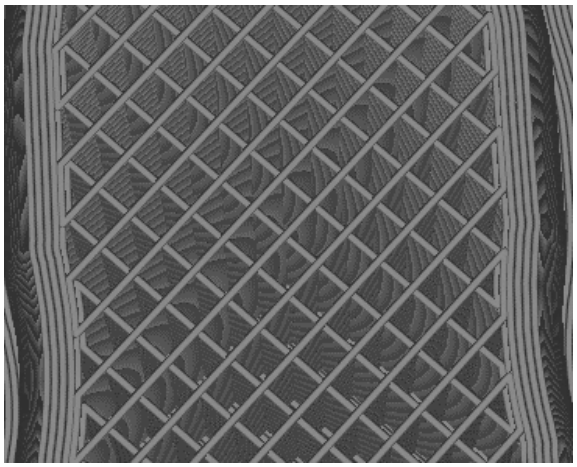


Рисунок 44 - Тип заполнения «зигзаг»

- «гироид» рекомендуется для деталей, где требуется повышенная упругость при использовании мягких материалов (например, полиуретан) (см.

рисунок 45). Также гироид позволяет дополнительно уменьшить массу детали за счёт меньшей плотности (в заполнении гироид условно указываемый процент заполнения всегда больше реальной плотности детали), несколько снижая прочность вдоль линий печати, но приближая свойства детали к изотропным. Данный тип заполнения может в некоторых случаях улучшить прочностные свойства детали, воспринимающей нагрузку в нескольких направлениях.

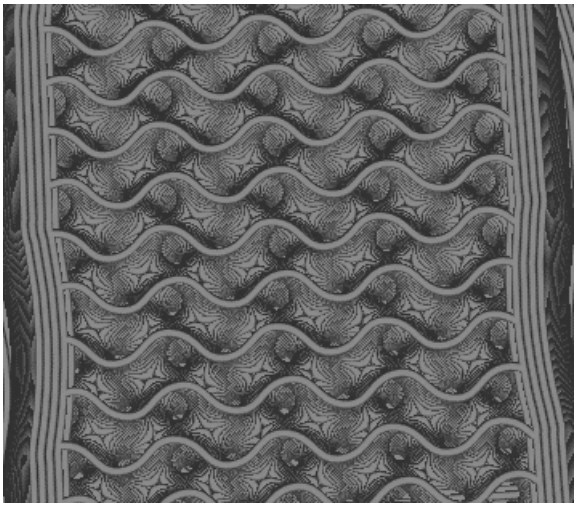


Рисунок 45 - Тип заполнения «гироид»

При необходимости выбирают другие типы заполнения.

В данной работе намеренно выбраны два распространенных типа заполнения, использование которых уместно в большинстве ситуаций. Различные процессоры САП позволяют выбирать из десятков типов заполнений и изменять ориентацию рисунка заполнения в случае, если необходимо улучшить деталь по каким-либо свойствам на 5-15%.

Плотность заполнения выбирается в зависимости от необходимой прочности и массы детали. Рекомендуется использовать следующие значения:

- 15% для малонагруженных деталей;
- 30% для деталей без особых требований к прочности;
- 100% для нагруженных деталей.

Применение 100% заполнения без необходимости ведет к снижению технологичности производства изделий.

Плотность заполнения указывается в процентах заполненного объёма относительно общего объёма внутри стенок, крышки и дна.

При заполнении 100% деталь всегда заполняется зигзагом, как на рисунке 46. При этом толщина стенок остается той же.

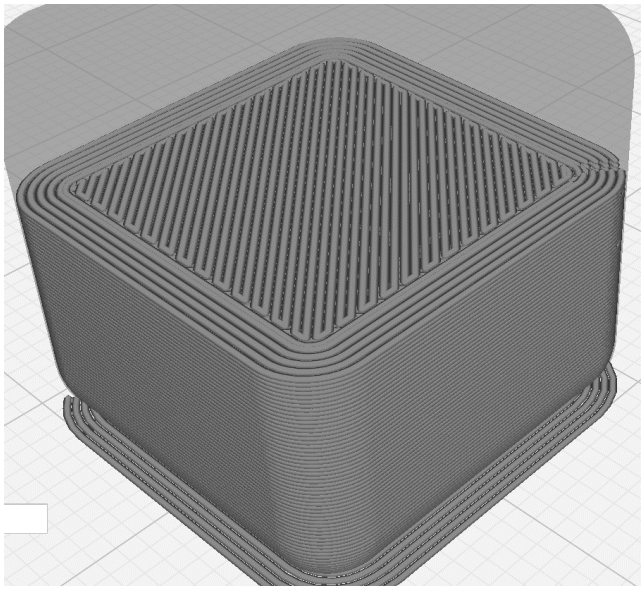


Рисунок 46 - Заполнение детали зигзагом с плотностью 100%.

Увеличение массы и времени изготовления детали от плотности параметрического внутреннего заполнения можно грубо оценить согласно таблице 1. В таблице приведены усредненные данные для деталей, объем заполнения которых составляет 30-70% относительно объема дна, крышки и стенок. Для расчетов выбрано количество слоев дна и крышки, количество линий стенок- 4 (средние значения).

Таблица 1

Заполнение детали, %	Коэффициент массы детали	Коэффициент машинного времени изготовления детали
0	0,50	0,64
1	0,67	0,78
20	0,72	0,82
40	0,80	0,87
60	0,88	0,91
80	0,96	0,98
100	1	1

Для деталей, объем заполнения которых менее 30% (преимущественно тонкостенные), выигрыш в затратах материала и времени изготовления в общем случае не велик. Исключение могут составлять детали, изготавливаемые относительно крупными сериями.

Разница в коэффициентах массы и времени изготовления состоит в том, что печать заполнения как правило производится на большей скорости, чем печать стенок.

Резкое увеличение массы и времени изготовления детали от 0 к 1% заполнения обусловлено тем, что заполнение создаёт собственную дополнительную линию стенки для лучшей адгезии линий заполнения к линиям стенки (зависит от настроек процессора САП, может быть отключено).

8.3. Параметрическое моделирование заполнения процессором САП с разделением детали на несколько тел с различной плотностью

Принцип работы соответствует таковому при проектировании объединенных сборочных единиц за исключением того, что между деталями, как правило, не оставляют зазора.

Деталь разделяется на несколько тел с различной плотностью и типом заполнения (заполнение каждого тела остается параметрическим и определяется процессором САП), как на рисунке 47. Внутренние тела при этом могут быть выполнены с собственными стенками или без них. Сечение такой детали в процессоре САП показано на рисунке 48.

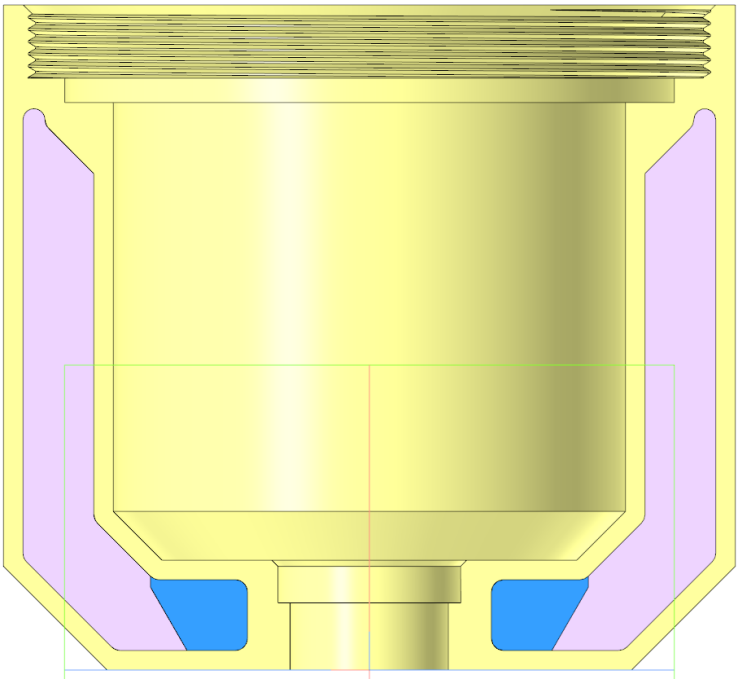


Рисунок 47 - сечение детали вращения, разделенной на 3 тела для изготовления с различным заполнением.

Нижнее тело (показано синим цветом, плотность заполнения 20%) служит для повышения прочности детали, а также для поддержки внутреннего дна детали, которое невозможно было бы качественно выполнить с заполнением 5%, которое указано для фиолетового тела.

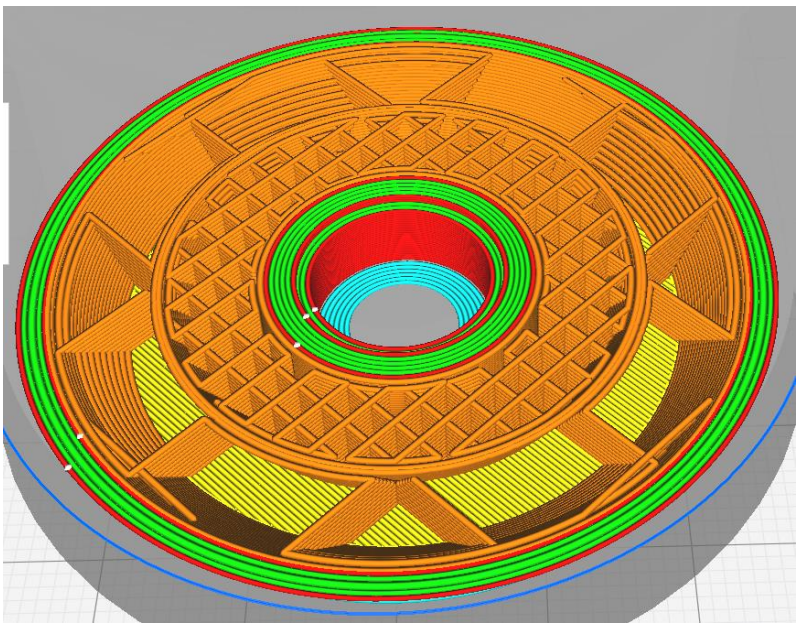


Рисунок 48 - вид нижней части детали, разделенной на 3 тела для изготовления с различным заполнением в процессоре САП.

8.4. Моделирование внутренней структуры в CAD

Моделирование внутренней структуры позволяет строго задать форму конечной детали в КД, как на рисунках 49, 50. С помощью моделирования внутренней структуры в CAD возможно значительно оптимизировать и теплопроводность, и прочность «заполнения» и его способность поддерживать внутренние нависающие части детали при изготовлении.

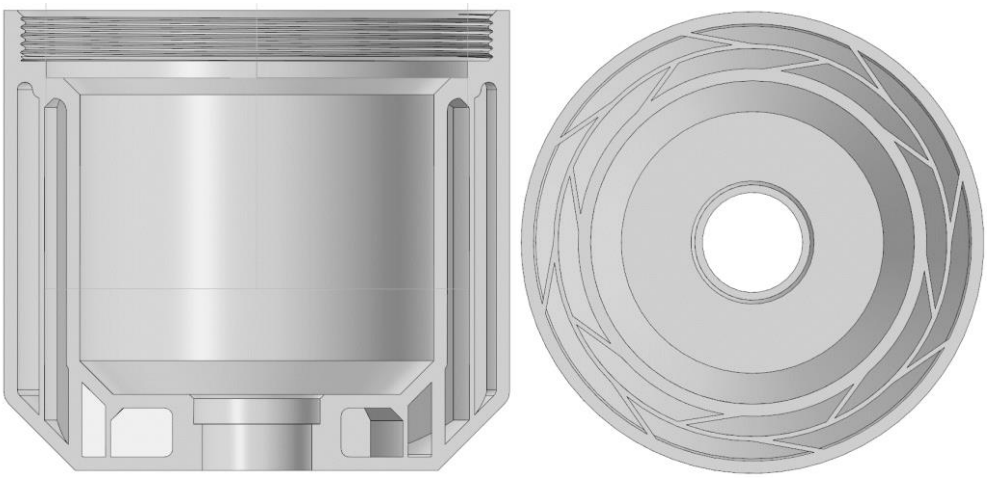


Рисунок 49 - сечения детали вращения с внутренней структурой, описанной в CAD модели.

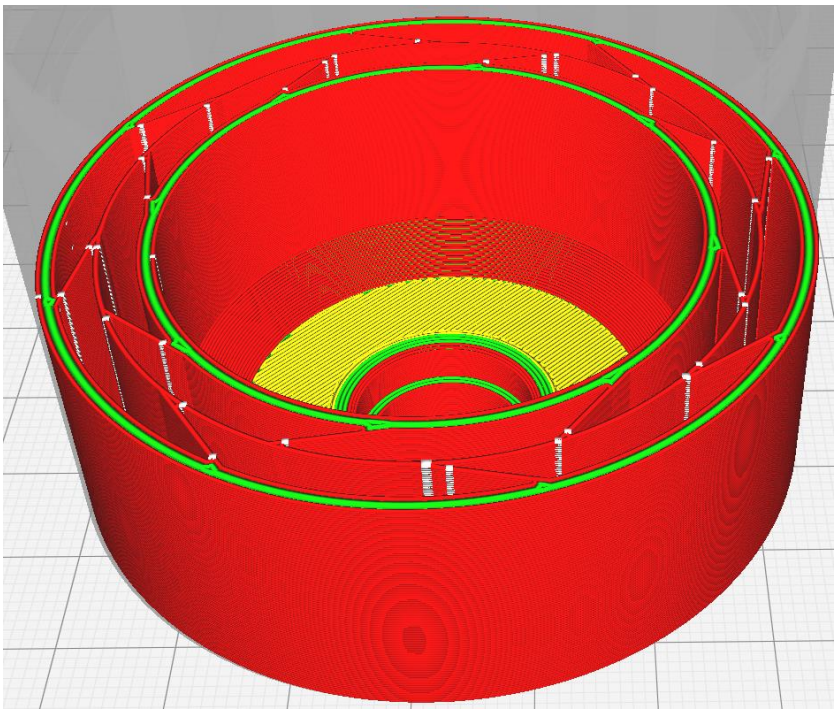


Рисунок 50 - вид детали с внутренней структурой, описанной в CAD модели в процессоре САП.

8.5. Зависимость прочностных характеристик от внутренней структуры детали

Оси графиков для прочностных характеристик деталей приведены в условных единицах и показывают тенденции в зависимости прочности деталей от конструктивных решений, таких, как различное расположение слоёв детали, плотность заполнения, толщина слоя и т.д. Графики рекомендуется использовать как вспомогательный инструмент для анализа и улучшения конструкции детали при проектировании. Для получения более точных данных в частных случаях требуется производить сравнительные испытания различных конструкций в условиях, приближенных к рабочим.

Наибольший выигрыш в прочности при 100% заполнении достигается при изгибающих нагрузках для деталей, работающих на изгиб слоёв. Как видно из графика на рисунке 51, в таких случаях заполнение 80% снижает прочность детали в 2 раза, а заполнение 20% в 4 раза. График построен на основе данных из работы [12].

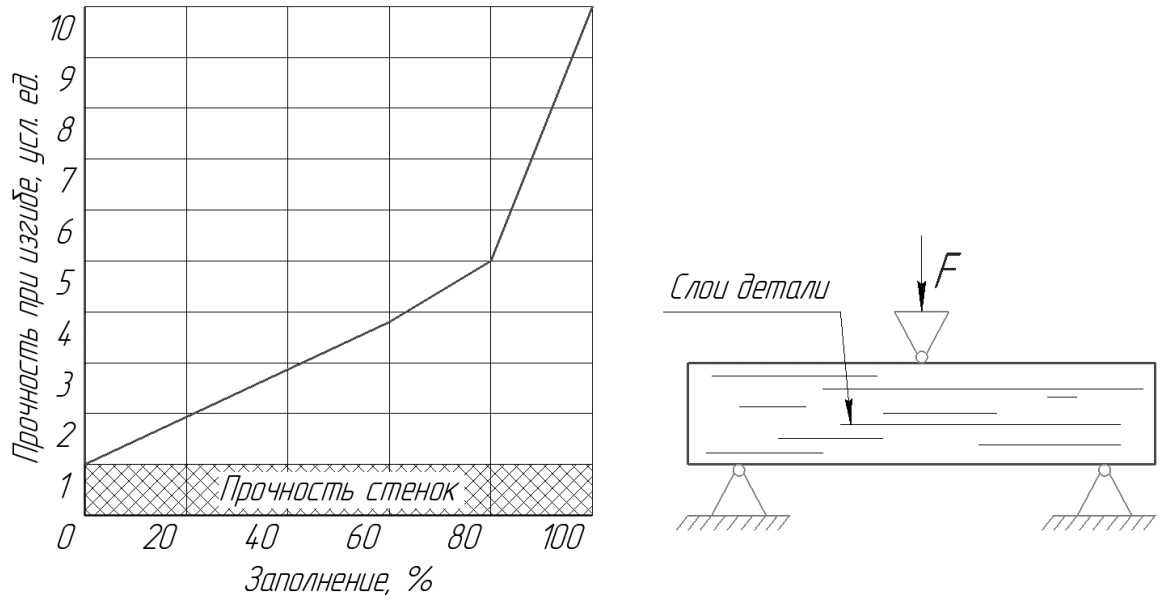


Рисунок 51 - Зависимость предела прочности при изгибе условной детали от заполнения

На графике рисунка 52 показано, что при изгибе на отрыв слоёв друг от друга, прочность пропорциональна общей площади материала в слое, а точнее, площади прилегания двух соседних слоёв друг к другу (может отличаться от площади слоя для некоторых типов заполнения).

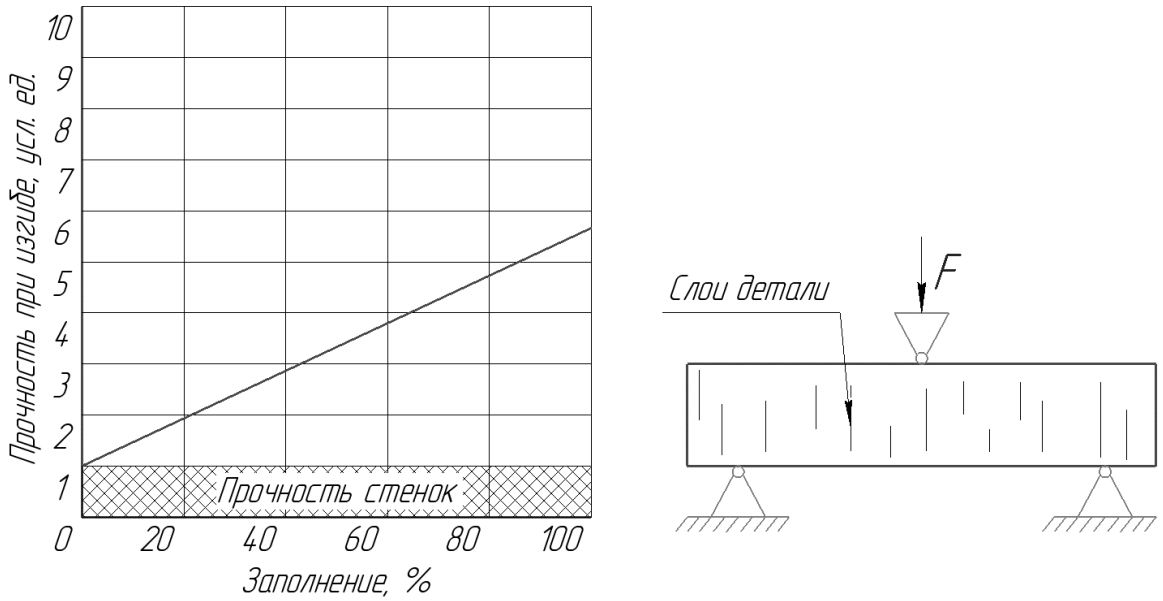


Рисунок 52 - Зависимость предела прочности при изгибе условной детали от заполнения

Зависимость предела прочности при растяжении от заполнения (поперек слоёв) аналогична тому, что показано на графике рисунка 52.

Зависимость прочности детали от заполнения при сжатии, как видно на графике рисунка 53, можно считать линейным, пропорциональным площади материала в сечении. При сжатии согласно варианту 2, прочность несколько снизится за счёт внутренней структуры детали, в частности заполнения. Несколько ниже и прочность дна (крышки) при таком нагружении. График построен на основе собственных данных и данных из работы [12].

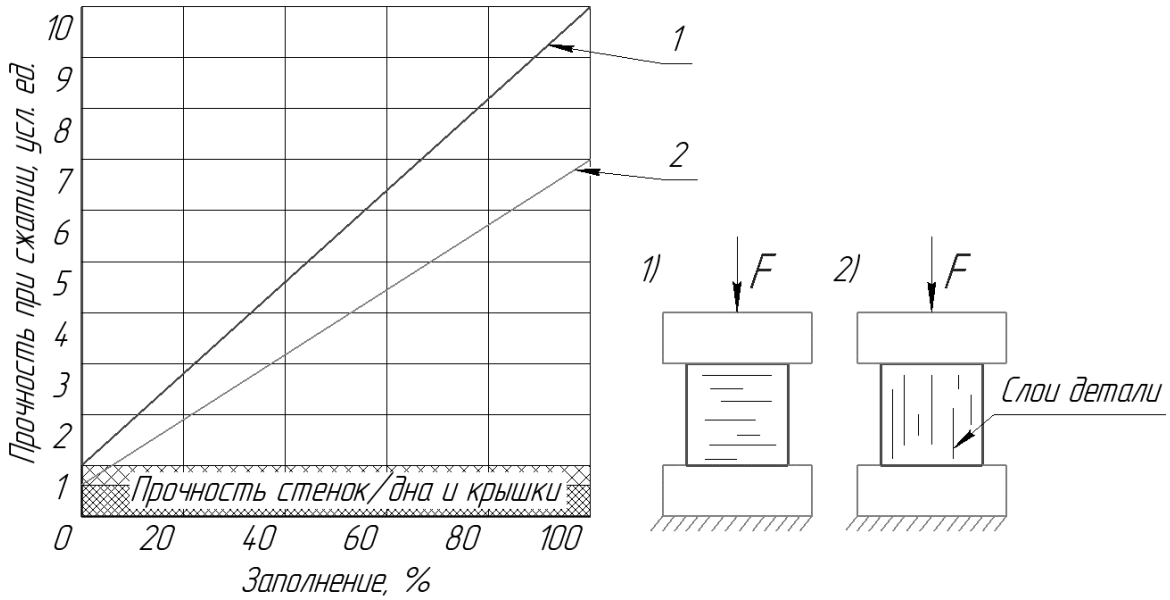


Рисунок 53 - Зависимость предела прочности при сжатии условной детали от заполнения

Зависимость прочности детали от заполнения при растяжении вдоль слоёв, как видно на графике рисунка 54, линейная. Значительную часть нагрузки при растяжении, как правило, воспринимают линии стенки. График построен на основе данных из работы [14].

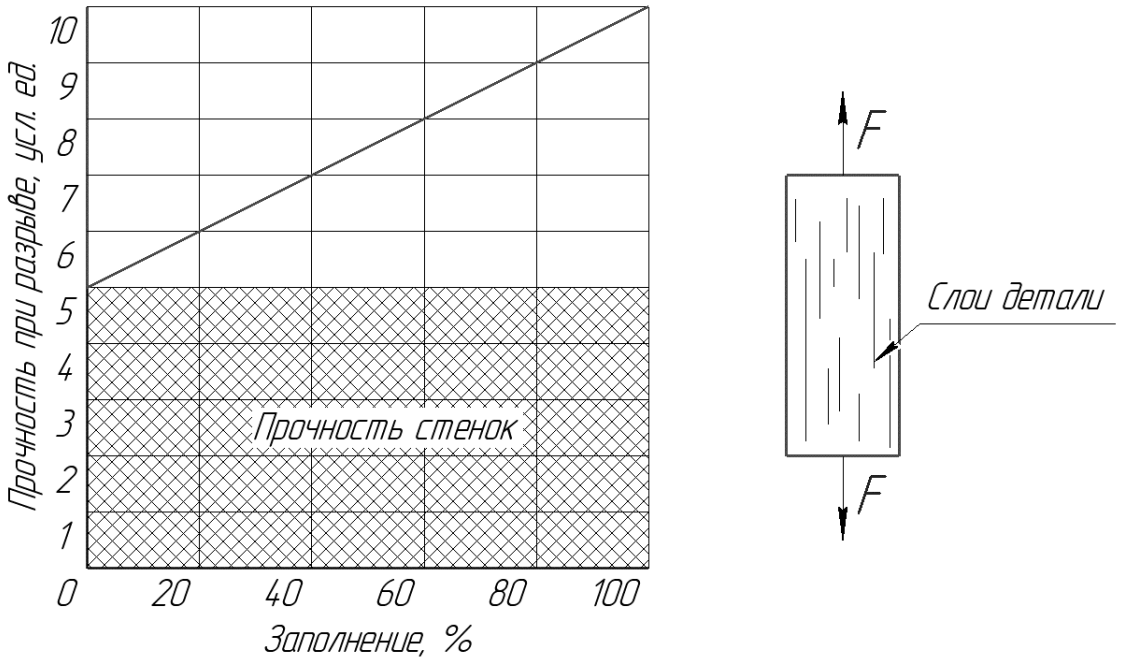
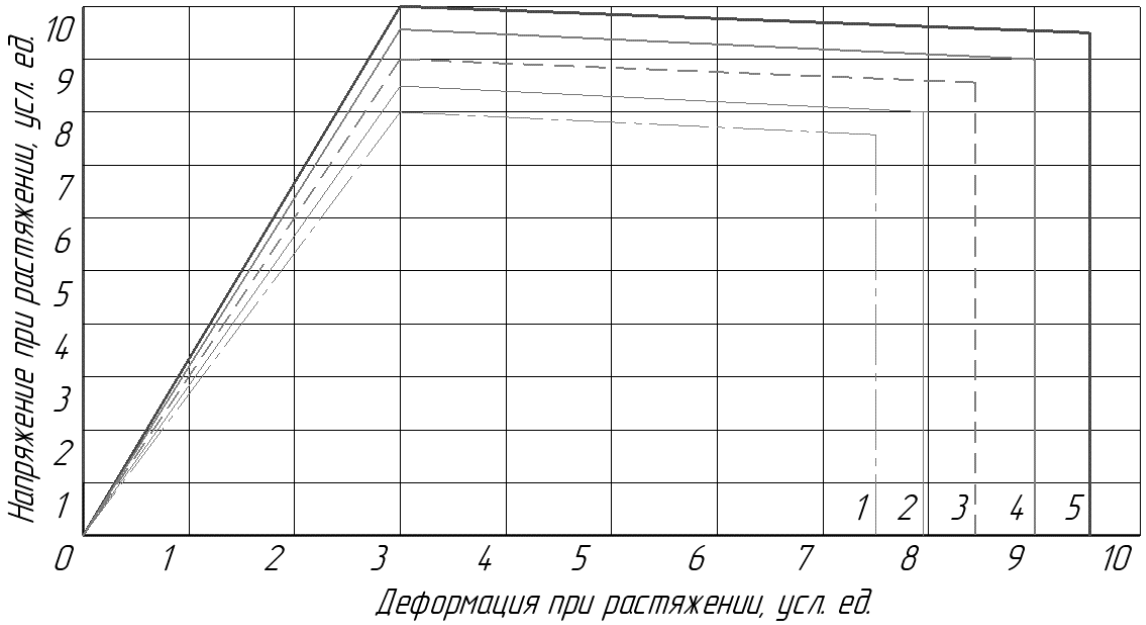


Рисунок 54 - Зависимость предела прочности при разрыве условной детали от заполнения

На прочность детали на разрыв вдоль нитей большое влияние оказывает количество линий стенок. Зависимость показана на примере графика (рисунок 55) испытаний на разрыв условной детали, изготовленной горизонтально (XY) с различным количеством линий стенки при 100% заполнении и прочих равных условиях. При увеличении количества линий стенки увеличивается и разрушающая нагрузка, и удлинение образца. Характеристики условной детали с увеличением количества нитей, направленных вдоль приложения нагрузки, очевидно, стремится к характеристикам полимерной нити, из которой она изготовлена. График построен на основе данных из работы [12].



1 – 2 линии стенки; 2 – 4 линии стенки; 3 – 6 линий стенки;
4 – 8 линий стенки; 5 – 10 линий стенки.

Рисунок 55 - График напряжения при растяжении от деформации при различном количестве линий стенки условной детали

На прочность детали значительно влияет толщина слоя. Несмотря на то, что с уменьшением слоя в детали увеличивается количество межслоевых соединений, которые являются наименее прочной частью структуры, прочность самих межслоевых соединений возрастает за счёт более равномерного и продолжительного прогревания расплава на выходе из сопла.

Как видно из графика на рисунке 56, при необходимости повысить прочность детали, одним из способов является уменьшение толщины слоя. Однако для больших деталей толщина слоя меньше 0,5 от диаметра сопла как правило не используется в следствии значительного увеличения времени изготовления детали. График построен на основе данных из работы [13].

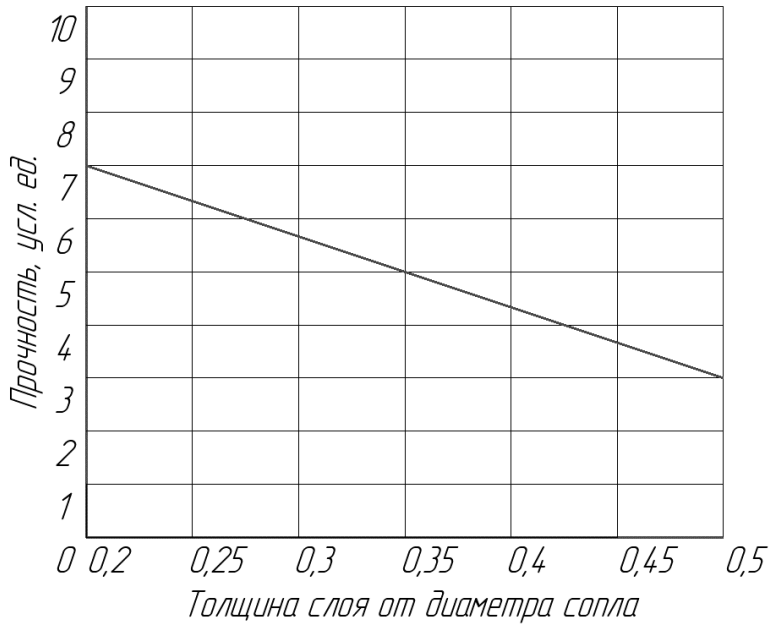


Рисунок 56 - Зависимость прочности условной детали от толщины слоя, выраженной как частное от диаметра сопла (прим. для сопла диаметром 0,4 мм, толщина слоя в 0,5 будет равна 0,2 мм)

9. Механическая обработка деталей

9.1. Припуски на обработку

Рекомендуемые припуски на обработку поверхностей (на сторону):

-0,2 мм на размеры до 10 мм;

-0,5 мм на размеры от 10 до 50 мм;

-1,0 мм на размеры от 50 до 150 мм;

-1,5 мм на размеры свыше 150 мм.

Примечание. Данные по рекомендуемым припускам получены экспериментально.

При механической обработке деталей, толщина оболочки должна быть увеличена таким образом, чтобы после снятия припуска оставалось не менее 0,5 исходной толщины стенки. Данная рекомендация актуальна даже для деталей с заполнением 100% (см. раздел 8).

При проектировании следует особо учитывать жесткость детали при обработке поверхностей, т.к. детали выполнены из термопластичных полимеров. Тонкостенные, ажурные детали, как на рисунке 57, могут деформироваться при механической обработке даже в оправке (см. рисунок 58). Обрабатывать такие детали требуется с особой осторожностью, особенно, если предполагается точение «на удар». Однако, при соблюдении технологии, обработанные механически поверхности деталей практически не отличимы от поверхностей деталей, изготовленных субтрактивно из блока или стержня из аналогичного полимера, как на рисунке 59.

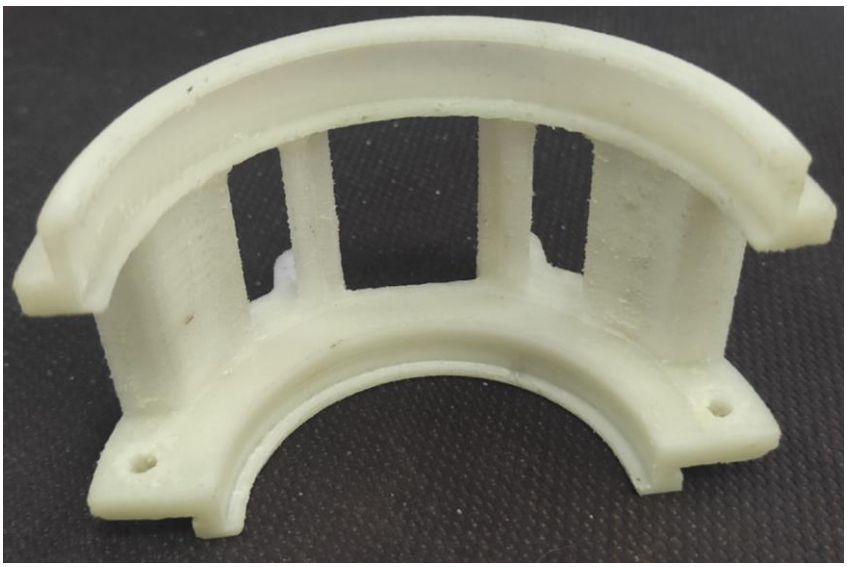


Рисунок 57 – Половина корпуса статора. Тонкостенная деталь из нити REC Friction, обработанная токарным способом.

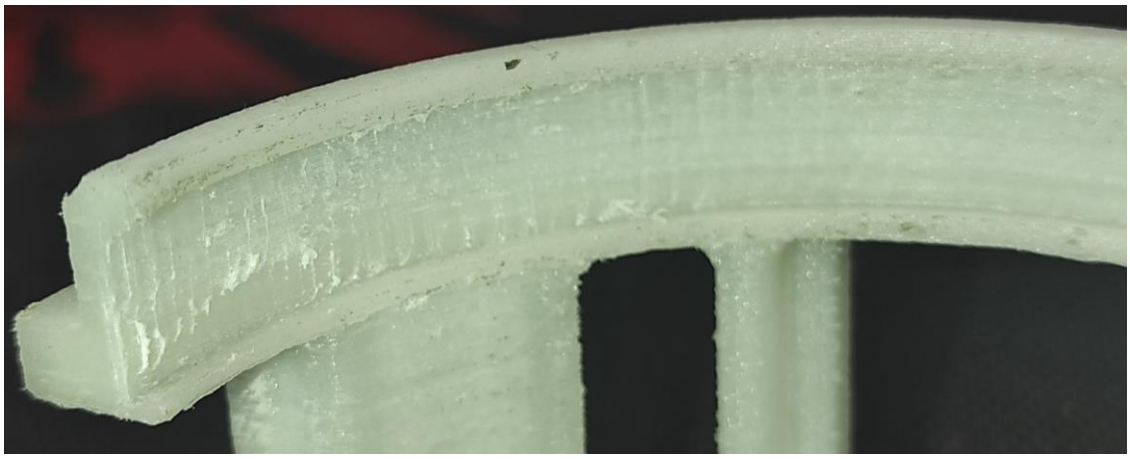


Рисунок 58 – Половина корпуса статора. Следы деформации тонкостенной детали при точении на удар (2 части корпуса обрабатываются в оправке совместно)

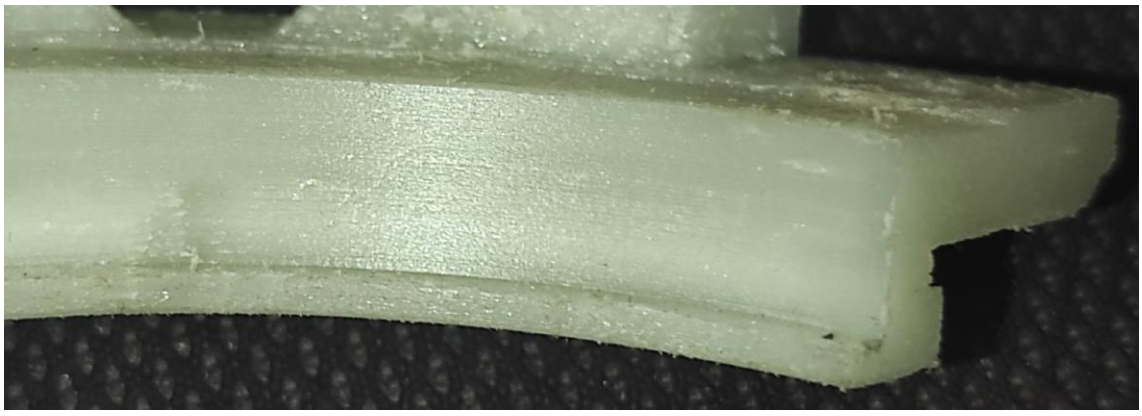


Рисунок 59 – Половина корпуса статора. Поверхность, получаемая после токарной обработки.

Детали из хрупких материалов, как ABS, рекомендуется обрабатывать при конечной толщине обрабатываемой стенки не менее 4-5 мм во избежание растрескивания по слоям.

9.2. Базовые поверхности

Наиболее верным выбором базовой поверхности для механической обработки является поверхность построения, т.к. сама является базовой поверхностью для изготовления заготовки детали. В таком случае рекомендуется ограничивать допустимое коробление поверхности построения в КД.

Погрешность установки при базировании на иных поверхностях может быть значительной, в таких случаях рекомендуется выбирать припуск со сдвигом на 1 диапазон в большую сторону.

В некоторых случаях могут быть предусмотрены жертвенные элементы для закрепления детали на станке для механической обработки.

10. Особенности оформления конструкторской документации

Разработка деталей, изготавливаемых по технологии FDM требует особого подхода к оформлению конструкторской документации.

К сожалению, государственных или отраслевых стандартов, описывающих нюансы технологии и требования к изделиям, на данный момент не существует. Исходя из этого, требуется описать их в собственной документации предприятия разработчика. Данный раздел призван помочь с решением этого вопроса, предоставляя рекомендации по оформлению конструкторской документации для общего случая.

10.1. Общие рекомендации по оформлению конструкторской документации

Важной частью комплекта конструкторской документации для детали, изготавливаемой по технологии FDM является трехмерная модель поверхности детали. Данное утверждение проистекает из того, что геометрия разрабатываемых деталей, ввиду особенностей технологии, тяготеет к большому количеству поверхностей, часто криволинейных, а, следовательно, потребует множества видов, сечений и размеров для полного описания детали в чертеже согласно требованиям ЕСКД. При этом, количество функциональных поверхностей таких деталей не отличается от аналогичных, спроектированных для изготовления с использованием традиционных технологий. Требования ко вспомогательным поверхностям детали как правило низкие и обычно для них указывают общий допуск в технических требованиях чертежа. Стоит отметить, что для подготовки производства для технологии FDM, 3D модель детали также необходима. В некоторых случаях требуется создание технологической 3D модели (добавление жертвенных элементов, специальных поддерживающих структур и т.д.).

Исходя из описанного выше, электронную модель рекомендуется ввести в комплект документации на деталь. В таких случаях в технические требования чертежа детали включают:

- *«Электронная модель по АБВГ.000000.001 МД»*;

- *«Неуказанные размеры и номинальная форма деталей по электронной модели»*.

Такой комплект документов позволяет выпустить оба документа (чертеж и 3D модель) в форме, доступной для работы на любом предприятии и обеспечивающей возможность длительного хранения. Рекомендуется хранить 3D модель в формате STEP, а чертеж детали в формате PDF, при этом ограничений на САПР, используемые при проектировании и изготовлении не накладывается.

При выполнении указанных выше рекомендаций, на чертеже детали необходимо указывать только габаритные, функциональные (если к ним предъявляются особые требования) размеры и размеры после механической обработки (если они присутствуют).

При этом необходимо определить объем и методы контроля изготавливаемых изделий. Учитывая с одной стороны низкую точность изготовления деталей по технологии FDM, что обычно отражается в соответствующих не указываемых допусках на размеры, а с другой стороны низкую вероятность ошибок при построении изделия (за счет практически полной автоматизации процесса построения детали), допустимо контролировать только указанные на чертеже габаритные и функциональные размеры детали.

Минусом такого подхода может оказаться необходимость в персональном компьютере с программным обеспечением для просмотра соответствующих 3D моделей при приёмке деталей отделом качества.

Необходимым условием для такого избирательного контроля качества является обеспечение точности размеров изготавливаемых деталей при подготовке производства.

Пример оформления чертежа для детали, изготавливаемой по технологии FDM представлен на рисунке 60.

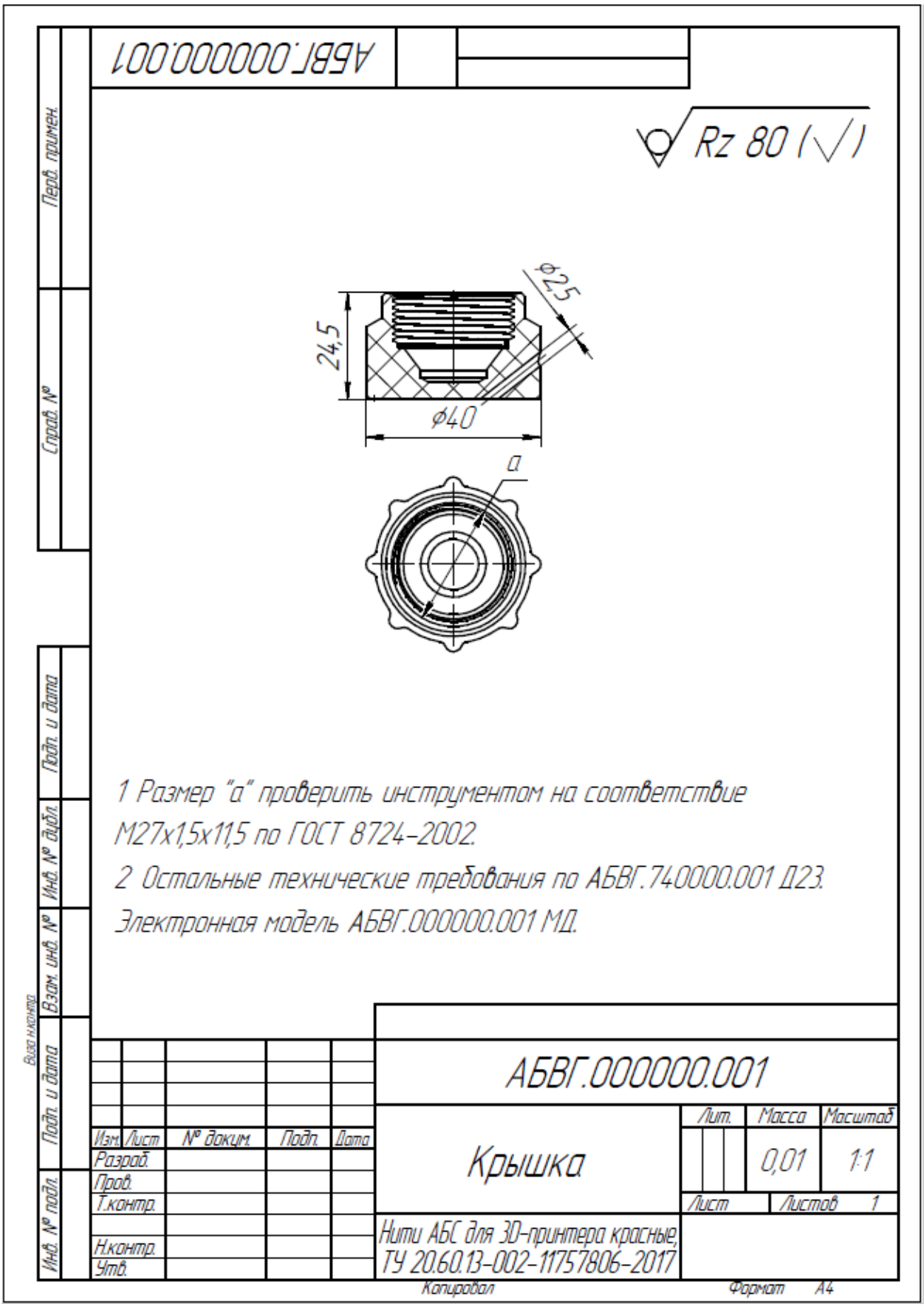


Рисунок 60 – Пример оформления чертежа для детали, изготавливаемой по технологии FDM.

В спецификации на сборочную единицу, в которой применяется деталь, указываются оба документа, причем чертеж указывается в разделе «детали», остальные документы в разделе «документация».

В случае применения документа, описывающего общие технические требования для деталей, изготавливаемых по технологии FDM, его обозначение также указывается в разделе «документация».

Пример выполнения спецификации на сборочную единицу показан на рисунке 61.

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме-чание
				Документация		
...			...	...		
–			АБВГ.123456.001 МД	Основание		
				Электронная модель детали		
–			АБВГ.123456.054-02 МД	Крышка		
				Электронная модель детали		
А4			АБВГ.740000.001 Д23	Детали по технологии FDM		
				Технические требования		
...			...	...		
				Детали		
А3		3	АБВГ.123456.002	Основание	1	
А4		4	АБВГ.123456.054-02	Крышка	1	
...			...	...		

Рисунок 61 - Пример выполнения спецификации на сборочную единицу, в которой применяется деталь, изготавливаемая по технологии FDM

В спецификацию на сборочную единицу, где применяется деталь, изготавливаемая по технологии FDM, включают:

- чертеж детали (в раздел «Детали»);
- базовый чертеж детали (при наличии включают в раздел «Детали»);
- электронную модель детали – код документа МД (в раздел «Документация»).

Графы спецификации для записи электронной модели детали в раздел «Документация» заполняют следующим образом:

- в графе "Формат" проставляют прочерк;
- графу "Зона" не заполняют;
- графу "Поз." не заполняют;
- в графе "Обозначение" указывают обозначение основного конструкторского документа и код документа МД;
- в графе "Наименование" указывают наименования детали в соответствии с основной надписью на основном конструкторском документе (чертеж детали) и наименование документа «Электронная модель детали»;
- графу "Кол." не заполняют;
- графу "Примечание" не заполняют.

10.2. Общие технические требования к деталям

При массовом проектировании КД на изделия, изготавливаемые по технологии FDM, целесообразно подготовить документ, содержащий общие технические требования к изделиям и ссылаться на него в технических требованиях конкретных деталей. Таким образом возможно значительно сократить количество технических требований на поле чертежа. В случае, если требование, изложенное в документе не применимо к отдельной детали, чертеж на деталь должен содержать собственное техническое требование, взамен общего.

При выпуске технических требований отдельным документом (например, АБВГ.740000.001 Д23), технические требования в чертеже детали должны содержать ссылки на электронную модель детали и документ АБВГ.740000.001 Д23, например:

«. . .

6 Остальные ТТ по АБВГ.740000.001 Д23.

Электронная модель АБВГ.123456.002 МД.

»

В примере *АБВГ.123456.001* – обозначение чертежа детали (см. рисунок 60).

Далее приведен рекомендуемый перечень технических требований, которые может содержать такой документ:

1) Неуказанные размеры и номинальная форма деталей по 3D модели;
2) Общие допуски по ГОСТ 30893.2-cL (или другие);
3) Требования к механически обрабатываемым элементам и поверхностям по ОСТ 107.460053.001-2003 (или другие);
4) Каймы, поддерживающие структуры, выступающие дефекты должны быть удалены. Шероховатость Rz=80;
5) На деталях не допускаются:
   - трещины;
   - расщепление или смещение слоев;
   - обнажение линий заполнения.
6) На деталях допускаются:
   - скругления острых кромок радиусом 0,2-0,5 мм или фаской 0,2-0,5 мм под углом 45°;
   - зазоры между тонкими стенками.
7) Цвет деталей не регламентируется;
8) Плотность заполнения 100%;
9) Шаблон заполнения и толщина оболочки не регламентируются.

10.3. Требования к внешнему виду деталей

Изготавливаемые детали, в зависимости от геометрии, материала, оборудования, технологических режимов и прочих факторов, могут иметь пороки и дефекты, присущие технологии FDM. Для приемки таких деталей, требуется описать качества годных деталей и виды брака.

Для деталей без особых требований рекомендуется к рассмотрению следующий перечень требований, которые могут быть отражены в конструкторской и технологической документации:

1) Каймы, поддерживающие структуры, выступающие дефекты должны быть удалены. Шероховатость Rz=80;
2) Поддерживаемые поверхности должны быть очищены от концов отдельных, свисающих линий;
3) Допускается величина коробления плоского изделия не более 0,2 мм на 10 мм длины;
4) Допускается коробление углов (концентраторов напряжений) на плоскости построения изделия. Площадь покоробленной поверхности не более 20% от площади плоскости построения;
5) Допускается скругление острых кромок радиусом 0,2-0,5 мм или фаской 0,2-0,5 мм под углом 45°;
6) Не допускаются зазоры между линиями крышки, дна, стенок, вызванные недостаточным экструдированием материала. Допускаются зазоры между линиями стенки, охватывающей отверстия, вписываемые в диаметр 5 мм и локально на стенках, описывающих острые углы;
7) Не допускаются зазоры между линиями крышки (дна) и линиями стенки, кроме единичных зазоров, вписываемых в диаметр 1 мм;
8) Не допускаются трещины, расщепление или смещение слоёв;
9) Не допускается обнажение заполнения;

10) Допускаются единичные раковины на поверхности построения, без обнажения заполнения;
11) Допускаются отдельные включения материала поддерживающих структур на поверхности детали, не более 5% длины периметра слоя или не более 3мм;
12) Допускаются следы паутины между отдельными поверхностями изделия;
13) Допускаются паутина, наплывы, поддерживающие структуры или их фрагменты на недоступных для механической обработки поверхностях изделия;
14) Допускается наличие следов клея для FDM печати на поверхности построения изделия;
15) Не допускается утонение стенки после механической обработки более 0,5 толщины стенки;
16) Цвет деталей не регламентируется.

11. Влияние внешней среды и механических воздействий на изделия

Изделия, изготовленные по технологии FDM, потенциально могут успешно проходить стандартные испытания для применения, например, в авиационном приборостроении. Стойкость испытанных образцов и «ненагруженных» изделий к механическим и климатическим воздействиям подтверждается испытаниями таких материалов, как «REC Friction», «REC Ultrax X-Line», «REC Clotho ABS», «REC ABS» по ТУ 20.60.13-002-11757806-2017, выполненными на базе испытательного центра «ЦНПО «Ленинец» в Санкт-Петербурге.

Стойкость изделий к агрессивным средам определяется стойкостью материала, из которого они выполнены. В общем случае следует руководствоваться техническими условиями и техническим паспортом на нити полимерные и свойствами основного полимера, из которого они изготовлены. Следует учитывать, что изделия, изготовленные по технологии FDM, почти всегда имеют поры, позволяющие внешней среде проникать внутрь детали с течением времени, что увеличивает площадь воздействия агрессивной среды на материал детали, уменьшая срок её службы.

Перечисленные выше и иные, исследованные на базе испытательного центра «ЦНПО «Ленинец» нити полимерные для 3D-принтеров, имеют крайне низкую магнитную засоренность, что позволяет использовать их при изготовлении деталей, находящихся в непосредственной близости от магнитометрических датчиков. Опыт предприятия «ЦНПО «Ленинец» в части испытаний материалов и деталей на магнитную засоренность показывает, что при производстве нитей полимерных (в том числе наполненных стекло и углеволокном), а также при работе 3D-принтеров (в том числе при применении стальных закаленных сопел), магнитного засорения полимера не происходит.

12. Общие сведения о материалах

Список полимеров, используемых для полимерных нитей для FDM довольно велик, а благодаря развитию в конструировании 3D-принтеров, продолжает расширяться, в основном в сторону более тугоплавких и сложных для FDM 3d-печати полимеров. Появляется множество композиционных материалов, наполненных коротко рубленным стекло- или углеволокном, служащим в том числе для уменьшения усадки при печати, что должно позволить изготавливать детали с лучшим качеством поверхности и точностью размеров. Такая тенденция прослеживается для всех полимеров с высокой усадкой, что на ровне с развитием оборудования в сторону повышения рабочих температур и добавлением в исходный полимер специальных модифицирующих добавок, и создает широкий выбор материалов.

12.1. Особенности производства и испытаний материалов для потребителя

На данный момент, ассортимент предлагаемых материалов очень зависит от производителя, а разница между материалами для покупателя определяется не обозначением, включающим в себя заведомо определенные свойства, а маркой, в рамках которой производитель проводит некоторые, интересные ему испытания для определения свойств материала, т.к. строгой и понятной классификации для FDM материалов всё ещё нет. Всё это в большей степени касается потребителей небольших объемов материалов, т.к. распространена практика разработки и изготовления полимерных нитей под нужды заказчика.

Стоит отметить, что государственных стандартов, определяющих порядок проведения испытаний полимерных нитей и деталей, изготовленных по технологии FDM до сих пор не существует, что вносит свои сложности в определение свойств полимерных нитей, интересующих потребителя. Ни один

из существующих стандартов, описывающих методы испытания свойств материала (например, ГОСТ 11262-80 [9]), не учитывает особенности, присущие деталям, изготовленным по технологии FDM. Также стоит обратить внимание на то, что для FDM свойства исходной полимерной нити не в полной мере описывают свойства деталей, изготовленных из неё. Например, следует отдельно учитывать адгезию между слоями детали, которая может оказаться небольшой, несмотря на исходную прочность материала.

Опираясь на все перечисленные выше особенности при выборе материалов для FDM и необходимость для потребителя самостоятельно испытывать свойства изделий (если требуется), производителям конечных изделий рекомендуется особенно тщательно описывать условия испытаний, вносить в протоколы испытаний дополнительные сведения, описывающие структуру образца и другие особенности, присущие FDM и сравнивать напрямую только результаты таких испытаний, которые выполнены в идентичных условиях.

Для сокращения количества испытываемых параметров или же полного отказа от собственных испытаний свойств материалов для FDM, для потребителя в настоящий момент целесообразно разделить применяемость материалов на несколько условных групп, например:

- материалы для ненагруженных деталей;
- материалы для средненагруженных деталей;
- материалы для высоконагруженных деталей;
- гибкие материалы;
- материалы, работающие в агрессивных средах;
- материалы, работающие в условиях низкой или высокой температуры;
- электроизоляционные материалы.

В зависимости от назначения изготавливаемых производством изделий, группы также могут разниться. Для изготовления деталей каждой группы предлагается выбрать одну-две марки материала, характеристики которых пригодны для внесения в одну-три группы. Таким образом на производстве

достаточно будет проводить испытания каждого применяемого материала только в той части, которая присуща группам, в которые он входит. Учитывая, что предприятию потребителю может понадобиться самостоятельно подтверждать свойства приобретаемых материалов, а также производить подготовку производства под каждую новую партию материала, содержание более пяти - шести подготовленных к производству марок материала может быть излишне трудоемко.

На рынке присутствует как минимум несколько отечественных компаний, производящих полимерные нити для 3d-принтеров, работающих по технологии FDM по собственным техническим условиям. Перечень производимых в России материалов практически не уступает таковому на мировом рынке, а многие изготавливаемые российскими компаниями марки полимерных нитей наоборот являются уникальными по своим свойствам. С течением времени можно рассчитывать не только на расширение номенклатуры материалов, но и на должную проработку технической документации.

12.2. Краткий перечень материалов, применяемых в производстве полимерных нитей

Для справки далее приведен краткий перечень полимеров с описанием основных свойств и областей применения. Приведенные характеристики материалов даны условно и могут значительно отличаться в зависимости от производителя и марки материала.

Информация о свойствах материалов в большей степени заимствована из источника [16]. Как видно из представленных характеристик (прочностные характеристики не описаны намеренно), на данном этапе структурировать данные о различиях в полимерных нитях затруднительно. Необходимые

испытания должны быть проведены производителем конечных изделий самостоятельно.

12.2.1. Твердые полимеры

12.2.1.1 ПЛА (полилактид)

Характеристики материала:

Плотность 1,25г/см3;

Температура эксплуатации от минус 20°С до плюс 45°С;

Растворители: дихлорэтан, дихлорметан;

Легко поддается ручной обработке (при условии отсутствия нагрева детали), подходит и для небольших и для крупных деталей, отличается высокой точностью размеров (для FDM), прост в печати;

Позволяет изготавливать большие детали по частям с последующим склеиванием частей растворителем (дихлорэтан, дихлорметан);

Поверхность детали без обработки гладкая, глянцевая, с выраженной слоистостью;

Подходит для применения в некоторой технологической оснастке и в макетах.

Наиболее популярный материал ввиду возможности изготовления деталей из него на практически любом 3d-принтере и низкой цены. Обладает низкой усадкой и высокой точностью построения, подходит для изготовления деталей любых размеров. Ввиду низкой температуры эксплуатации (до плюс 45 °С), используется только для макетирования и иногда для изготовления технологической оснастки. Биоразлагаемый.

12.2.1.2 ПЭТГ (полиэтилентерефталат, модифицированный гликолем)

Характеристики материала:

Плотность 1,30г/см3;

Температура эксплуатации от минус 40°С до плюс 70°С;

Растворители: дихлорэтан, дихлорметан;

Плохо поддается ручной обработке;

Подходит и для небольших и для крупных деталей, относительно прост в печати;

Позволяет изготавливать большие детали по частям с последующим склеиванием частей растворителем (дихлорэтан, дихлорметан).

Почти также прост для построения деталей, как и ПЛА. Низкая температура эксплуатации (до плюс 70 °С) ограничивает применяемость, однако в отсутствии этого ограничения, ПЭТГ часто применяют для корпусов, деталей механизмов и функциональных изделий.

12.2.1.3 АБС (акрилонитрил бутадиен стирол)

Характеристики материала:

Плотность 1,05г/см3;

Температура эксплуатации от минус 40 до плюс 90 °С;

Влагопоглощение 0,2-0,4%;

Стоек к щелочам, смазочным материалам;

Не стоек к УФ излучению (необходимо покрытие);

Растворители – ацетон, бензол, эфир, анизол, анилин, этилхлорид, этиленхлорид, дихлорэтан;

Горюч (существуют модифицированные самозатухающие марки АБС);

Электрическая прочность 14 кВ/мм (FDM образцы);

Электрическое сопротивление 5*10^14 Ом*см;

Поверхность детали без обработки гладкая, полуматовая, с выраженной слоистостью;

Легко поддается ручной обработке, подходит и для небольших и для крупных деталей, отличается высокой точностью размеров (для FDM), прост в печати;

Позволяет изготавливать большие детали по частям с последующим склеиванием частей растворителем (ацетон);

Подходит для применения в технологической оснастке, КИА, оборудовании, работающем в помещениях;

Плохо поддается обработке резанием на станках, трескается по слоям и крошится при обработке тонких стенок;

Для печати требуется как минимум закрытый объем построения (от плюс 50 °С и выше).

Один из наиболее широко применяемых как в промышленности, так в частности и в FDM технологии полимеров. При такой же низкой стоимости как у ПЛА и ПЭТГ, данный материал работает при температурах до плюс 90 °С, что достаточно для многих задач. АБС часто применяют для корпусов, деталей механизмов и функциональных изделий. Уязвим к ультрафиолету.

Композиты на основе АБС с добавлением стекло- и углеволокна как правило отличается от АБС повышенной прочностью и меньшей ползучестью. Стойкость к УФ излучению несколько увеличивается. Уменьшается усадка материала, увеличивается точность размеров. Поверхность детали без обработки матовая, шероховатая, слоистость скрывается шероховатостью.

Подходят для применения в технологической оснастке, КИА, оборудовании, работающем в помещениях. Хорошо подходят для изготовления формообразующей оснастки при работе в основном на сжатие.

12.2.1.4 АСА (акрилонитрил стирол акрилат)

Родственный АБС материал, но стойкий к ультрафиолетовому излучению, а потому лучше подходящий для эксплуатации на открытом воздухе или вблизи искусственных источников ультрафиолета. В остальном свойства и сферы применения АСА и АБС аналогичны.

12.2.1.5 ПП (полипропилен)

Характеристики материала:

Плотность 0,9г/см3;

Температура эксплуатации от минус 10 до плюс 80 °С;

Способен выдерживать циклические нагрузки;

Низкий коэффициент трения по стали и др. материалам;

Стоек к реагентам, включая растворы кислот и щелочей, минеральные и растительные масла, растворы солей, различные органические растворители, в том числе спирты, ацетон и бензин;

Не стоек к ультрафиолету;

Для изготовления деталей с точными (в рамках FDM) замерами требуется особо тщательная подготовка производства;

Поддается механической обработке;

Плохо поддается ручной обработке, кроме термической, подходит только для небольших деталей;

Для печати требуется подогреваемый объем построения (от плюс 80 °С и выше).

Материал с высокой прочностью и ударной вязкостью, обладает высоким сопротивлением к истиранию и механической усталости. Применяется для изготовления корпусов, функциональных частей механизмов и

технологической оснастки. Не армированные волокном марки ПП крайне сложны в печати.

12.2.1.6 ПММА (полиметилметакрилат)

Применяется в FDM как правило для изготовления литейных мастер-моделей. Материал отличается низким объемом зольных остатков после выжигания и низким коэффициентом теплового расширения, что позволяет печатать модели, выстраивать вокруг них гипсовые или песчаные формы, затем выжигать полимер и заливать полости металлами.

12.2.1.7 ПА (полиамид)

Свойства могут значительно отличаться в зависимости от марки полиамида. Для примера приведены свойства ПА6 с наполнением стекловолокном.

Характеристики материала:

Плотность 1.05г-1,15/см3;

Температура эксплуатации от минус 60°С до плюс 90°С (до плюс 150°С кратковременно) (для некоторых марок температура эксплуатации может доходить до плюс 160 °С, кратковременно до плюс 200 °С);

Способен выдерживать циклические нагрузки;

Низкий коэффициент трения по стали и др. материалам;

Стоек к спиртам, щелочам, маслам, бензину;

Не стоек к УФ излучению (необходимо покрытие);

Растворитель - концентрированная серная кислота, фенол, крезол, хлорал, трифторэтанол;

Поддается механической обработке, обработка ручным инструментом кроме режущего затруднена;

Поверхность детали без обработки матовая, шероховатая, слоистость скрывается шероховатостью;

Точность размеров (для FDM) зависит от марки материала;

Для печати требуется подогреваемый объем построения (от плюс 80 °С и выше);

Подходит для применения в качестве заменителя деталей из ПА12, ПА6;

Подходит для нагруженных механических элементов.

Полиамиды подходят для производства прочных и износостойких механических деталей, и защитных кожухов.

Полиамиды редко применяются в FDM без наполнения стекло- и углеволокном из-за высокой усадки.

12.2.2. Эластомеры

12.2.2.1. ТПЭ (термопластичные эластомеры) и ТПУ (термопластичный полиуретан)

Большая группа схожих по характеристикам материалов, варьирующихся в основном по твердости.

Характеристики материала:

Плотность 1.1-1.2г/см3;

Температура эксплуатации от минус 40°С до плюс 100°С;

Электрическая прочность 13,1 кВ/мм (FDM образцы);

Электрическое сопротивление 1,82*10^12 Ом*см;

Подходит для деталей с циклической переменной нагрузкой;

Стоек к маслам, бензинам, щелочам и некоторым кислотам;

Не поддаётся механической обработке на станке, обработка ручным инструментом крайне затруднена. Как правило обрабатывается термически;

Склеивается при помощи синтетических каучуков или под воздействием высоких температур.

Гибкий материал. Подобные материалы обычно используются в производстве защитных чехлов, прокладок и уплотнителей, электрической изоляции, труб и шлангов, накладок на рабочие инструменты. Материалы как правило обладают стойкостью к маслам, бензину, разбавленным кислотам и щелочам, а также выдерживают эксплуатационные температуры от -40°C до +100°C.

12.2.2.2. СЭБС (стирол этилен бутилен стирол)

Характеристики материала:

Плотность 0.95г/см3;

Температура эксплуатации от минус 35°C до плюс 85°C;

Электрическая прочность 21 кВ/мм (FDM образцы);

Электрическое сопротивление 1,6*10^15 Ом*см;

Не стоек к УФ излучению;

Не стоек к бензину и минеральным маслам;

Не поддаётся механической обработке на станке, обработка ручным инструментом крайне затруднена. Как правило обрабатывается термически;

Склеивается при помощи синтетических каучуков или под воздействием высоких температур.

Синтетический каучук, используемый в производстве автомобильных шин и ковриков, обувных подошв и множества других резиновых изделий. Выдерживает нагрузки на сжатие, растяжение и кручение, обладает хорошей

упругостью и износостойкостью, стоек к сильным перепадам температур, а также различным химикатам.

12.2.3. Тугоплавкие полимеры

12.2.3.1. ПСФ (Полисульфон)

Характеристики материала:

Плотность 1.24г/см3;

Температура эксплуатации от минус 70°С до плюс 170°С;

Точность размеров (для FDM) высокая, для печати требуется подогреваемый объем построения, от плюс 100°С и выше, температура платформы построения от плюс 140°С и выше температура сопла от плюс 380°С и выше;

Подходит для нагруженных механических элементов.

Тугоплавкий, высокопрочный полимер, стойкий к бензину, антифризам и моторным маслам, обладающий низкой ползучестью и демонстрирующий равномерное тепловое расширение при нагревании, а также устойчивый к воздействию гамма-излучения. Полисульфон применяется в производстве различных механических деталей. Помимо высокой прочности и химической стойкости материал отличается широким диапазоном эксплуатационных температур — от минус 70°С до плюс 170°С.

12.2.3.2 ПЭЭК (полиэфирэфиркетон)

Характеристики материала:

Плотность 1.3г/см3;

Температура эксплуатации от минус 70°С до плюс 275°С;

Для печати требуется подогреваемый объем построения, от плюс 140°С и выше, температура платформы построения от плюс 150°С и выше температура сопла от плюс 400°С и выше;

Для получения оптимальных прочностных характеристик необходимо плавное охлаждение и рекристаллизация материала после печати, что требует использования оборудования с возможностью плавно регулировать температуру объема построения;

Подходит для нагруженных механических элементов.

Тугоплавкий конструкционный термопласт с широким спектром применения — от производства авиационных комплектующих до медицинских имплантатов. Материал может соперничать по прочности с алюминиевыми сплавами, обладает высокой химической стойкостью, высокой температурой тепловой деформации, а также биосовместим в чистом виде, что делает возможным применение в травматологии. Варианты использования включают производство подшипников, поршней, насосов, клапанов, электрической изоляции, эндопротезов.

12.2.3.3 ПЭКК (полиэфиркетонкетон)

Применяется для изготовления функциональных изделий, обладает высокой прочностью, широким диапазоном рабочих температур (до плюс 255 °С) и сопротивляемостью износу. Схож с ПЭЭК, но более прост для FDM.

12.2.4. Материалы поддерживающих структур

В качестве поддерживающих структур для ПЛА и ПЕТГ, применяется материал на основе ПВС (поливиниловый спирт), растворяющийся в воде. Для АБС применяют ПС (полистирол), растворимый в д-лимонене. Существуют материалы для отделяемых поддерживаемых структур, используемые совместно с ПА.

13. Общие сведения об FDM 3d-принтерах

В данном разделе кратко описаны общие сведения о различиях в оборудовании для FDM. Как правило, выбор оборудования для производства изделий является задачей технологической службы, однако, конструктору может быть полезно знать общие сведения. В разделе не учтены узкоспециализированные системы, отличные от 3d-принтеров «общего применения».

Значимые различия в 3d-принтерах можно описать следующим списком:

1) Кинематическая схема приводов печатающей головы и платформы построения по осям X, Y, Z;

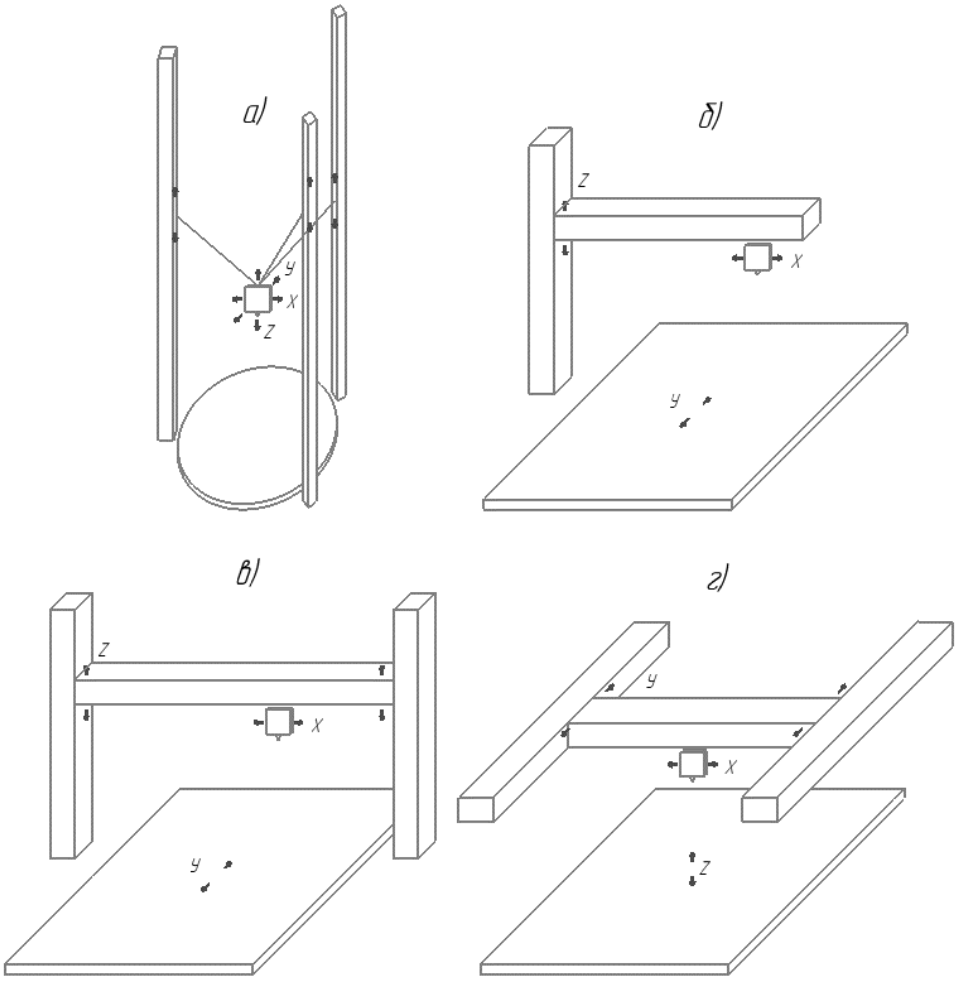


Рисунок 62 – Наиболее распространенные схемы приводов 3d-принтеров.

а) кинематика «Дельта», б) консольная кинематика, в) кинематика «Пруша», г) «Core-XY» или «H-bot» кинематика (в зависимости от схемы расположения ремней)

В профессиональном оборудовании как правило используется одна из разновидностей схемы, изображенной на рисунке 62 г), т.к. она является наиболее точной и жесткой, а также удобной для реализации подогреваемой рабочей камеры.

2) Кинематическая схема подачи полимерной нити в сопло;

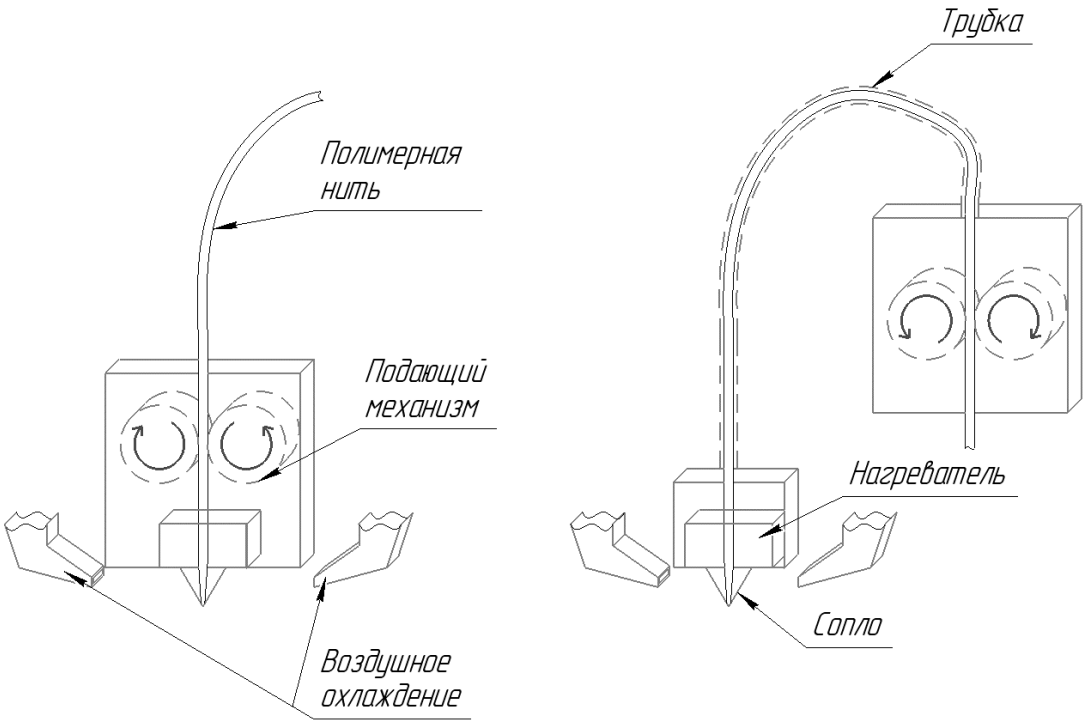


Рисунок 63 – Схемы подачи полимерной нити (упрощенный вид).

Схема, изображенная на рисунке 63 справа («bowden extruder» или экструдер с удаленной подачей материала), в профессиональном оборудовании практически не используется, т.к. основное её достоинство- малый вес, что должно позволить использовать приводы с меньшей жесткостью. Недостатками являются низкая точность подачи полимерной нити и плохая совместимость с гибкими материалами. Схема, изображенная слева («direct extruder» или экструдер с прямой подачей материала) наоборот, имеет больший вес за счёт установленного на печатающей голове двигателя, но обладает многократно большей точностью подачи материала и возможностью работы с гибкими материалами (ТПЭ), т.к. подающий механизм расположен непосредственно перед соплом.

3) Максимальная температура нагрева сопла и производительность печатающей головы (объем расплава, который может быть экструдирован за единицу времени без значимого снижения температуры расплава);

Для обеспечения наилучших характеристик деталей, изготавливаемых по технологии FDM из какого-либо материала, необходимо поддерживать соответствующую температуру расплава, укладываемого на предыдущий слой детали с достаточной точностью. При использовании сопел больших диаметров и увеличении скорости построения, требуемая температура сопла также растет. Исходя из этого, при выборе оборудования требуется учитывать температурные режимы, необходимые для материалов, с которыми предполагается работать, с некоторым запасом.

4) Максимальная температура нагрева платформы построения;

Температура платформы построения, как и температура сопла, выбирается исходя из используемого материала. Подогрев платформы построения требуется для того, чтобы снизить усадку прилегающих и близких к ней слоев строящейся детали для исключения их деламинации.

5) Максимальная температура рабочей камеры;

Подогрев рабочей камеры выполняет ту же функцию, что и подогрев платформы построения, но воздействует на всю деталь. Также, меньшая разница температуры между уже уложенными и укладываемым слоем детали, позволяет повысить точность изготовления детали за счёт меньшей усадки в процессе построения и повышает время остывания наносимого расплава, повышая адгезию между слоями детали. Для большинства «инженерных» материалов, подогреваемая камера необходима для успешного завершения построения детали ввиду их высокой усадки. Для некоторых материалов достаточно тепла, излучаемого платформой построения, при условии, что рабочая камера 3d-принтера защищает изготавливаемую деталь от влияния внешней среды (потоков воздуха в помещении). Рабочие камеры без

нагревателей называют пассивными, а с нагревателями- активными. 3d-принтеры без рабочей камеры называют открытыми.

При выборе 3d-принтера с активной камерой, важна возможность программирования температурного цикла камеры для обеспечения правильного технологического процесса охлаждения для некоторых материалов.

6) Реализация охлаждения расплава в пространстве построения и непосредственно в зоне экструзии;

Как правило, для принудительного охлаждения зоны расплава используется один или несколько вентиляторов, расположенных на печатающей голове. Реже используется подача сжатого воздуха. Принудительное охлаждение применяется для ускорения охлаждения участков деталей с малым сечением, для которых естественный отвод тепла затруднен, что может приводить к перегреву, а также для печати нависающих элементов и «мостов», позволяя быстрее отверждать расплав, который не поддерживается нижними слоями детали. Качество охлаждения зоны расплава может значительно влиять на качество изготовленных изделий.

7) Размеры пространства построения;

Выбирают исходя из размеров изделий, которые предполагается изготавливать. Следует учитывать, что изготовление небольших единичных изделий в 3d-принтере с большим объемом пространства построения может быть не удобным с точки зрения времени выхода оборудования на режим и затрат энергии.

8) Наличие возможности для многоматериальной печати (печать несколькими материалами в процессе одного цикла построения) и механика ее реализации;

Печать как минимум двумя материалами одновременно значительно расширяет возможности для проектирования деталей и часто снижает время, затрачиваемое на постобработку. Это возможно благодаря специализированным материалам, которыми выполняются поддерживающие структуры. Такие материалы могут быть либо растворимыми в какой-либо среде, которая не взаимодействует с материалом детали, либо отделяемыми, с определенной степенью адгезии материала детали к материалу поддерживающей структуры, которая позволяет поддерживать деталь в процессе печати, но отделяется от неё с небольшими трудозатратами. При использовании таких материалов, зазор между поддерживающими структурами и деталью отсутствует, что создает гладкие нависающие поверхности. При использовании в качестве поддерживающих структур того же материала, из которой изготавливается деталь, необходимо соблюдать зазор между поддерживающими структурами и деталью, что в конечном счете значительно влияет на внешний вид и прочность детали.

9) Поддерживаемый диаметр полимерной нити;

Основные диаметры выпускаемых полимерных нитей- 1,75 и 2,85 мм. Диаметр 1,75 мм получил наибольшее распространение.

10) Наличие системы очистки воздуха в рабочей камере;

Система очистки воздуха необходима для обеспечения безопасности работы в помещении, в котором расположено оборудование.

11) Системы контроля процесса построения;

Существует множество систем различной сложности, автоматизирующих контроль работы 3d-принтеров, среди них, например, датчик окончания нити, система автоматического создания карты высот и настройки расположения платформы построения, системы контроля потока экструдируемого материала, системы на основе машинного зрения для контроля геометрии изготавливаемой детали и другие.

12) Дополнительный функционал;

Как правило, представляет из себя дополнительные узлы, как четвертая ось для вращения платформы построения, инструменты для механической обработки построенной детали и прочее.

13) Поддерживаемые процессоры САП.

Заявленная поддержка 3d-принтером рабочих программ, подготовленных на конкретном процессоре САП.

Все описанные различия важны при выборе оборудования под задачи производства, однако для инженерных задач, решение которых рассматривается в данном тексте, существует устоявшийся набор признаков и решений:

1) Жесткий, массивный корпус с подогреваемой камерой закрытого типа;
2) Точная механика всех приводов оборудования;
3) Возможность одновременно печатать двумя материалами для изготовления отделяемых или растворяемых поддерживающих структур из материалов, отличных от материала детали;

4) Поддерживаемые температуры сопла, платформы построения и рабочей камеры, позволяющие строить изделия из «инженерных» материалов, начиная с полиамидов, выдерживая необходимые температурные режимы;
5) Подключение к вытяжной вентиляции или другие системы, обеспечивающие защиту персонала от вредных веществ, выделяемых полимерной нитью при построении изделий.

Большинство профессиональных 3d-принтеров, предназначенных для работы с тугоплавкими полимерами, имеют вышеописанные признаки, различаясь при этом объемом пространства построения, различным набором систем контроля процесса построения и дополнительными функциями, некоторые из которых могут значительно влиять на возможности, предоставляемые оборудованием.

Наличие таких функций может потребовать особого подхода к проектированию изделий, отличного от того, что изложено в данном тексте.

Как сказано выше, на данном этапе развития технологии FDM, 3d-принтеры, предназначенные для решения инженерных задач, очень схожи и большинство из них может работать с исполнительными программами, разработанными в свободно распространяемых процессорах САП, предназначенных для общего применения. Такие процессоры САП на момент написания данного текста являются комплексно (в части общих функций, необходимых для подготовки программы для 3d-принтера) наиболее продвинутыми, т.к. поддерживаются сообществом.

Однако, наличие каких-либо проприетарных функций может потребовать использования специализированного процессора САП, предоставляемого производителем. Как правило, такие процессоры САП разрабатываются на базе одного из процессоров САП с открытым исходным кодом и со временем могут устаревать.

Кроме того, без преувеличения, возможности применяемого процессора САП оказывают не меньшее влияние спектр возможных решений при проектировании детали, чем используемый 3d-принтер. За годы существования технологии FDM, её развитие определялось либо в равной, либо в большей степени развитием процессоров САП, нежели развитием механики 3d-принтеров.

Еще одним важным нюансом в пользу оборудования, совместимого со свободно-распространяемыми процессорами САП может стать возможность передачи документации на изделие на другое предприятие, применяющее технологию FDM.

Таким образом, в общем случае, одним из главных критериев выбора оборудования является его совместимость с желаемым процессором САП, если нет особых требований к его функциональным возможностям. Другие особенности оборудования, если оно удовлетворяет минимальным требованиям, описанным выше, носят необязательный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение технологии FDM в настоящее время ограничено сложностью в достижении постоянства и предсказуемости прочностных характеристик деталей, требовательностью к подготовке производства для поддержания заданной точности деталей без механической обработки и другими факторами, такими как низкая прочность, пористость, небольшой диапазон рабочих температур для большинства материалов и ограничения размеров деталей и их элементов.

Точность изготовления деталей в пределах 12-13 квалитетов достижима как на профессиональном, так и на любительском оборудовании при соблюдении некоторых условий. Пористость, и, как следствие, низкая герметичность, также является решаемой проблемой при применении покрытий и пропиток. Всё шире распространяются такие высокопрочные инженерные материалы, как PSU с рабочими температурами от минус 70 до плюс 170 °C, PEEK с рабочими температурами от минус 70 до плюс 275 °C и другие материалы, значительно расширяющие применение технологии FDM в сторону высоких температур.

Наиболее сложным и не изученным вопросом остается прочность деталей, т.к. она зависит от множества факторов, как форма, сложная и не в полной мере контролируемая внутренняя структура детали, режимы и точность соблюдения нагрева сопла, подогреваемой платформы, камеры, движения кинематики 3d принтера, а также характеристики исходной полимерной нити – её химический состав и точность её размеров. Некоторые из этих факторов можно выделить и изменять отдельно в процессе подготовки производства, но учитывая их взаимное влияние друг на друга, прогнозировать свойства будущей детали приходится с большим коэффициентом запаса прочности, учитывая также низкую повторяемость при изменениях в технологии или оборудовании.

Данное пособие посвящено ещё одному фактору, который ограничивает применение 3D-печати по технологии FDM – пониманию конструктором общих принципов конструирования и особенностям, присущим данному методу. Правильное использование рекомендаций, изложенных в пособии может расширить область применения технологии в производстве и избежать возможных ошибок. Многие рекомендации направлены на повышение точностных и прочностных характеристик, что может расширить область применения технологии в сторону нагруженных изделий, деталей с большими требованиями к точности и сократить механическую обработку.

В такой технологии, где объектом для конструирования является не только внешняя поверхность, но и сложная внутренняя структура, влияние конструкторских решений на конечные свойства изделия очень высоко и должно быть использовано как дополнительная возможность повысить качества изделий.

Работа адресована студентам и преподавательскому составу ВУЗов, а также конструкторам, желающим ознакомиться с данной технологией.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 57558-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1 Термины и определения.
2. ГОСТ Р 59100-2020 Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования.
3. ГОСТ 33366.1-2015 Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Часть 1 Основные полимеры и их специальные характеристики.
4. ГОСТ Р 57911-2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Термины и определения.
5. ГОСТ 23501.603-84 Системы автоматизированного проектирования.
6. ГОСТ 30893.1-2002 Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками.
7. ГОСТ Р 59037-2020 Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы.
8. ГОСТ 24705-2004 Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры.
9. ГОСТ 11262-80 Пластмассы. Метод испытания на растяжение.
10. Р.А. Мэллой. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / пер. с англ. яз. под. ред. В.А. Брагинского, Е.С. Цобкалло, Г.В. Комарова — СПб.: Профессия, 2006. — 512 стр., ил.
11. О.В. Белова. Перспективы применения аддитивных технологий для энергетического оборудования // Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Материалы III Международной научной конференции, Москва, 23 марта 2017 года.
12. А. В. Балашов, М. И. Маркова. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона, 2019, №1.

13. Носко Е.А., Одинокова И.В., Чеканов А.Ю. Экспериментальная оценка влияния параметров 3D-печати на прочность изделия // journal of advanced research in technics science, 2018, №9-1.
14. Турченко М.В.; Гончарова Ю.А.; Касимов Р.М. Исследование прочности 3D-печатных изделий при варьировании технологических параметров в процессе печати // Агроинженерия. – 2023. – №2.
15. https://3dtoday.ru/wiki - онлайн база знаний по 3D печати
16. https://rec3d.ru/rec-wiki/ - онлайн база знаний по 3D печати

Приложение 1. Примеры оптимизации деталей для изготовления по технологии FDM

Деталь 1. Корпус для батареи питания

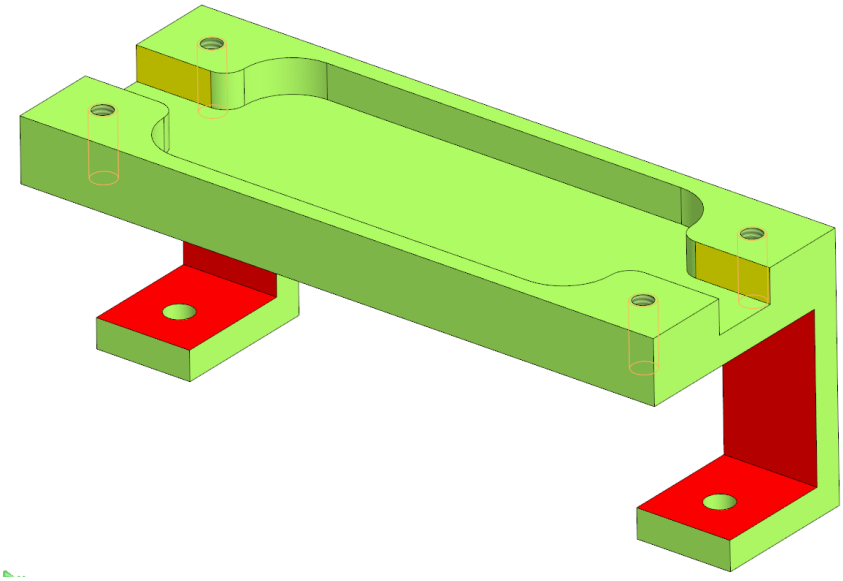
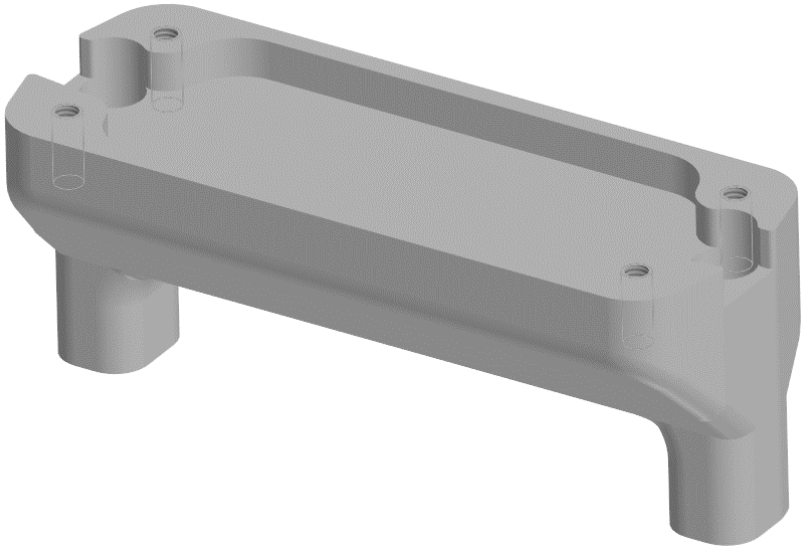


Рисунок 1 - Исходный вариант корпуса для батареи питания.

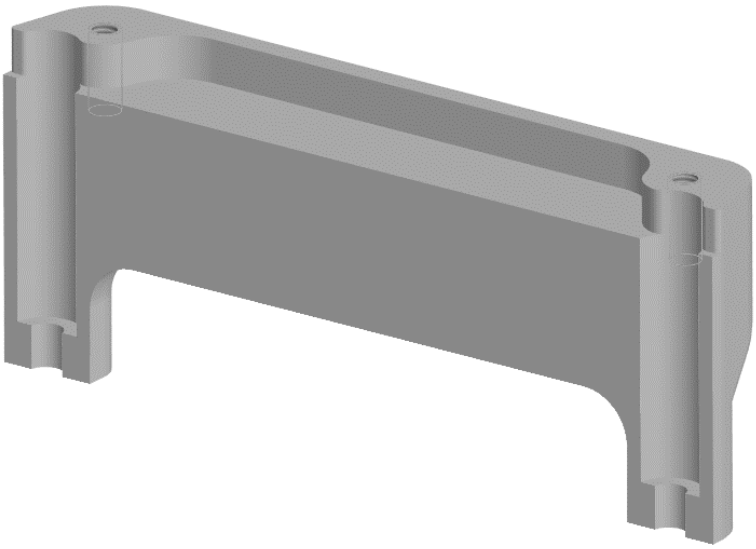
Основная проблема для изготовления по технологии FDM- неудачно реализованный кронштейн для крепления на плату (поверхности красного цвета). При любом расположении детали на платформе построения, часть поверхностей будет нависать, общая площадь слоя в нагруженной части, предназначенной для крепления к плате чрезмерно мала (3х10 мм на каждую ножку кронштейна).

Решение проблемы- увеличение сечения ножек до возможного максимума с проведением крепежных отверстий через всю высоту детали. Для уменьшения высоты ножек и уменьшения количества поддержек, нижняя часть корпуса утолщена, кромки оформлены максимальными по размеру фасками под углом 45°. Учитывая заполнение детали в 20%, такое решение упрочняет конструкцию без значительного изменения расхода материала.

В числе прочих изменений- вертикальные углы скруглены, а верхняя поверхность детали (см. поверхности, окрашенные в желтый цвет) по возможности выполнены эквидистантно крепежным отверстиям крышки.



А)



Б)

Рисунок 2 - Доработанный вариант корпуса для батареи питания.

А- деталь целиком, Б- сечение детали.

Деталь 2. Ручка.

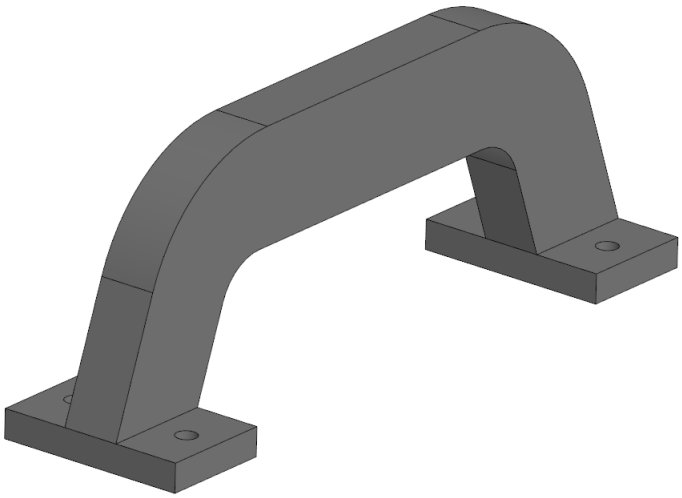


Рисунок 3 - Исходный вариант ручки.

Форма ручки не эргономична, имеется возможность увеличить жесткость на излом у основания.

Решение - сечение ручки у основания увеличено радиусами 15 мм. Отверстия восстановлены, добавлено обнижение под гайку. Радиусы на нависающей поверхности выбраны из соображений эргономики. Данные радиусы будут изготовлены с поддерживающими структурами, объем которых уменьшен за счёт не нависающей части радиусов.

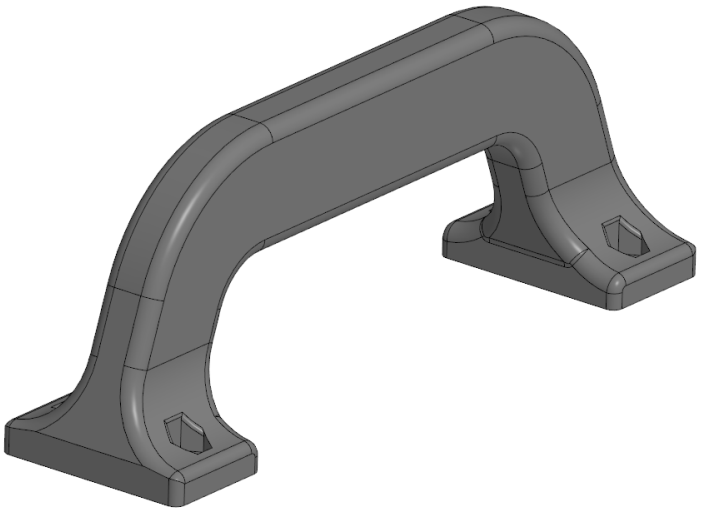


Рисунок 4 - Доработанный вариант ручки.

Деталь 3. Ручка

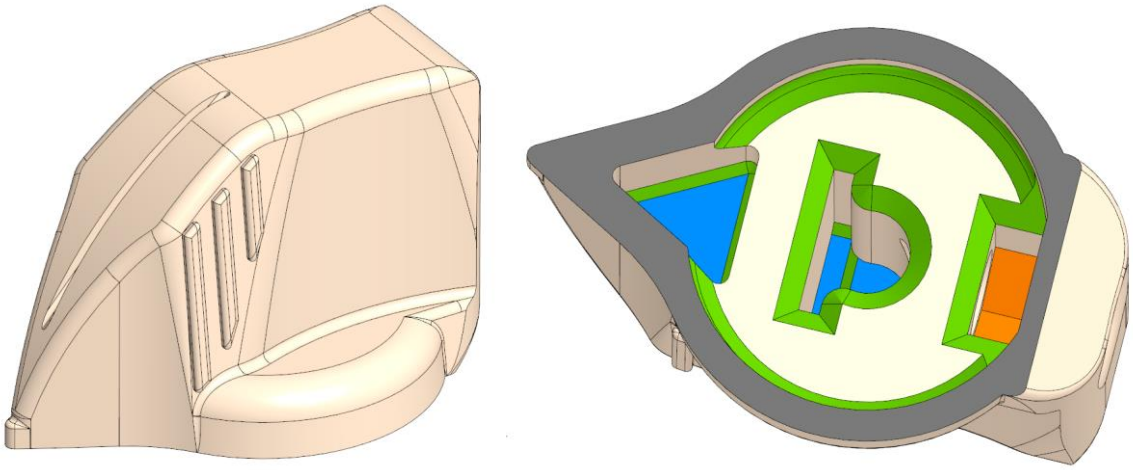


Рисунок 5 - Ручка, виды сбоку и снизу.

Ручка изначально спроектирована для изготовления по технологии FDM. В нижней части ручки множество нависающих поверхностей (показаны синим цветом), продиктованных её функциональностью, а также треугольное обнижение, вырезанное в носике ручки для придания жесткости пазу под упорную пластину за счёт создания дополнительной стенки. Эти поверхности не требуют поддерживающих структур, т.к. они обрамлены вертикальными стенками со всех сторон и относительно малы. Такие поверхности легко изготавливаются «мостами», т.е. натягиванием нити между опорами.

Нависающие поверхности под гайку (показаны оранжевым) не требуют поддерживающих структур за счёт сочетания угла нависания и размера поверхностей.

Оставшаяся на дне нависающая поверхность максимально сокращена фасками (показаны зелёным) для уменьшения объёма поддерживающих структур. Т.к. поддерживающие структуры в данном случае не примыкают к детали, отступая от неё на размер фаски, они легко удаляются после изготовления детали.

Деталь 4. Корпус насоса

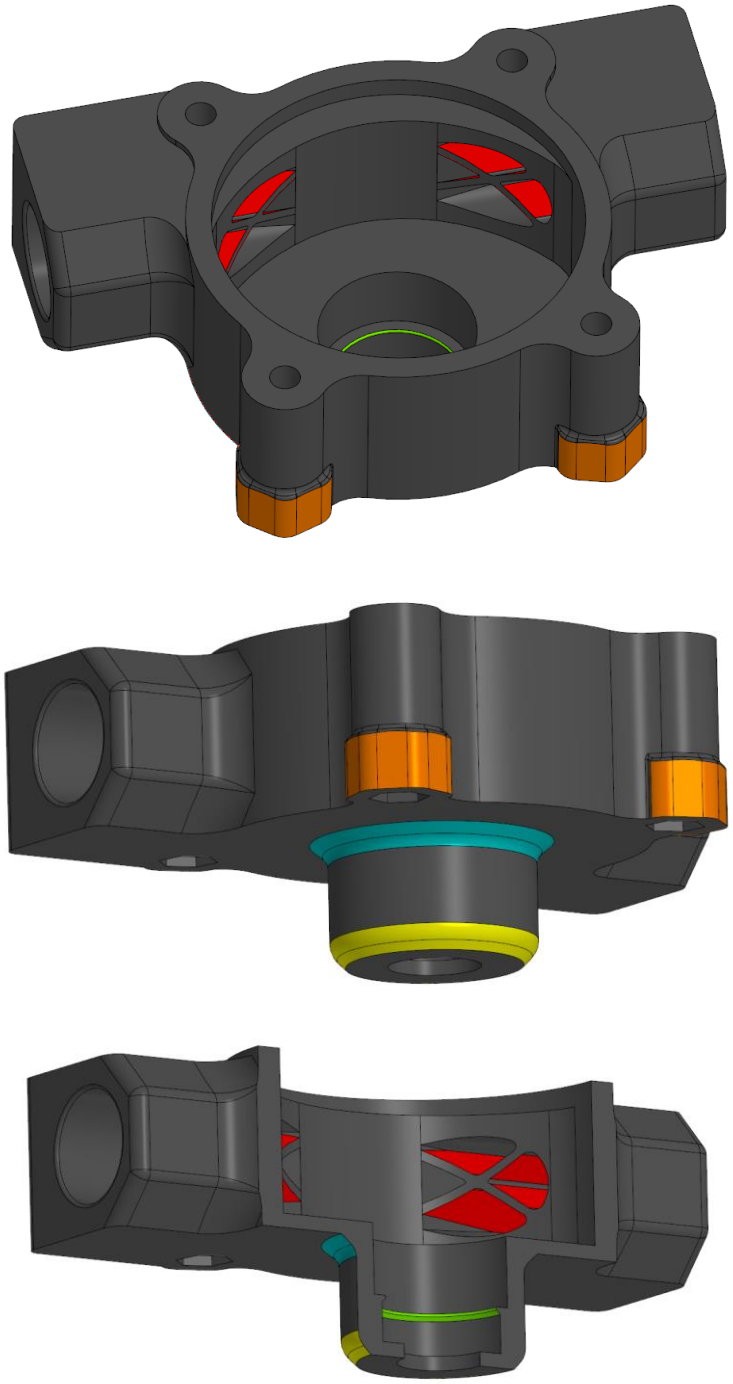


Рисунок 6 - Виды и сечение корпуса насоса

Корпус спроектирован для изготовления по технологии FDM. Референс для проектирования- корпус, выполненный из полиамида методом литья.

Ребра в каналах (показаны красным цветом) выполнены под углом 45° для исключения нависания. Толщина ребер в горизонтальном сечении не

менее 1,4 мм, что достаточно для расположения двух линий в каждом слое при печати соплом Ø 0,6 мм.

Ступенька для фиксации прокладки (показана зеленым) выполнена с фаской, так же для исключения нависания, т.к. удаление поддерживающих структур из подобных полостей затруднено.

Фаска, совмещенная с радиусом на основании корпуса (показаны синим) кроме упрочнения конструкции дополнительно дистанцируют поддерживающие структуры от цилиндрической части корпуса, что упрощает их удаление.

Фаска с радиусом внизу цилиндрической части корпуса (показаны желтым)- классический пример оформления кромки поверхности построения.

Утолщения вокруг обнижений под установку гаек выполнены эквидистантно и требуются для выдерживания толщины стенки. Высота утолщения на 2 мм больше глубины гайки (таким образом над утолщением нет заполнения, только слои крышки и дна, что делает крепежное отверстие жестким на сжатие).

Деталь 5. Диск

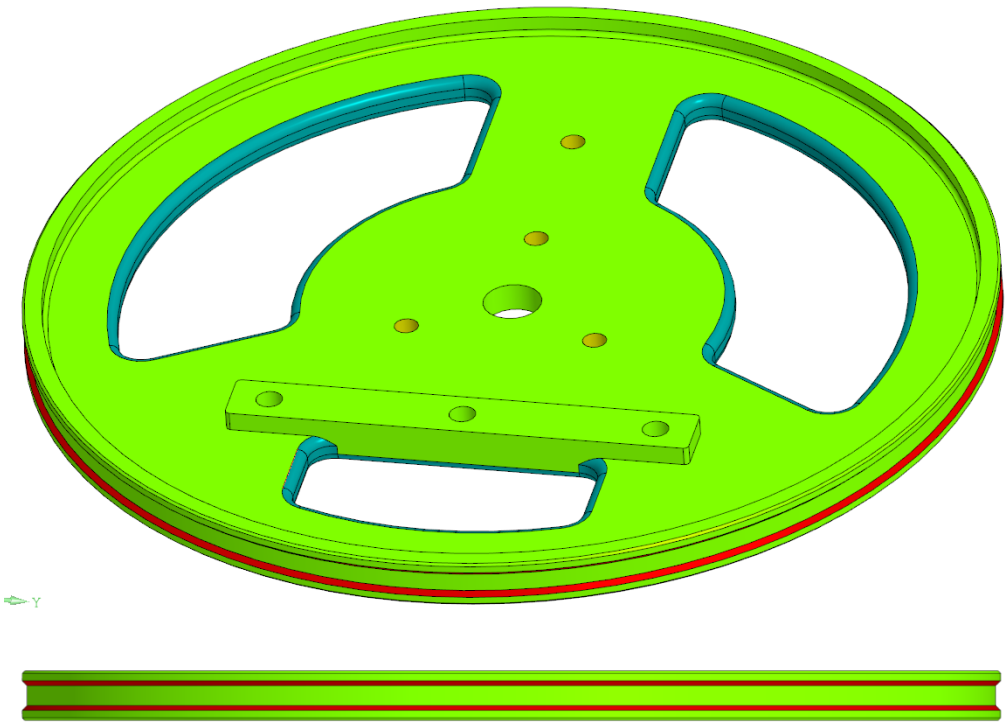


Рисунок 7 - Диск

Диск спроектирован для изготовления по технологии FDM. Окна (показаны синим цветом) выполнены для облегчения конструкции, но несут и другую функцию- стенки окон связывают дно и крышку детали. Для этого введены так же и не функциональные отверстия (показаны желтым цветом). Кольцевая канавка оформлена фасками (показаны красным цветом) для исключения поддерживающих структур. Ответные детали имеют такую же форму выступа.

Существует исполнение диска со сплошной стенкой. В такой детали так же выполнены окна, но не сквозные. Толщина стенки (в координатах FDM детали- дна) под окном 1мм.

Деталь 6. Ручка

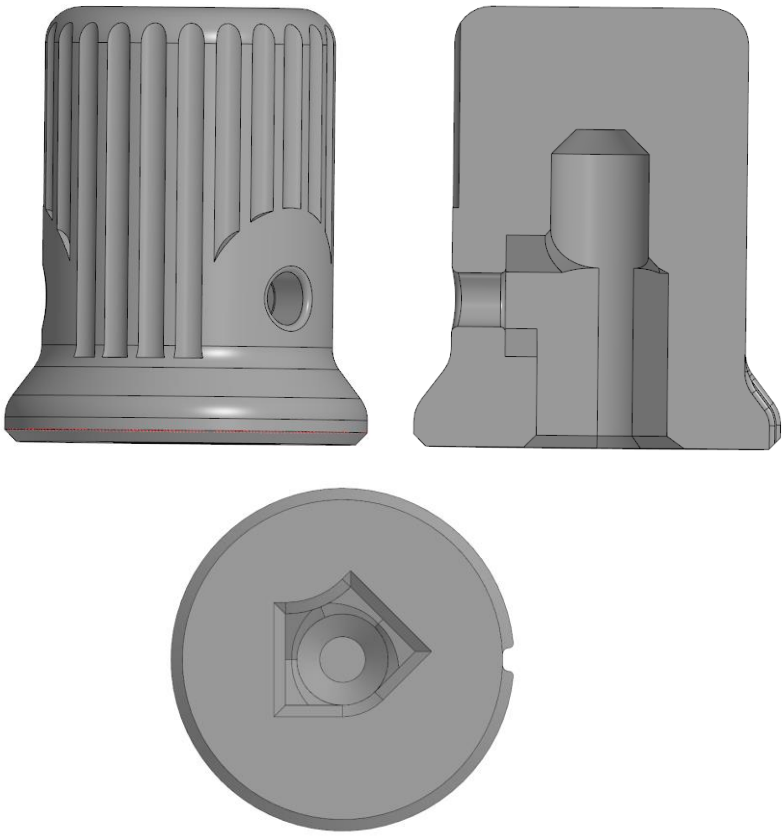


Рисунок 8 - Ручка, её сечение и вид снизу

Ручка спроектирована для изготовления по технологии FDM как аналог ручки, выполняемой субтрактивными технологиями. Основным отличием от оригинала является замена резьбы М2 на обнижения под запрессовку гаек М2, т.к. материал ручки не подходит для нарезания столь малых резьб, способных выдержать предполагаемую для них нагрузку.

Для упрощения сборки ручки с гайками М2, входное отверстие для оси расширено пазами для введения гаек. Как видно на сечении ручки, пазы служат только для введения, а фиксация гайки происходит в дополнительном шестигранном обнижении, в которое гайка запрессовывается при затягивании винта. Сочетание паза с шестигранным обнижением одновременно обеспечивает и относительную простоту сборки, и фиксацию гайки от проворота на все шесть граней.

Деталь 7. Эргономичная накладка

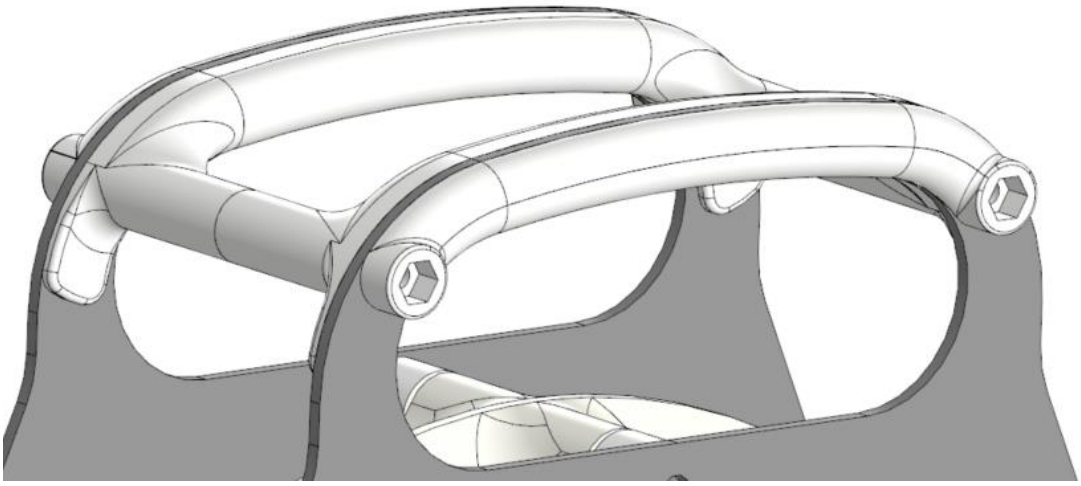


Рисунок 9 – эргономичные накладки

Технология FDM хорошо сочетается с деталями, изготовленными из листовых материалов. Листовые материалы хорошо подходят для изготовления прочных деталей большой площади, например, каркасов, но для придания изделиям из них объема могут потребоваться значительные дополнительные трудозатраты и оснащение. В таких случаях создание объема с помощью деталей, изготовленных по технологии FDM может повысить технологичность и эргономичность изделий.

Сочетание координатного пресса (или другой технологии быстрого раскроя листовых материалов), 3D-принтера и стандартных крепежных изделий может быть очень эффективным для самых разных задач.

Деталь 8. Шестерня

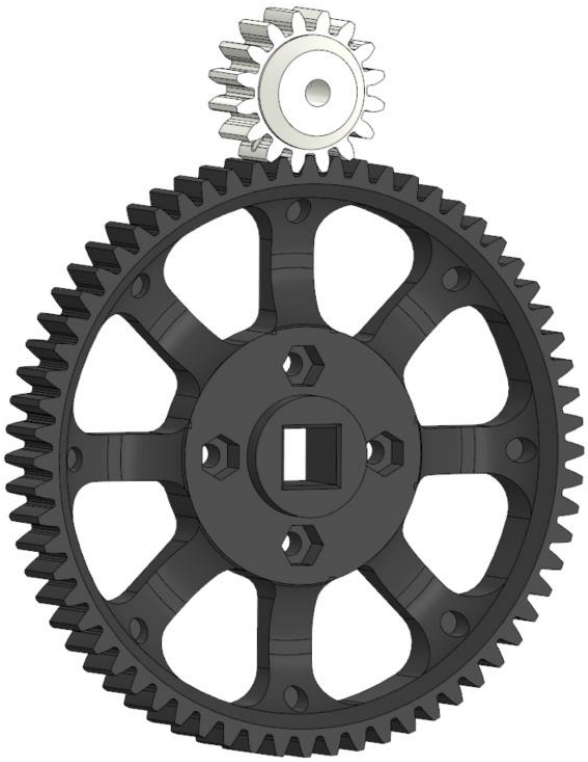


Рисунок 10 – Кинематическая пара для изготовления по технологии FDM

По очевидным причинам, шестерни, изготовленные по технологии FDM, не могут быть использованы в точных механизмах, по крайней мере без дополнительной механической обработки. При проектировании шестерен следует учитывать геометрические размеры зуба, т.к. зуб со слишком маленьким модулем может быть изготовлен некорректно. Для сохранения точности рабочей поверхности зуба по всей высоте рекомендуется уделять особое внимание фаске по периметру поверхности построения.

Как правило, кинематические пары, изготовленные по технологии FDM, требуют прикатывания в течении некоторого времени для уплотнения и снижения шероховатости наружного слоя материала зуба.

Несмотря на низкую точность размеров, шестерни из конструкционных материалов находят широкое применение в механизмах ввиду сравнительно низких затрат на изготовление.

Арташов Артем Дмитриевич
Талыгин А... Д...

ПОСОБИЕ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM

Учебное пособие

Подписано в печать 28.11.2024. Формат 60×84/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 15,25. Тираж 50. Заказ 5271.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.