

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, д.т.н., профессор

_____ / А.Н. Лысов /

«_____» _____ 2018г

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

_____ / А.Л. Шестаков /

«_____» _____ 2018г.

Разработка датчика давления, изготавливаемого с применением 3D-технологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-521. ВКР

Руководитель, к.т.н, доцент

_____ / Д.А. Кацай /

«_____» _____ 2018 г.

Автор

студент группы КЭ–225

_____ / Н.О. Семеренко/

«_____» _____ 2018г.

Нормоконтролер, к.т.н, доцент

_____ / А.С. Волосников /

«_____» _____ 2018г.

АННОТАЦИЯ

Семеренко Н.О., Разработка датчика давления, изготавливаемого с применением 3D-технологии.
– Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-225; 2018, 110 с. 47 ил.,
библиогр. список – 50 наим., 4 прил.

В данной работе осуществлен информационный поиск по теме исследования. Произведен расчет надежности датчика давления изготавливаемого с применением 3D-технологий. Разработана 3D-модель датчика давления. Проведены прочностные и жесткостные расчеты в программе SolidWorks. На основе исходных данных выполнена оценка качеств точности изготовления деталей датчика, времени и количества материалов, необходимых для его изготовления. Качества для технологии послойного наплавления (FDM) определены в диапазоне от 9 – 14, для технологии лазерного спекания (DMLS) в диапазоне от 9 – 11. Подготовлена конструкторская документация на два варианта деталей датчика давления, изготавливаемых методом 3D-печати.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308 – 521.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разр.		Семеренко Н.О			Разработка датчика давления, изготавливаемого с применением 3D- технологии	Лит	Лист	Листов
Провер		Кацай Д.А					6	120
		Лысов А.Н				ЮУрГУ		
Н.контр.		Волосников А.С				Кафедра ИНИТ		
Утв.		Шестаков						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОБЗОР АНАЛОГОВ 3D-ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ	8
1.1 Обзор тензометрического датчика давления	8
1.2 Прототип	10
1.2.1 Устройство и работа датчика	11
1.3 Классификация 3D- технологий.....	17
1.3.1 Аддитивные процессы	20
1.3.2 Экструзионная печать (FDM).....	24
1.3.3 Технология лазерного спекания (DMLS).....	25
1.4 3D-принтер EOS M 290 (DMLS)	29
1.5 3D-принтер Hercules Strong 2017 (FDM).....	30
2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	33
2.1 Производство чувствительного элемента	33
2.1.1 Изготовление штуцера DMLS-технологией	34
2.1.2 Изготовление штуцера FDM-технологией.....	35
2.2 Расчет надежности чувствительного элемента датчика давления	40
3 РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	46
3.1 Метод конечных элементов.....	46
3.1.1 Дискретизация. Конечные элементы. Узлы.....	48
3.2 Подготовка к эксперименту.....	49
3.3 Эксперимент.....	50
4 ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ	54
4.1 Оценка качества точности деталей, изготавливаемых методом аддитивных технологий	54
4.2 Расчет времени изготовления деталей датчика и количества материалов, необходимых для изготовления датчика давления	58
4.3 Определение чистой обработки	65

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

4.3.1	Химический способ.....	66
4.3.2	Воздействие высокой температуры.....	69
4.3.3	Ручная химическая обработка распечатанной 3D-модели.....	70
4.3.4	Профессиональные установки для химической обработки	71
4.3.5	Механическая обработка распечатанной 3D-модели	72
4.3.6	Покрытие распечатанной 3D-модели различными шпатлевками	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		78
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....		80
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....		84
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		92
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....		98
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....		103

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования физических и химических явлений и процессов, для конструирования механизмов необходимо знание и определение различных физических величин.

Основным параметром регистрации газообразной или водной среды является давление. Первоначальной частью, получающей и передающей сигнал об изменении давления среды, является датчик.

Датчики давления применяются в различных отраслях экономики: судостроении, ракетно-космической и авиационной технике, технологии взрыва, автомобилестроении, энергетическом и химическом производстве и т.д. Для каждой области применения датчики должны иметь соответствующие эксплуатационные и метрологические характеристики.

Правильность решения диагностических проблем в высокой степени зависит от качества информации, передаваемой датчиком давления. Следовательно, научные разработки новых пьезоэлектрических преобразователей, максимально адаптированных для каждой области применения, являются актуальными в наши дни.

В настоящее время активно развивается технология 3D-печати, которую можно использовать в конструировании датчиков не только для создания корпуса, но и для изготовления мембраны.

Актуальность данной работы подтверждается положениями о перспективных разработках АО «ПГ МЕТРАН» в виде тем для конкурса научных грантов, предлагаемых ЮУрГУ в 2017 г. и 2018 г., а также снижением стоимости и времени производства опытных образцов при 3D-печати.

Цель работы: разработка тензометрического датчика давления, изготавливаемого с применением 3D-технологии.

Задачи работы:

- обзор 3D-технологий и выбор датчика давления;

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

- анализ методов производства деталей с применением новых технологий;
- разработка 3D-модели датчика давления;
- проведение точностных, прочностных расчетов в программе SolidWorks;
- анализ полученных данных, определения качества точности, расчет времени изготовления деталей датчика, количества материалов необходимых для изготовления датчика давления и определение финальной обработки.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 ОБЗОР АНАЛОГОВ 3D-ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ

Датчик давления — устройство, физические параметры которого изменяются в зависимости от давления измеряемой среды (жидкости, газы, пар). В рассматриваемых датчиках давление измеряемой среды преобразуется в унифицированный пневматический, электрический сигналы или цифровой код.

Датчик давления состоит из первичного преобразователя давления, в состав которого входит чувствительный элемент – приемник давления, схемы вторичной обработки сигнала, различных по конструкции корпусных деталей, в том числе для герметичного соединения датчика с объектом и защиты от внешних воздействий, и устройства вывода информационного сигнала [46].

Основными отличиями одних приборов от других являются пределы измерений, динамические и частотные диапазоны, точность регистрации давления, допустимые условия эксплуатации, массогабаритные характеристики, которые зависят от принципа преобразования давления в электрический сигнал: тензометрический, пьезорезистивный, ёмкостный, индуктивный, резонансный, ионизационный, пьезоэлектрический и другие [47].

1.1 Обзор тензометрического датчика давления

Принцип работы данного датчика основан на разбалансировке моста при прогибе мембраны под воздействием давления применяемой среды. Чем больше прогибается мембрана, тем выше степень разбалансирования моста (Рисунок 1.1).

Изменение сопротивления проводника тензодатчика при действии деформации объясняется двумя причинами: изменением геометрических размеров (длины, диаметра проволоки) и изменением удельного сопротивления материала тензодатчика.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

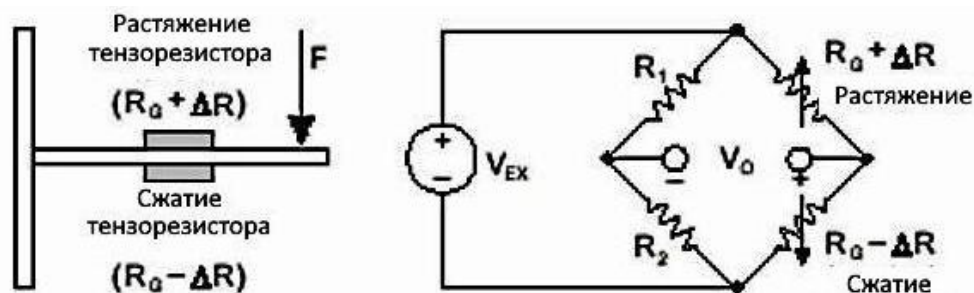


Рисунок 1.1– принцип действия тензометрического датчика

Работа тензодатчика характеризуется коэффициентом тензочувствительности (S), который равен частному от деления относительного изменения сопротивления тензодатчика на его относительную деформацию:

$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}, \quad (1.1)$$

где L и R — соответственно длина и сопротивление датчика при отсутствии механического напряжения;

ΔL и ΔR — соответственно изменение длины и сопротивления в результате воздействия внешнего деформирующего усилия.

Формула может быть представлена в виде:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta L}{L}. \quad (2.1)$$

Коэффициент тензочувствительности является безразмерной величиной и может быть как положительным (для материалов, у которых сопротивление при растяжении увеличивается), так и отрицательным (для материалов, у которых сопротивление при растяжении уменьшается). Для различных металлов значение S колеблется от — 12,6 (никель) до +6 (платино-иридий). Величина номинального сопротивления тензодатчика находится в пределах (50—1000) Ом.

Проволочные датчики имеют малый вес и габариты, практически безынерционны и потому могут измерять быстро меняющиеся деформации.

Преимуществом данных типов датчиков является более высокая точность измерений по сравнению с механическими и индукционными датчиками, наличие унифицированного токового выхода, более высокая надежность, высокая степень

защиты от агрессивной среды, высокий предел рабочих температур, низкая стоимость [1].

1.2 Прототип

В качестве прототипа рассматривается тензометрический датчик давления МИДА-ДИ-13П (Рисунок 1.2). Данный датчик предназначен для непрерывного преобразования значения избыточного (ДИ) давления жидкостей и газов, неагрессивных к материалам контактирующих деталей (титановые сплавы ВТ-1 и ВТ-9) в унифицированный сигнал постоянного тока или напряжения постоянного тока в системах контроля и управления давлением [7].



Рисунок 1.2 – Внешний вид датчика давления МИДА-ДИ-13П

Конструкция и покрытие датчика обеспечивают устойчивость к маслам и моющим средствам. По степени защищенности от воздействия пыли и воды датчики имеют исполнение IP65 по ГОСТ 14254-96 [8].

По устойчивости к климатическим воздействиям датчик соответствует исполнению категории размещения 2 по ГОСТ 15150-69 [9] (группе исполнения Д2 по ГОСТ 12997-84 [48]), но для работы при температуре окружающей среды от минус 40 до плюс 80 °С. Датчик относится к невосстанавливаемым, одноканальным, однофункциональным изделиям.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

1.2.1 Устройство и работа датчика

Датчик представляет собой единую конструкцию: первичный преобразователь объединен в одном корпусе с электронным блоком (вторичным преобразователем). Датчик присоединяется к рабочей магистрали с помощью штуцера. Питание датчика осуществляется от источника постоянного тока.

Измеряемое давление подводится через штуцер в рабочую полость датчика и воздействует на приемную мембрану, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов, которое преобразуется в сигнал разбаланса мостовой схемы и затем в выходной сигнал датчика.

Конструктивная схема датчика давления МИДА-ДИ-13 показана на рисунке 1.4. Измеряемое давление через штуцер 1 подается в рабочую полость 2 и воздействует на металлическую мембрану 3, на внешней поверхности которой жестко закреплен полупроводниковый чувствительный элемент 4, представляющий собой монокристаллическую сапфировую подложку, на поверхности которой сформированы тензорезисторы, соединенные в тензочувствительную мостовую схему. Выводы от схемы соединены с коллектором. В кожухе 5, герметично соединенном со штуцером 1 и крышкой 6, находится нормирующий усилитель 7, потенциометры для корректировки "НУЛЯ" 11 и "ДИАПАЗОНА" 12. На крышке 6 герметически закреплен разъем 8. Дополнительная защита от влаги, воды и пыли осуществляется съемным резиновым колпачком 9. В крышке 6 датчика МИДА-ДИ-13П установлен фильтр 10, предназначенный для сообщения пространства под кожухом 5 с атмосферой [10]. Габаритные присоединительные размеры датчика МИДА-ДИ-13 представлены на рисунке 1.3.

В данный момент представляется возможным напечатать следующие детали датчика: штуцер, кожух, крышка, резиновый колпачок и кольцо (Рисунок 1.5). Материалы, используемые при традиционном изготовлении датчика, и материалы для 3D-печати представлены в таблице 1.1.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

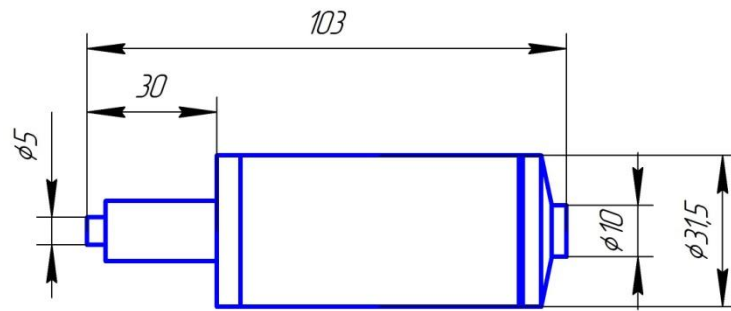


Рисунок 1.3 – Габаритные присоединительные размеры датчика МИДА-ДИ-13

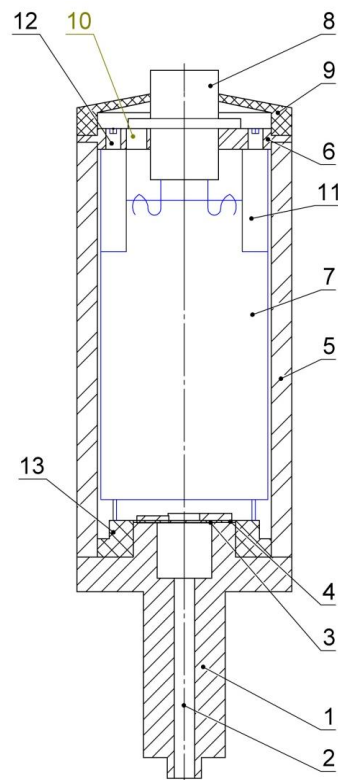


Рисунок 1.4 – Конструктивная схема датчика давления МИДА-ДИ-13

Таблица 1.1 – Материалы, применяемые для производства датчика

Детали	МИДА-ДИ-13П	FDM	DMLS
1. Штуцер	Титановый сплав	Colorfabb	Ti64ELI
5. Кожух	Нержавеющая сталь	ABS/PLA	PP-07X18H12M2

Продолжение таблицы 1.1.

6. Крышка	Нержавеющая сталь	ABS/PLA	ПР-07Х18Н12М2
9.Резиновый колпачок	Силиконовая резина	RUBBER	
13. Кольцо	Пластик	ABS/PLA	

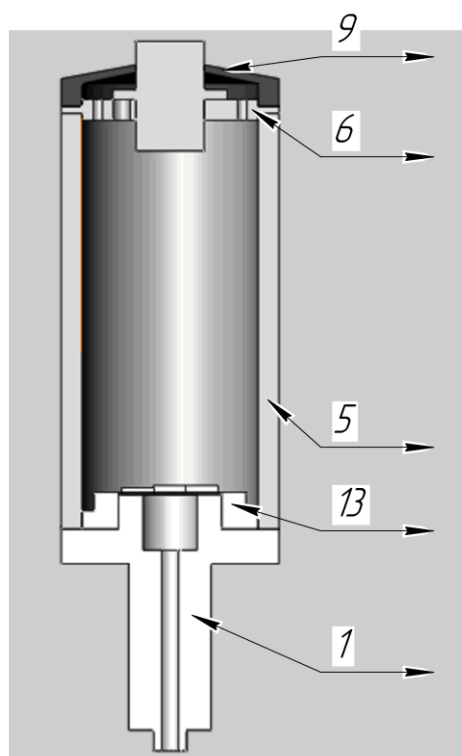


Рисунок 1.5 – Конструктивная схема датчика давления МИДА-ДИ-13П:

1 – штуцер, 5 – кожух, 6 – крышка, 9 – резиновый колпачок, 10 – кольцо

Материалы для 3D-технологии

Типы выбранных материалов для 3D-печати:

ABS (акрилонитрилбутадиенстирол)

ABS-пластик – один из лучших расходных материалов для 3D-печати. Такой пластик не имеет запаха, не токсичен, ударопрочен и эластичен. Температура

плавления ABS-пластика составляет от 240⁰С до 248⁰С. Он поступает в розничную продажу в виде порошка или тонких пластиковых нитей, намотанных на бобины. 3D-модели из ABS-пластика долговечны, но не переносят прямой солнечный свет. С помощью такого пластика можно получить только непрозрачные модели. Свойства материала представлены в таблице 1.3

Таблица 1.3 – Свойства ABS-пластика

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2000000000	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.394	
Модуль сдвига	318900000	Н/м ²
Плотность	1020	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	30000000	Н/м ²
Теплопроводность	0.2256	W/(m*K)
Удельная теплоемкость	1386	J/(кг*K)

PLA (полилактид)

PLA (полилактид) – это самый биологически совместимый и экологически чистый материал для 3D-принтеров. Он изготавливается из остатков биомассы, силоса сахарной свёклы или кукурузы. Имея массу положительных свойств, полилактид имеет два существенных недостатка. Во-первых, изготовленные из него модели недолговечны и постепенно разлагаются под действием тепла и света. Во-вторых, стоимость производства полилактида очень высока, а значит и стоимость моделей будет значительно выше аналогичных моделей, изготовленных из других материалов.

PLA-пластика используется в технологиях 3D-печати SLS и FDM. Свойства материала представлены в таблице 1.4

BronzeFill

BronzeFill – это компаунд на основе полилактида/полигидроксиалканоата, смешанный с 80% чистым бронзовым порошком. Этот материал в четыре раза тяжелее обычного полилактида [22]. Свойства материала представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.4 – Свойства PLA-пластика

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2804400000	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.395	
Плотность	1250	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	40000000	Н/м ²

Таблица 1.5 – Свойства BronzeFill

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	9*10 ¹⁰	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.28	
Плотность	3900	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	30000000	Н/м ²
Предел текучести	26500000	Н/м ²

EOS TITANIUM Ti64ELI

Titanium Ti64ELI является предварительно легированным сплавом Ti6AlV4 в форме порошка. ELI расшифровывается как «ультрамелкозернистый». Это управляемая химическая разновидность стандартного сплава Ti6AlV4 с низким содержанием кислорода. Этот легкий сплав широко известен благодаря его отличным механическим свойствам, устойчивостью к коррозии в сочетании с низким удельным весом и биосовместимостью.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

Этот материал обеспечивает хорошую детализацию объектов с высоким разрешением. Его можно использовать в системе лазерного спекания EOSINT M 280 (400 Вт). Этот материал идеально подходит для производства биомедицинских имплантатов, а так же может быть использован в аэрокосмической индустрии и при создании деталей для гоночных автомобилей.

Изделия, выполненные из материала EOS Titanium Ti64ELI далее можно подвергать механической обработке, обработке на электроэрозионном станке, сварке, микрообдудке дробью, полировке и покрытию. Неэкспонированный порошок может быть использован повторно [23]. Свойства материала представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Свойства Titanium Ti64ELI

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	$1,1 * 10^{11}$	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.33	
Плотность	4410	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	1260000000	Н/м ²
Предел текучести	1125000000	Н/м ²

RUBBER

Резина для 3D-печати. Специальный материал, который своим свойствам очень близок к настоящей резине, повторяя все её свойства. Материал очень хорошо подойдет для печати кнопок, уплотнителей, амортизаторов, а так же крышек для радиоуправляемых моделей. Rubber склеивается при помощи синтетических каучуков или с помощью паяльного фена. Каждая катушка упаковывается в многоразовый вакуумный пакет с силикагелем, чтобы при хранении пластик не терял своих свойств [24].

Свойства материала представлены в таблице 1.7.

ПР-07Х18Н12М2

Нержавеющая сталь, являющаяся усовершенствованной маркой стали 304, сплав которой содержит никель и молибден. Наличие этих элементов в нержавеющей стали значительно повышает ее антикоррозийные свойства, благодаря чему эксплуатация возможна даже в очень агрессивных средах [25]. Свойства материала представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.7 – Свойства RUBBER

Свойство	Значение	Единицы измерения
Относительное сжатие	40	%
Предел прочности при растяжении	18	МПа
Относительное удлинение при разрыве составляет	500	%

Таблица 1.8 – Свойства ПР-07Х18Н12М2

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	150	ГПа
Плотность	7,95	г/см ³
Предел прочности при растяжении	1000	МПа
Предел текучести	900	МПа

1.3 Классификация 3D- технологий

3D-печатью или «аддитивным производством» является метод изготовления цельных трехмерных предметов разнообразных форм и размеров на основе цифровых моделей. В основе 3D-печати лежит способ получения детали слоями, последовательно наносимыми один на другой. В отличие от традиционных методов механической обработки, где резанием или фрезерованием получают деталь удалением лишнего материала (т.н. «субтрактивное производство»).

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

3D-принтерами являются устройства с программным управлением, изготавливающие детали аддитивным способом.

3D-печатные технологии используются для прототипирования и производства в различных областях промышленности: строительстве, промышленном дизайне, архитектуре, аэрокосмической, автомобильной, инженерной, военно-промышленной и медицинских отраслях, биоинженерии (для создания искусственных тканей), производстве обуви и одежды, ювелирных изделий, географических информационных системах, в образовании, пищевой промышленности и многих других сферах. Проведенные исследования показывают, что домашние 3D-принтеры с открытым исходным кодом позволяют окупить расходы на их покупку за счет экономичности бытового производства.[40]

Аддитивным производством является метод получения предметов путем нанесения последовательных слоев материала.

Детали, изготовленные аддитивным методом, применяются на разных производственных этапах: для получения опытных образцов (т.н. быстрое прототипирование) и в качестве самих готовых объектов (т.н. быстрое производство).

В производстве, в частности в машинной обработке, разграничивают традиционные, (т.н. «субтрактивные») и новые «аддитивные» методы получения изделий. Не смотря на то, что традиционное производство издавна использует «аддитивные» методы (такие, как сварка, склепка и привинчивание), трехмерная информационная технологическая составляющая в них отсутствует. Машинная же обработка (производство деталей точной формы), как правило, основывается на субтрактивных методах фрезеровании, сверлении и шлифовании.

3D-печатные модели

3D-модели создаются при помощи ручного компьютерного графического дизайна или методом 3D-сканирования. Ручное моделирование, или подготовка геометрических размеров для получения трехмерного компьютерного

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

изображения, немного напоминает скульптуру. 3D-сканирование – это автоматический сбор и анализ данных конкретной детали, а именно формы, цвета и других характеристик, с последующим преобразованием их в цифровую трехмерную модель.

Как ручное, так и автоматическое получение 3D-печатных изделий может вызывать затруднения у среднего пользователя. Поэтому в последние годы получили распространение 3D-печатные торговые площадки.

Печать

В качестве чертежей для 3D-печатных предметов используются следующие цифровые модели (Рисунок 1.6).

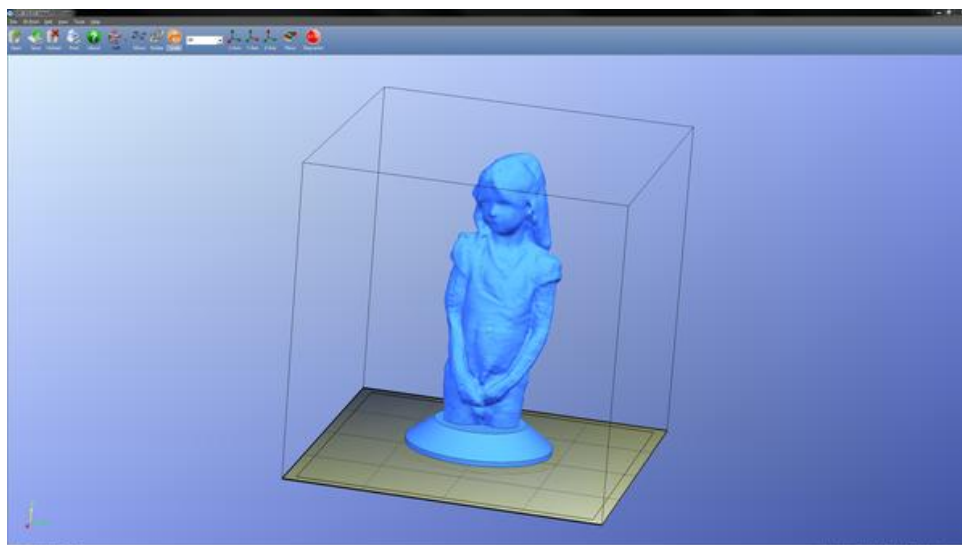


Рисунок 1.6 – Цифровая модель для 3D-печати

Во время печати принтер считывает 3D-печатный файл (как правило, в формате STL), который содержит данные трехмерной модели, и наносит последовательные слои порошкообразного, жидкого, листового или бумажного материала, выстраивая трехмерную модель из серии поперечных сечений. Эти слои, соответствующие виртуальным поперечным сечениям в CAD-модели, соединяются или сплавляются вместе, создавая в результате объект заданной формы. Основное преимущество данного метода в том, что появляется

возможность создания геометрических форм практически неограниченной сложности. «Разрешение» принтера подразумевает толщину наносимых слоев (ось Z) и точность позиционирования печатной головки в горизонтальной плоскости (по осям X и Y).

Традиционные производственные методы – такие как литье под давлением, могут иметь меньшую себестоимость при производстве крупных партий полимерных деталей, но аддитивные технологии обладают преимуществами при мелкосерийном производстве, так как позволяют достигнуть при этом более высокого темпа производства и гибкости дизайна, наряду с повышенной экономичностью в пересчете на единицу произведенного товара. Кроме того, настольные 3D-принтеры позволяют разработчикам и дизайнерам создавать концептуальные модели и прототипы, не выходя из офиса. [40]

Обработка

Некоторые способы 3D-технологий предусматривают возможность использования разных материалов, а также различных цветов в течение одного производственного цикла. Многие из 3D-принтеров используют «поддержки» или «опоры» во время печати. «Опоры» требуются для построения фрагментов модели, не соприкасающихся с нижележащими слоями или рабочей платформой. Сами опоры частью заданной модели не являются, и по завершении печати либо отламываются (в случае использования того же материала, что и для печати самой модели), либо растворяются (как правило, в воде или ацетоне – в зависимости от материала, используемого для создания опор) [40].

1.3.1 Аддитивные процессы

Первые принтеры 3D-печати появились в конце 70-х годов. Они были крупногабаритными, имели высокую стоимость и очень ограниченные возможности.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

В настоящее время рынок представляет большой выбор способов аддитивного производства. Основные различия являются в методе нанесения слоев и применяемых расходных материалах.

К методам, основывающимся на плавке (Рисунок 1.7, 1.8) или размягчении материалов для создания слоев, относятся выборочная лазерная плавка (SLM), выборочное лазерное спекание (SLS), прямое лазерное спекание металлов (DMLS), печать методом послойного наплавления (FDM или FFF).

Другим направлением 3D-моделирования является производство твердых моделей методом полимеризации жидких материалов, известное как стереолитография (SLA) (Рисунок 1,9).

Следующим методом 3D-печати является ламинирование листовыми материалами (LOM), при котором тонкие слои материала подвергаются резке до необходимого контура с последующим соединением в единое целое. В качестве материалов для LOM могут использоваться полимеры, металлы и бумага.

Принтеры, производящие полноценные металлические модели, имеют достаточно высокую стоимость, но возможно применение менее дорогих устройств для производства литейных форм с последующей отливкой металлических деталей.

Решение поставленной задачи рассмотрим на примере двух технологии. Послойного наплавления (FDM) и лазерного спекания (DMLS).

Основные методы аддитивного производства представлены в таблице (Таблица 1.9) [40].

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

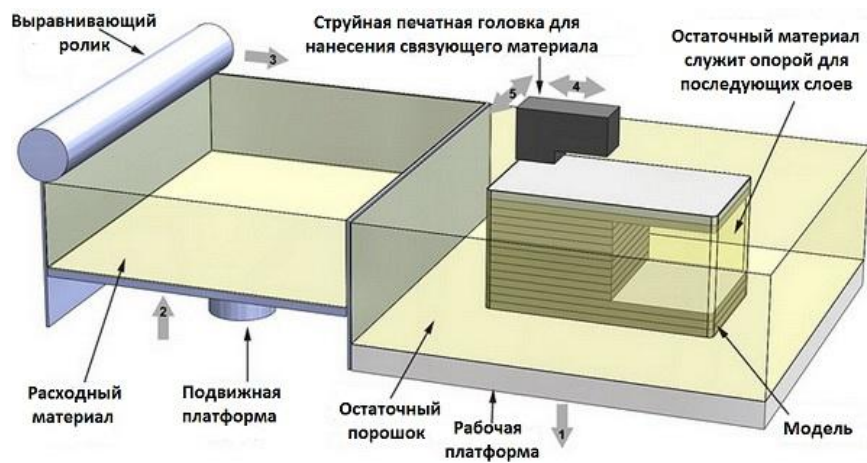


Рисунок 1.7 – Схема работы порошкового принтера



Рисунок 1.8 – 3D-принтер работающий с металлом

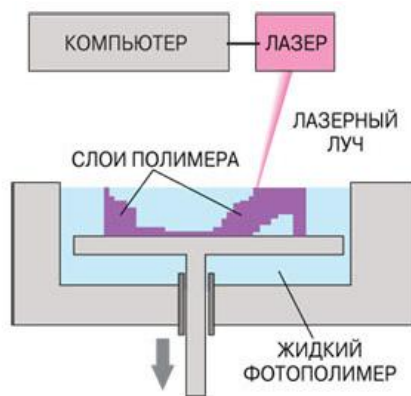


Рисунок 1.9 –Принцип работы 3D-печати

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таблица 1.9 – Методы аддитивного производства

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF ₃)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка

Продолжение таблицы 1.9

Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

1.3.2 Экструзионная печать (FDM)

Моделирование методом послойного наплавления (FDM/FFF) было разработано С. Скоттом в конце 1980-х и получило коммерческое распространение в 1990 силами компании Stratasys, в числе основателей которой числится Дональд Трамп. В связи с истечением срока действия патента существует большое сообщество разработчиков 3D-принтеров с открытым исходным кодом, а также коммерческих организаций, использующих данную технологию. Как следствие, стоимость устройств уменьшилась на два порядка со времени изобретения технологии (Рисунок 1.10).

Процесс печати методом послойного наплавления подразумевает создание слоев за счет экструзии быстро застывающего материала в виде микрокапель или тонких струй. Как правило, расходный материал (например, термопластик) поставляется в виде катушек, с которых материал поступает в печатную головку, называемую «экструдером». Экструдер нагревает материал до температуры плавления с последующим выдавливанием расплавленной массы через сопло. Сам экструдер приводится в движение пошаговыми двигателями или сервомоторами, обеспечивающими позиционирование печатной головки в трех плоскостях. Перемещение экструдера контролируется производственным программным обеспечением (CAM), привязанным к микроконтроллеру.

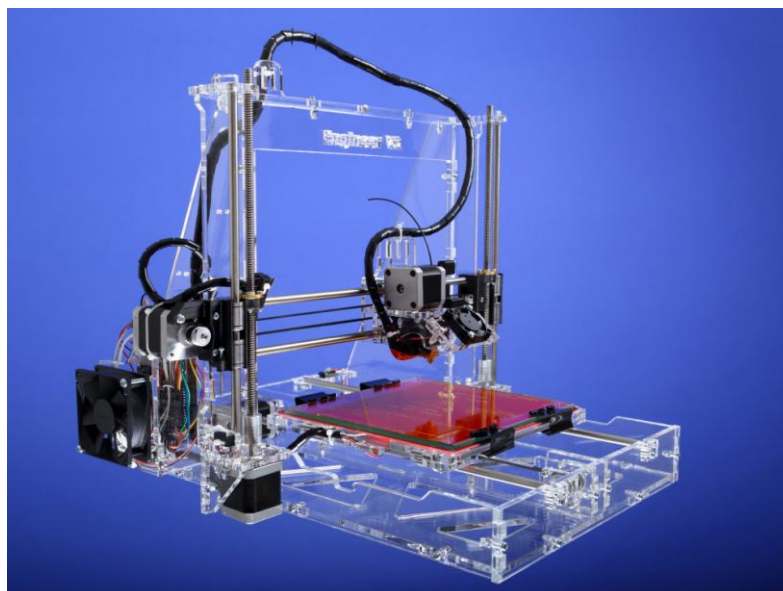


Рисунок 1.10 –Экструзионный (FDM) 3D-принтер Engineer V2

В качестве расходных материалов используются всевозможные полимеры, включая акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), поликарбонат (PC), полилактид (PLA), полиэтилен высокого давления (HDPE), смеси поликарбоната и ABS-пластика, полифениленсульфон (PPSU) и др.

Технология FDM/FFF имеет определенные ограничения по сложности создаваемых геометрических форм. Например, создание навесных конструкций (таких, как сталактиты) невозможно само по себе, ввиду отсутствия необходимой поддержки. Это ограничение компенсируется созданием временных опорных конструкций, удаляемых по завершении печати.

1.3.3 Технология лазерного спекания (DMLS)

В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности – порядка 200Вт. Некоторые устройства используют более мощные лазеры с повышенной скоростью сканирования (т.е. передвижения лазерного луча) для более высокой производительности. Принцип работы технологии DMLS представлен на рисунке 1.11. DMLS позволяет создавать цельные металлические

детали сложной геометрической формы. Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью.

После завершения спекания слоя, процесс повторяется: валик подает свежий материал и лазер начинает спекать следующий слой. Привлекательной особенностью этой технологии является высокое разрешение печати – в среднем около 50 микрон.

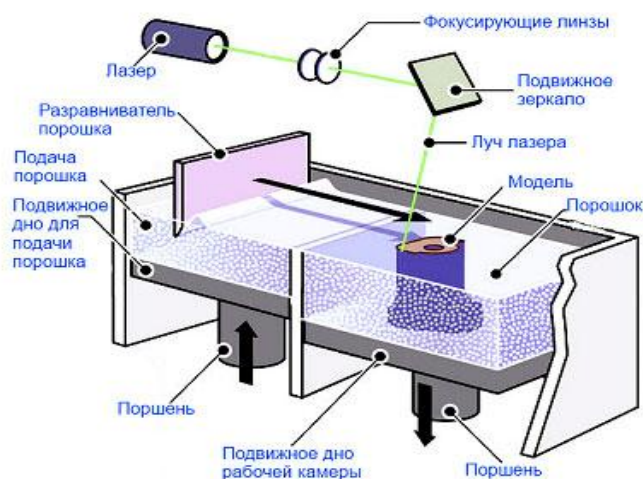


Рисунок 1.11 – Прямое лазерное спекание металлов (англ. Direct Metal Laser Sintering (DMLS))

Так же данная технология не требует построения опор для нависающих элементов конструкции. Неспеченный порошок не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново. DMLS производство можно считать фактически безотходным, что немаловажно при использовании дорогих материалов – например, драгоценных металлов.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а высокая точность исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий.

Преимущества и недостатки

DMLS-технология обладает рядом достоинствами по сравнению с традиционными производственными методами:

1) Возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки (т.н. «субтрактивных» методов – фрезеровки, сверления и пр.).

2) Производство практически безотходно, что выгодно отличает DMLS от субтрактивных технологий.

3) Технология позволяет создавать несколько моделей одновременно с ограничением лишь по размеру рабочей камеры.

4) Построение моделей занимает порядка несколько часов, что несоизмеримо более выгодно, чем литейный процесс, который может занимать до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла.

5) DMLS активно используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства.

6) Детали с комплексной геометрией могут быть выполнены целиком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий.

7) Так как DMLS не требует специальных инструментов (например, литейных форм) и не производит большого количества отходов (как в случае с субтрактивными методами), производство мелкосерийных партий с помощью этой технологии намного выгодней, чем за счет традиционных методов.

Недостатки данной технологии:

1) Изделия не обладают монолитностью, а потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы, или детали, произведенные субтрактивными методами.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

2) На данный момент установки DMLS применяются только в профессиональной среде из-за высокой стоимости.

Применение:

DMLS-технология применяется для производства готовых изделий малого и среднего размера в различных отраслях, включая аэрокосмическую, стоматологическую, медицинскую и др. Ограничения по размерам изделия зависят от стоимости устройства. DMLS используется для быстрого прототипирования, снижая время разработки новых продуктов, а также в производстве, позволяя сокращать себестоимость мелких партий и упрощать сборку изделий сложной геометрической формы.

5 сентября 2013 года Илон Маск опубликовал фотографии детали ракетного двигателя Super Draco, созданной из никель-хромового жаропрочного сплава Inconel с помощью принтера EOS. Фотографии деталей ракетного двигателя Super Draco, опубликованные основателем компании Space X Илоном Маском представлены на рисунке 1.12 [41].

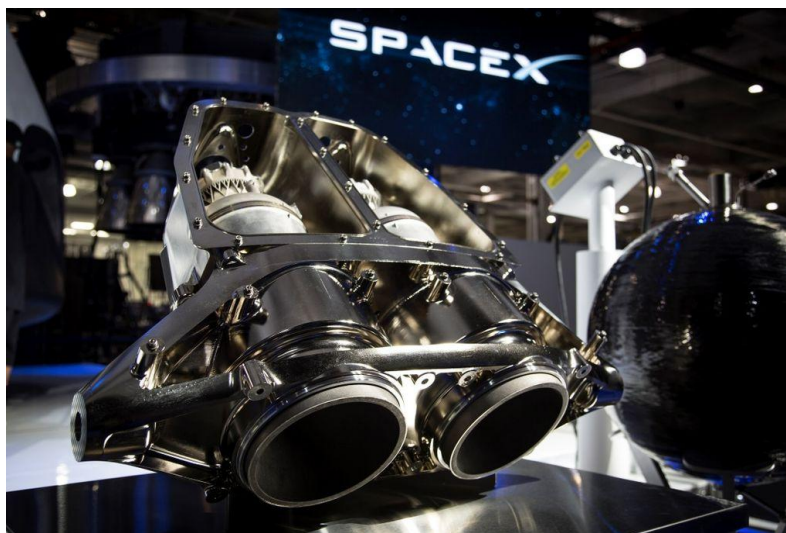


Рисунок 1.12 – Фотографии деталей ракетного двигателя Super Draco

Для решения поставленной нам задачи нам понадобится два 3D-принтера: EOS M 290 (DMLS), и экструзионный (FDM) Engineer V2.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

1.4 3D-принтер EOS M 290 (DMLS)

EOS M 290 – эталонная аддитивная установка в линейке EOS, предназначенная для 3D-печати методом прямого лазерного спекания металлических порошков (DMLS). Спекание осуществляется в инертной азотной атмосфере с помощью иттербиевого волоконного лазера мощностью 400 Вт, что позволяет работать с широким ассортиментом материалов – мелкодисперсными порошками различных металлов и сплавов. M 290 применяется в производстве готовых компонентов для аэрокосмической отрасли, пресс-форм, оснастки и т.д. [16].

Особенности и преимущества:

- высокая производительность;
- высокое качество печати;
- улучшенная система контроля рабочего процесса;
- широкий выбор материалов;
- простота в управлении;
- оптимизированная система подачи инертного газа.

Установка EOS M 290 с рабочей зоной 250 x 250 x 325 мм позволяет быстро, гибко и экономически эффективно производить металлические детали, используя только данные CAD — полностью автоматически, всего за несколько часов и без какой-либо дополнительной оснастки. Интуитивно понятный интерфейс, интеллектуальное программное обеспечение вместе с открытыми и стандартизированными режимами и улучшенной системой фильтрации спроектированы специально для организации аддитивного производства.

Установка комплектуется волоконным лазером мощностью 400 Вт. Эти лазеры обладают стабильными характеристиками и излучением. Совместно с усовершенствованной системой подачи инертного газа это гарантирует оптимальные условия для получения деталей высочайшего качества. Система

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

может работать с азотом или аргоном в качестве защитного газа. Это позволяет применять широкий спектр материалов на установке.

Технические характеристики 3D-принтера представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Технические характеристики

Характеристика	Значение	Единица измерения
Рабочая зона	250 x 250 x 325	мм
Мощность лазера	400	Вт
Размер пятна лазера	100	мкм
Скорость печати	до 7	м/с

Продолжение таблицы 1.10

Вес	1250	Кг
Габариты	2500 x 1300 x 2190	ДхШхВ, мм
Рекомендуемое место для установки	4800 x 3600 x 2900	мм
Потребление электроэнергии	макс. 8,5/ станд. 3,2	кВт
Электропитание	200–240 (32 А)	В
Сжатый воздух	7 бар, 20 м ³ /ч	

1.5 3D-принтер Hercules Strong 2017 (FDM)

Hercules Strong 2017 – обновленная модель 3D-принтера Hercules Strong. Рабочий объем нового варианта увеличен до 300x300x400 мм. Кинематика переработана с валов на рельсы, а экструдер оснащается новой системой обдува, впервые опробованной на HerculesNew. Закрытый корпус и подогреваемый стеклянный рабочий столик рассчитаны на работу с широким ассортиментом материалов, включая PLA, ABS, ударопрочный полистирол, эластомеры, нейлон и

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

различные композиты на основе PLA-пластика с древесными, металлическими и другими наполнителями. Максимальная температура экструзии достигает 260°C, а рабочий столик прогревается до 120°C [18].

Механизм подачи

Система охлаждения экструдера обеспечивает точную и бесперебойную подачу пластика. Наличие концентрированного охлаждения изделия позволяет печатать изделия с повышенной детализацией и при высокой скорости. Закрытый корпус экструдера делает его безопасным.

Технические характеристики 3D-принтера Hercules Strong 2017 представлены в таблице 1.11.

Приточно – вытяжная система воздуха

Приточно – вытяжная система воздуха обеспечивает равномерное распределение воздуха внутри камеры, что исключает перегрев изделия и механических частей принтера [21].

Таблица 1.11 – Технические характеристики 3D-принтера

Свойство	Значение	Единица измерения
Печатает детали высокого качества	от 0,02-0,8	мм
Размер рабочей камеры	300x300x400	мм
Скорость печати	до 180	мм/с

Материалы используемые для печати: ABS-пластик, PLA-пластик, PVA-пластик, HIPS, Нейлон.

Страна производитель: Россия; Производитель: IMPRINTA

Выводы по первой главе

В результате информационного поиска были определены материалы для изготовления комплектующих датчика с помощью 3Dпечати :

штуцера: ColorFabbBronzeFill, Ti64ELI;

кожуха и крышки: ABS/PLA, ПР-07Х18Н12М2;

резинового колпачка: RUBBER;

кольца: ABS/PLA.

Так же были выбраны 3D принтеры:

EOS M 290 (DMLS);

Hercules Strong 2017 (FDM).

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2.1 Производство чувствительного элемента

Одной из важных деталей в датчике является чувствительный элемент, состоящий из штуцера, совмещенного с металлической мембраной, и сапфировой подложки с тензорезисторами. Возможность изготовления штуцера на 3D-принтере, не уступающего по своим качествам изделиям, сделанным традиционными методами, станет значительным шагом вперед во внедрении 3D-технологии на производстве. Конструктивная схема чувствительного элемента, показанная на рисунке 2.1, выполнена по размерам, взятым с официального сайта производителя [7], где 1 – штуцер, 2 – мембрана, 3 – тензорезистор, 4 – сапфировая подложка (Al_2O_3).

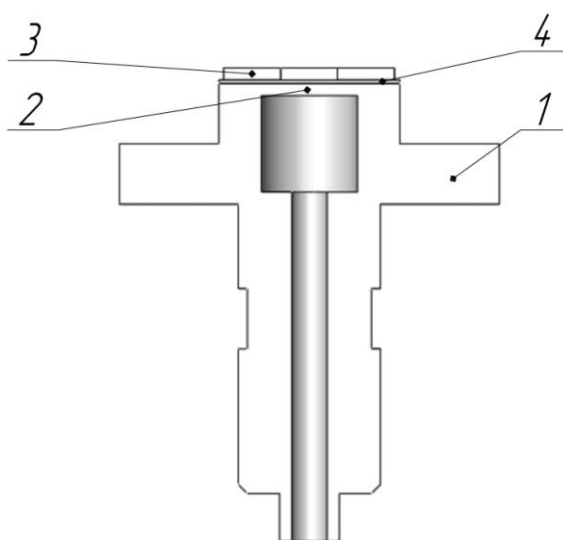


Рисунок 2.1 – Конструктивная схема чувствительного элемента

Особенностью данного штуцера является изготовление его вместе с мембраной. Ниже приводится анализ выбранных 3D-технологий на возможность изготовления мембраны, соединенной со штуцером. Чертеж штуцера, изготовленного традиционным методом представлен на рисунок 2.2.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

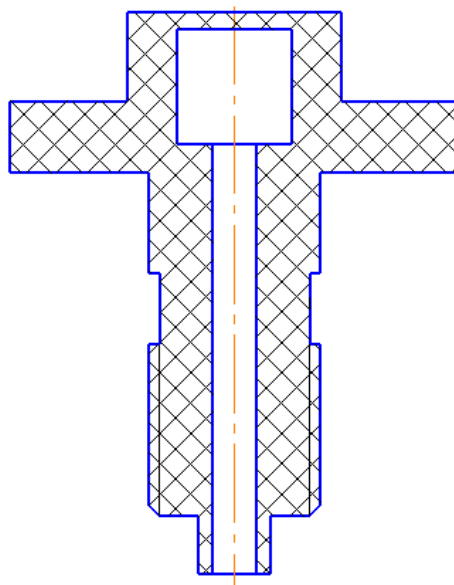


Рисунок 2.2 – Схема штуцера датчика давления, выполненного традиционным методом

2.1.1 Изготовление штуцера DMLS-технологией

Как было сказано в первой главе, процесс изготовления DMLS-технологией происходит методом послойного спекания порошка, как представлено на рисунке 2.3.

При печати в области пустот (область камеры давления), будет находится не спеченный порошок, что позволит напечатать мембрану. После печати изделия порошок будет удален при помощи пылесоса.

На основе приведенных данных делается вывод, что с помощью DMLS-технологии можно изготовить штуцер вместе с мембраной.

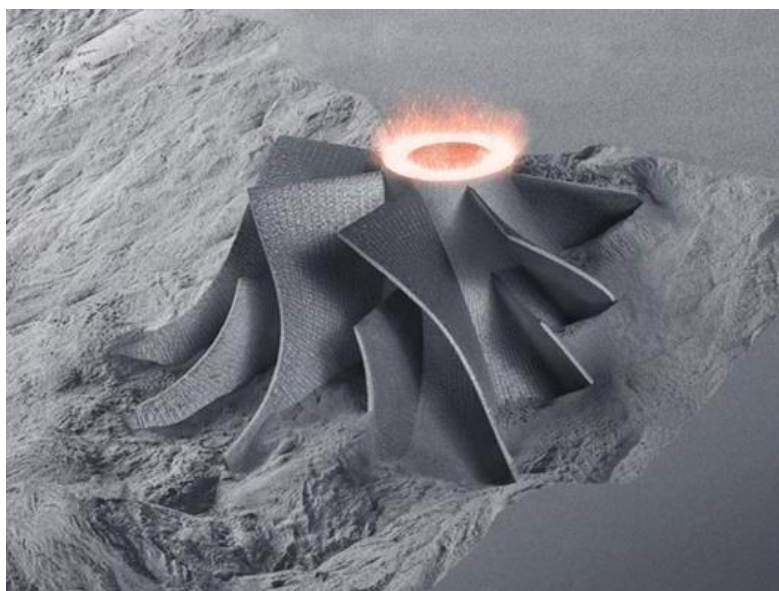


Рисунок 2.3 – Пример изготовления детали DMLS-технологией

2.1.2 Изготовление штуцера FDM-технологией

При FDM-технологии принтер при печати поверхностей над пустотой использует специальные "подпорки", как представлено на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – "Подпорки" при печати FDM-технологией

Основываясь на этом, можно сделать вывод, что после изготовления напечатанный штуцер примет вид, представленный на рисунке 2.5. Исходя из рисунка 2.5 делается вывод, что напечатать штуцер не представляется возможным, так как нет инструмента, который смог бы зачистить область камеры давления.

Решить данную проблему можно двумя способами:

- 1) Использовать 3D-принтер с двумя экструдерами;
- 2) Напечатать мембрану отдельно от штуцера.

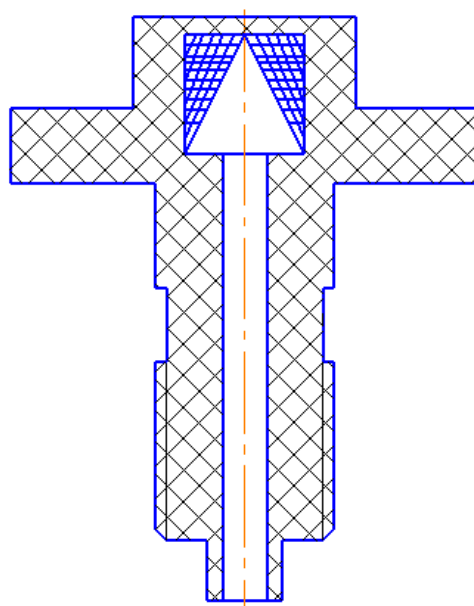


Рисунок 2.5 – "Подпорки" при печати FDM-технологией

Процесс 3D-печати с двумя головками экструдера устроен так, что одна головка печатает сам штуцер из материала необходимой прочности, а вторая печатает "подпорки" из материала, который после печати удаляется растворением. Процесс 3D-печати представлен на рисунке 2.6, на рисунке 2.7 представлен процесс растворения "подпорок".

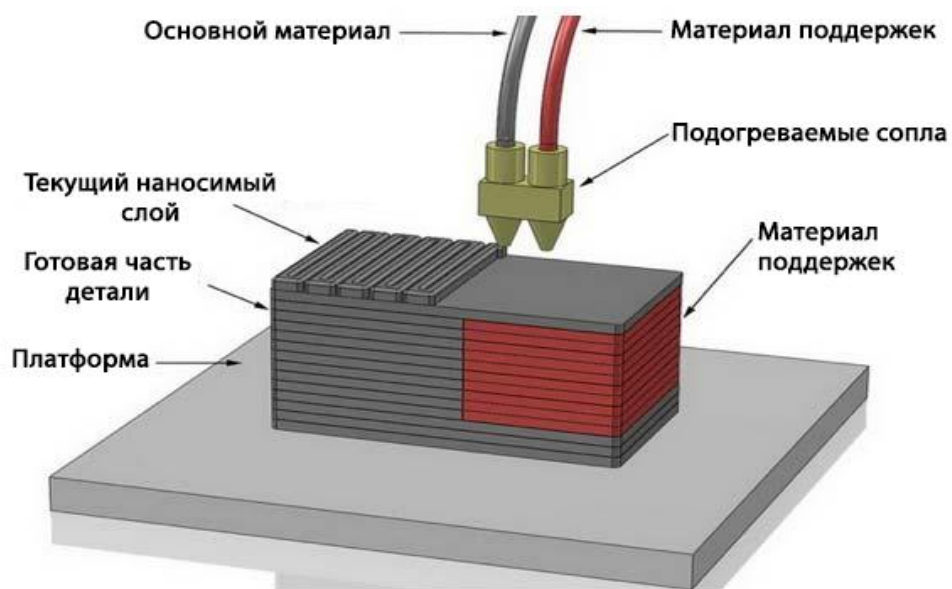


Рисунок 2.6 – Процесс 3D-печати при двух головках экструдера

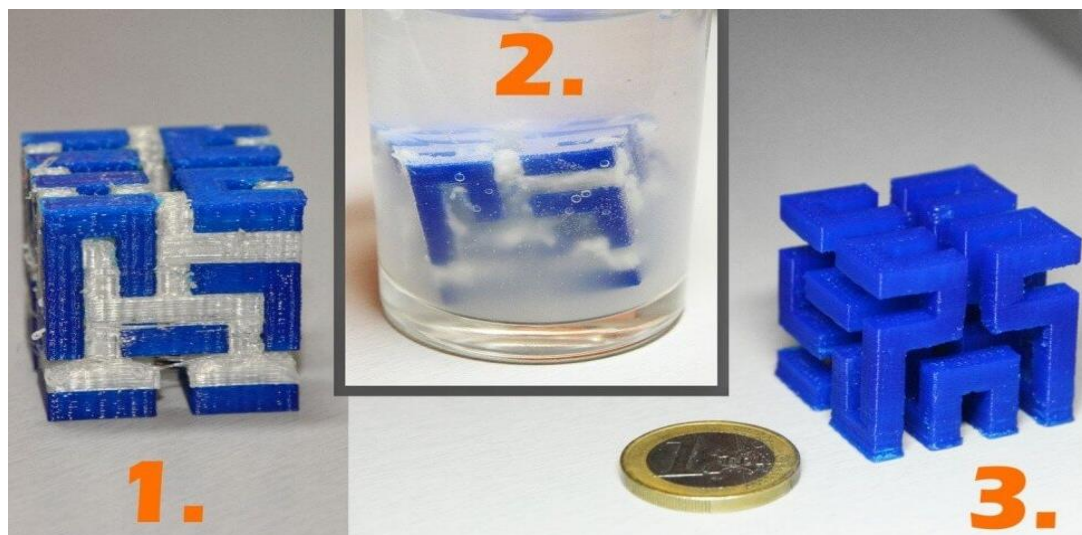


Рисунок 2.7 – Процесс растворения "подпорок"

Процесс растворения заключается в том, что стандартные растворяющиеся материалы модели удаляются при помещении ее в ванну с соответствующим растворителем до тех пор, пока материал "подпорок" полностью не растворится.

Материалы для печати:

- 1) ABS-пластик будет напечатан с HIPS-пластиком (полистирол) (характеристики HIPS-пластика представлены в таблице 2.1 [33]);

2) PLA-пластик будет напечатан с PVA-пластиком (поливиниловый спирт) (характеристики PVA-пластика представлены в таблице 2.2 [34]);

Для растворения "подпорок" при печати пластиками HIPS/ABS используется жидкость из лимонной кислоты и изопропилового спирта в соотношении 1:1. Многие другие вспомогательные материалы, такие как PVA (используется с пластиком PLA), растворяются в воде [32].

Ускорить время растворения материала поддержки можно с помощью ультразвукового очистителя. Использование теплого (не горячего) растворителя также ускорит время, необходимое для растворения материала (если ультразвуковой очиститель недоступен).

Таблица 2.1 – Характеристики HIPS-пластика

Характеристика	Значение
Температура экструзии, °C	230-240
Предел прочности на изгиб, МПа	33
Предел прочности на разрыв, МПа	62
Модуль упругости при изгибе, МПа	2280
Относительное удлинение при разрыве, %	65
Усадка при охлаждении, %	0,8
Плотность материала, г/см ³	1,05
Рекомендуемая температура столика, °C	90

Таблица 2.2 – Характеристики PVA – пластика

Характеристика	Значение
Температура плавления, °C	160 — 170
Температура стеклования, °C	45 — 55
Удельная теплоемкость, кал / дс	0,4
Плотность, г/см ³	1,25 — 1,35

Достоинства метода расплавления "подпорок": позволяет создавать детали со сложной геометрией в случаях, где стандартное удаление "подпорок" невозможно; дает отличный результат на гладких поверхностях, где подложка плотно контактирует с деталью. Недостатки: неправильное применение растворителя в моделях может привести к эффекту отбеливания и деформации печати; оставляет на поверхности детали следы и пятна; может привести к небольшим отклонениям размеров детали или образованию раковин, если растворимый материал попадет на объект во время печати.

При изготовлении мембраны отдельно от штуцера возникает следующая проблема: мембрана, изготовленная традиционным способом, будет изгибаться только над камерой давления, как представлено на рисунке 2.8а. Мембрана, напечатанная на 3D-принтере, будет изгибаться по швам ультразвуковой сварки, как представлено на рисунке 2.8б.

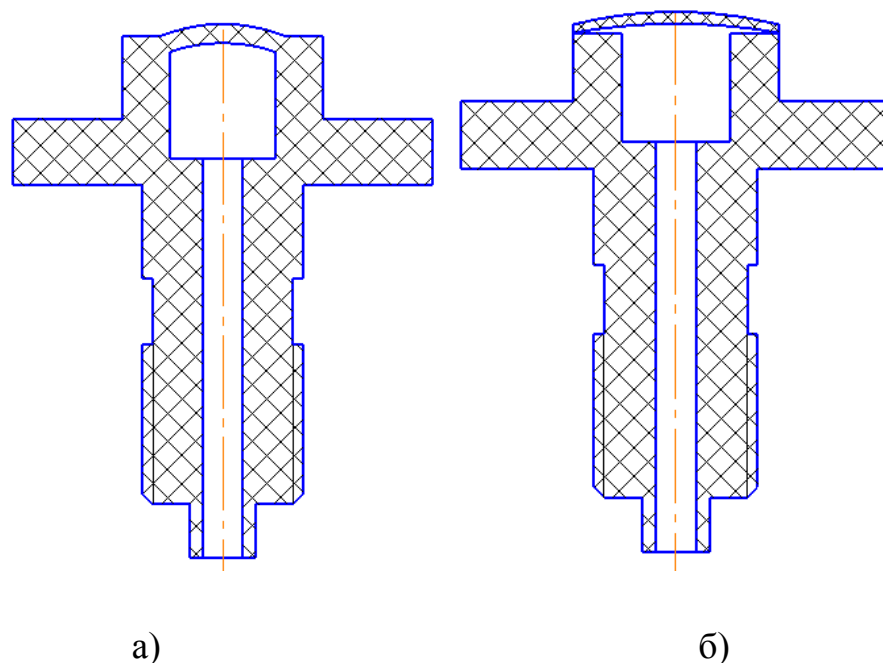


Рисунок 2.8 – Схема установки мембраны

Решить данную проблему может кольцо, установленное сверху, которое будет прижимать мембрану и создавать область прогиба такую же, как у детали,

выполненной традиционным методом. Схема чувствительного элемента с кольцом представлена на рисунке 2.9, где 1 – штуцер, 2 – мембрана, 3 – сапфировая подложка, 4 – кольцо.

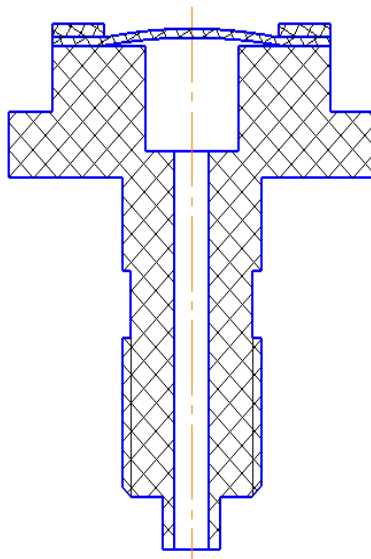


Рисунок 2.9 – Схема чувствительного элемента с кольцом

На основе приведенных данных делается вывод, что с помощью FDM-технологии можно изготовить штуцер.

2.2 Расчет надежности чувствительного элемента датчика давления

Для обеспечения оптимальных условий работы тензодатчиков и при этом не допустить разрушения мембраны необходимо определить минимальные толщины для всех используемых материалов:

- штуцера: ColorFabbBronzeFill, Ti64ELI;
- кожуха и крышки: ABS/PLA, PP-07X18H12M2;
- резинового колпачка: RUBBER;
- кольца: ABS/PLA.

Для этой цели будут использоваться формулы определения надежности сложных механических систем изложенных в монографии В.М. Труханова, А.М.

Матвеевко [28]. В данной монографии описывается определение надежности сложных механических систем в зависимости от воздействующих на них физических факторов.

Для обоснования правильности выбора материалов, элементов и узлов на этапе разработки производится расчет показателей надежности штуцера датчика.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в условленных пределах значений всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки [26].

По определению надежность – это свойство, т.е. к ней не применимы какие-либо количественные оценки, однако на практике часто это понятие ассоциируется с вероятностью безотказной работы с соответствующими количественными характеристиками.

Надежность конструкции обеспечивается выбором материалов деталей и составными частями, защитой от воздействия различных факторов, выбором крепежно – монтажных элементов.

Критерием надежности датчика давления является не разрушение мембраны под действием максимального давления жидкости/газа в условии эксплуатации.

Для расчета надежности датчика давления используется математическое ожидание действующих напряжений ($m_{\text{ЭКВ}}$) определяемое по формуле (2.1) и его среднеквадратическому отклонению ($\sigma_{m_{\text{ЭКВ}}}$), которое сначала определяется опытным путем, а потом рассчитывается по формуле (2.2).

$$m_{\text{ЭКВ}} = \frac{3P_{\text{н}}R^2}{4h^2}, \quad (2.1)$$

где $P_{\text{н}}$ – нагрузка, R – радиус мембраны, h – толщина мембраны [29].

$$\sigma_{m_{\text{ЭКВ}}} = \sqrt{\frac{P \cdot q}{N}}, \quad (2.2)$$

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

где P – вероятность безотказной работы, N – количество отказов, q – вероятность отказа ($q=1-P$) [29].

Если нет экспериментальных данных, то для расчета используется значение среднеквадратического отклонения определяемое по формуле (2.3).

$$\sigma_{m_{\text{ЭКВ}}} = m_{\text{ЭКВ}} * 0,1. \quad (2.3)$$

Так же для расчета используется математическое ожидание предельного напряжения ($m_{\text{П}}$), которое равно заданному значению предела текучести взятому из технических условий на материал и его квадратическому отклонению, определяемому по формуле (2.4). Данные пределов текучести для каждого материала представлены в таблице 2.1.

$$\sigma_{m_{\text{П}}} = m_{\text{П}} * 0,1. \quad (2.4)$$

При расчете вероятности безотказной работы механических узлов и металлоконструкции используют нормальный закон распределения действующей нагрузки и прочности:

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-(x-m_1)^2}{2\sigma_1^2} \right], \quad (2.5)$$

$$f_2(x) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-(x-m_2)^2}{2\sigma_2^2} \right], \quad (2.6)$$

где m_1, m_2 – математическое ожидание соответственно прочности и нагрузки; σ_1, σ_2 – средние квадратические отклонения соответственно прочности и нагрузки.

Схематически плотности распределения вероятностей прочности и нагрузки изображены на рисунке 2.10.

На построенном графике откладывается математическое ожидание предельного напряжения материала, заданной нагрузки и их

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

среднеквадратические отклонения. Зона пересечения двух графиков является зоной оптимальной работы датчика.

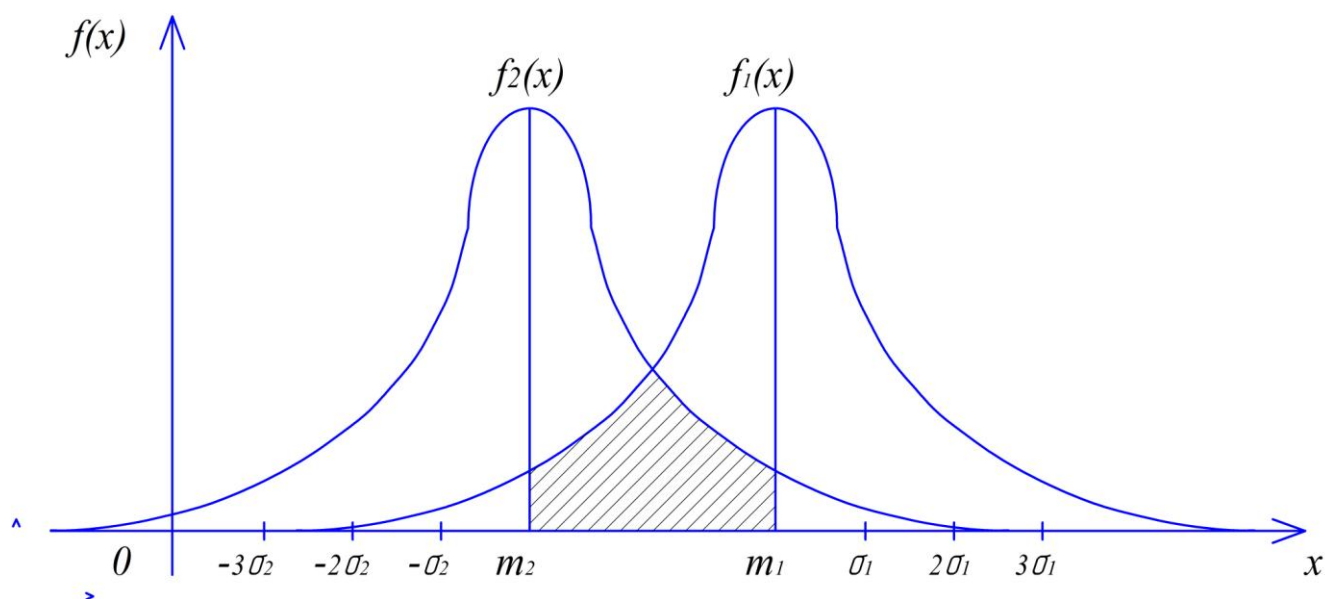


Рисунок 2.10 – Плотность распределения нагрузки и прочности

Далее будет проведена оценка вероятности безотказной работы датчика давления в зависимости от толщины мембраны по формуле (2.5) взятой из монографии В.М. Труханова, А.М. Матвеевко [28].

$$\hat{P} = \Phi(U_p), \quad (2.5)$$

где $\Phi(U_p)$ – нормированная нормальная функция распределения (берется по таблице 1 из монографии [28]), U_p – квантиль функции нормального распределения. Выражение для квантиля U_p представлено ниже:

$$U_p = \left(\frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \right). \quad (2.6)$$

Производится расчет по формулам (2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6) для следующих толщин: 1,5 – 0,1 мм. Полученные результаты представим в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчетов надежности

Материал	h, мм	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа	$\sigma_{\text{п}}$, МПа	U_p	\hat{P}
Bronzefill	1,5	13,3	26,50	-5,077	1,000
	1,2	20,8		-2,510	0,993
	1,0	30,0		0,000	0,500
Titanium Ti64ELI	1,5	13,3	1125,00	-9,881	1,000
	1,2	20,8		-9,813	1,000
	1,0	30,0		-9,730	1,000
	0,5	120,0		-8,883	1,000
	0,1	3000,0		5,852	1,000
Традиционные материал	1,5	13,3	1034,21	-9,870	1,000
	1,2	20,8		-9,797	1,000
	1,0	30,0		-9,706	1,000
	0,5	120,0		-8,781	1,000
	0,1	3000,0		6,195	1,000

В таблице 2.3 применены следующие обозначения: $\hat{P} = 1,000$ – обозначает, что было изготовлено 1000 мембран данной толщины и все произведенные мембраны выдержат приложенную нагрузку; $\hat{P} = 0,993$ – при данной толщине 7 из 1000 мембран могут не выдержат приложенной нагрузки; $\hat{P} = 0,500$ – при данной толщине 1/2 из произведенных мембран могут не выдержать приложенной нагрузки.

На основании сказанного выше делается вывод, что для материала Bronzefill оптимальная толщина мембраны составляет 1,2 мм. Использование толщины мембраны 1,5 мм повлечет за собой удорожание мембраны и соответственно датчика давления в целом . Использование мембраны 1,0 мм не допустимо так как надежность датчика давления будет низкой.

Для традиционного материала и металлического порошка Titanium Ti64ELI материалов толщина мембраны зависит от технологичности производства и способов проверки.

Выводы по второй главе: по критерию надежности выявлено, что минимальная толщина мембраны для материала BronzeFill составляет 1,2 мм, а для традиционного материала и Titanium Ti64ELI – 0,1 мм.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

3 РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

3D-модель чувствительного элемента представлена на рисунок 3.1. Так как данная модель не плоская, имеет несколько элементов, перепады высот, то для расчета следует использовать метод конечных элементов. Основным достоинством, которого является расчет объектов любой формы и различной физической природы – твёрдые деформируемые тела, жидкости, газы, электромагнитные среды [30].

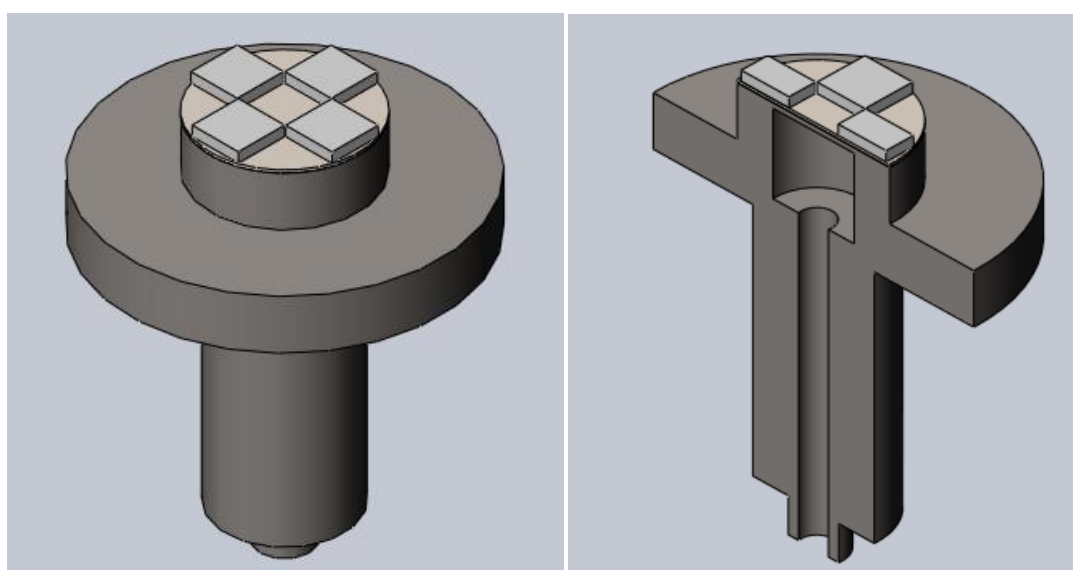


Рисунок 3.1 – 3D-модель чувствительного элемента датчика давления: а – внешний вид; б – вид в разрезе

3.1 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) – это метод приближённого численного решения физических задач. В его основе лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций.

Основное отличие МКЭ от классических алгоритмов вариационных принципов и методов невязок заключается в выборе базисных функций. Они

берутся в виде кусочно-непрерывных функций, которые обращаются в нуль всюду, кроме ограниченных подобластей, являющихся конечными элементами.

Это ведёт к ленточной разреженной структуре матрицы коэффициентов разрешающей системы уравнений. Использование вариационных принципов и методов взвешенных невязок позволило глубже понять математические основы МКЭ и, в частности, определить условия сходимости этого численного метода к точному решению [6, 23, 32].

Главные достоинства МКЭ:

1) исследуемые объекты могут иметь любую форму и различную физическую природу – твёрдые деформируемые тела, жидкости, газы, электромагнитные среды;

2) конечные элементы могут иметь различную форму, в частности криволинейную, и различные размеры;

3) можно исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;

4) можно решать как стационарные, так и нестационарные задачи;

5) можно решать контактные задачи;

6) можно моделировать любые граничные условия;

7) вычислительный алгоритм, представленный в матричной форме, формально единообразен для различных физических задач и для задач различной размерности, что удобно для компьютерного программирования;

8) на одной и той же сетке конечных элементов можно решать различные физические задачи, что облегчает анализ связанных задач;

9) разрешающая система уравнений имеет экономичную

разряженную симметричную ленточную матрицу «жёсткости», что ускоряет вычислительный процесс на ЭВМ;

10) удобно осуществляется иерархическая дискретизация исследуемой области на подобласти с образованием суперэлементов, что позволяет эффективно использовать параллельное решение задачи.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

3.1.1 Дискретизация. Конечные элементы. Узлы

Деформируемое тело (конструкция) разбивается на конечные элементы (Рисунок 3.2). Конечные элементы могут иметь различную форму и различные размеры. В результате разбивки создаётся сетка из границ элементов. Пересечения этих границ образуют узлы. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Ансамбль из всех конечных элементов и узлов является основой конечно – элементной модели деформируемого тела. Дискретная модель должна достаточно хорошо покрывать область исследуемого объекта.

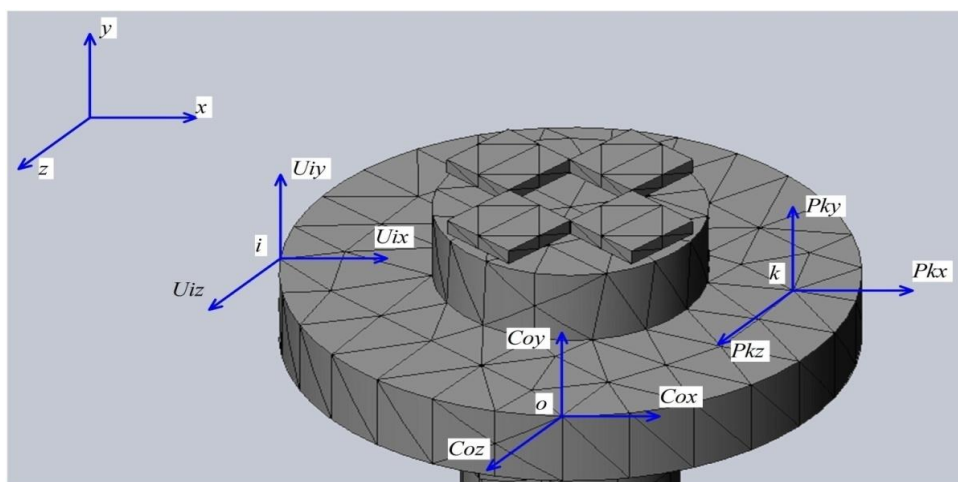


Рисунок 3.2 – Конечно – элементная модель чувствительного элемента

Сегодня МКЭ является мощным инструментом инженерного анализа и физических исследований благодаря созданию пакетов компьютерных программ, таких как ANSYS, MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS (Solid Works), ABAQUS, которые не только реализуют вычислительный процесс МКЭ, но и имеют удобный интерфейс для ввода исходных данных, контроля процесса вычислений и обработки результатов расчёта [11, 29]. Мы будем производить расчеты в программе Solid Works.

3.2 Подготовка к эксперименту

Штуцер, изготовленный на 3D-принтере, проверяется на соответствие изделиям, произведенным традиционным способом. Для этого проводится ряд экспериментов для разных материалов по уменьшению толщины мембраны с использованием программы SolidWorks [4]. Условием достаточной прочности является не превышение действующими нагрузками, в силовых элементах конструкции, предела прочности материала (Таблица 3.1). Эксперимент будет проводиться при постоянном максимальном давлении 2.5 МПа. При подготовке к эксперименту производится выбор шага сетки по установившемуся значению напряжения в материале мембраны по результатам 3D-моделирования. (Таблица 2.1, Рисунок 3.4).

Таблица 3.1 – Зависимость вычисленного напряжения от шага сетки

Шаг сетки	h1 – толщина мембраны 1,5, мм	h2 – толщина мембраны 1,2, мм	h3 – толщина мембраны 1,0, мм
1,3	13,085	19,189	26,411
1,2	13,317	19,585	26,815
1,1	13,518	19,245	26,499
1,0	13,435	19,762	26,738
0,9	13,518	19,871	26,986
0,8		20,043	27,430
0,7		20,014	27,521
0,6			28,130
0,5			28,135

По данным полученным в результате компьютерных расчетов строится график зависимости вычисленного напряжения от шага сетки (Рисунок 3.3).

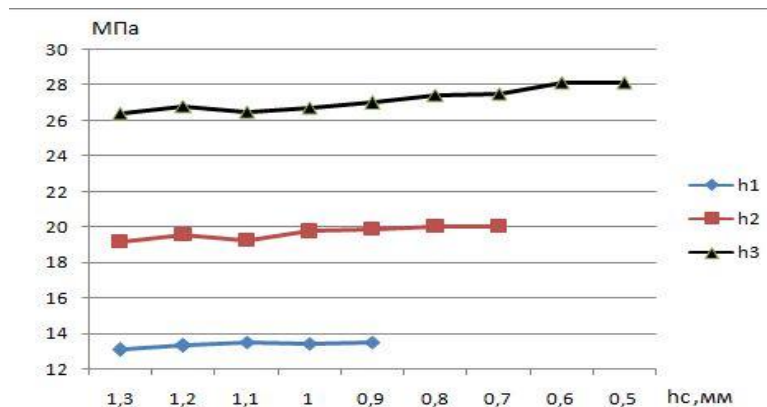


Рисунок 3.3 – Зависимость вычисленного напряжения от шага сетки
 h1 – толщина мембраны 1,5 мм, h2 – толщина мембраны 1,2 мм, h3 – толщина мембраны 1,0 мм, hс – шаг сетки

3.3 Эксперимент

Далее приведены результаты моделирования датчика давления для материала BronzeFill, ABS, PLA Titanium Ti64ELI и традиционного материала (титан). В ходе моделирования получены значения напряжений мембраны для нескольких значений ее толщины. Полученные данные представлены в таблице 3.2.

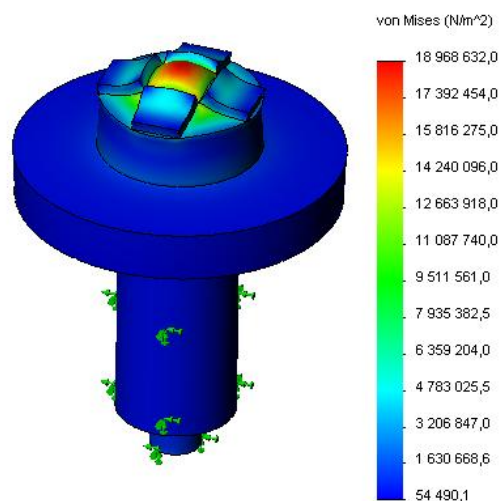


Рисунок 3.4 – Моделирование напряжение при мембране 1,2 мм

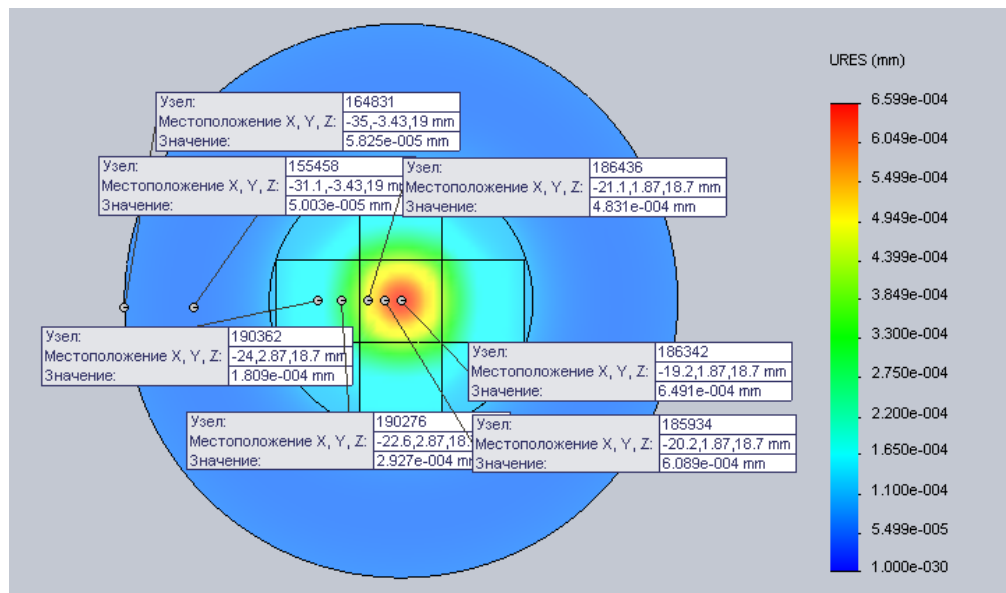


Рисунок 3.5 – Схема моделирования чувствительного элемента при толщине мембраны 1 мм и давлении 2,5 МПа для материала BronzeFill

Таблица 3.2 – Деформация мембраны для материала BronzeFill

Положение контрольной точки относительно геометрического центра, h_y , мм	Толщина мембраны, мм		
	$h1=1,5$	$h2=1,2$	$h3=1,0$
0,0	4,221	5,374	6,491
0,9	4,022	5,077	6,089
1,7	3,447	4,127	4,831
3,1	2,381	2,608	2,927
4,7	1,519	1,679	1,809
11,7	0,490	0,489	0,500
15,7	0,483	0,535	0,582

По данным полученным в результате компьютерного моделирования строится график зависимости вычисленного напряжения от шага сетки (Рисунок 3.5).

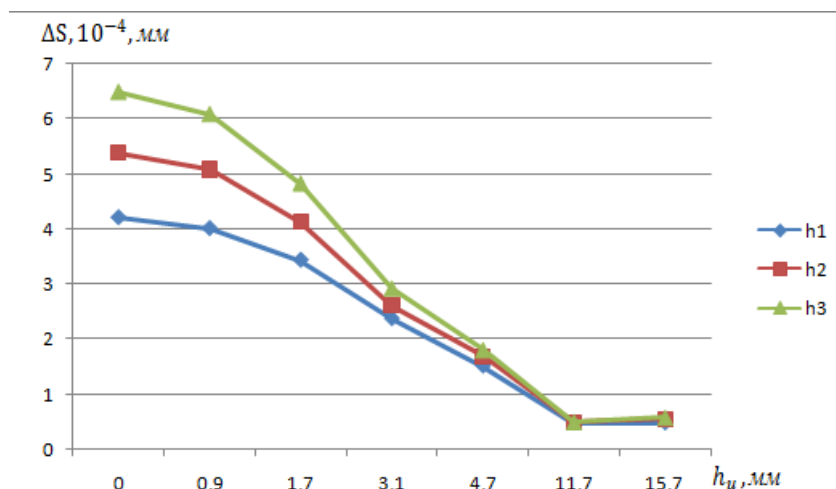


Рисунок 3.6 – График деформаций мембраны для материала BronzeFill:
 ΔS – деформация мембраны, h_u – положение контрольной точки относительно геометрического центра

Таблица 3.3 – Результаты численного моделирования

Название материала		Толщина мембраны, мм				
		1,5	1,2	1,0	0,5	0,1
Традиционный материал	Напряжение мембраны, МПа	14,490	17,917	21,000	36,134	82,536
Ti64ELI (DMSL)		14,209	17,595	20,642	35,560	81,658
BronzeFill (FDM)		15,412	18,969	22,168		
ABS (FDM)		15,668	18,338	22,487		
PLA (FDM)		15,525	18,231	22,315		

Из данных таблицы 3.3 следует, что по критерию прочности материала BronzeFill, ABS, PLA минимальная толщина мембраны составляет 1,2 мм, для Ti64ELI и традиционного материала 0,1 мм. Для тензорезисторов и сапфировой подложки, наклеиваемых на мембрану, полученные значения напряжений не критичны: предел прочности тензорезисторов, изготовленных из константана составляет 670 МПа, для сапфировой подложки (Al_2O_3) составляет 300 МПа.

Выводы по третьей главе: по критерию прочности выявлено, что минимальная толщина мембраны для материала BronzeFill составляет 1,2 мм, а для традиционного материала и Titanium Ti64ELI – 0,1 мм.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

4 ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На основе вышесказанного, производится обработка данных по следующим направлениям:

- 1) определение качества точности печатных изделий;
- 2) расчет времени изготовления деталей датчика и количества материалов, необходимых для изготовления датчика давления;
- 3) определение вида чистовой обработки деталей;

4.1 Оценка качества точности деталей, изготавливаемых методом аддитивных технологий

Квалитет – характеристика точности изготовления изделия (детали), определяющая значения допусков [35].

Особенностью определения качества точности для изделий, изготовленных на 3D-принтере по FDM-технологии, является то, что качество точности по высоте будет определяться толщиной печатного слоя h_k , как показано на рисунке 4.1.

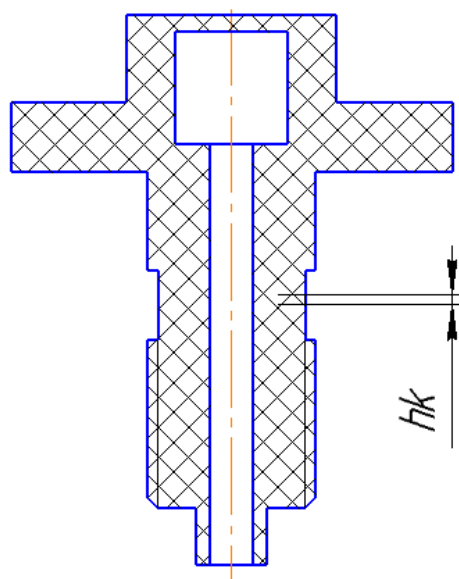


Рисунок 4.1 – Схема штуцера датчика давления:

h_k – толщина слоя, определяющая качество по высоте печати детали

Определение качества точности в плоскости печати будет определяться шириной печатного слоя, как представлено на рисунке 4.2, ширина печатного слоя зависит от диаметра сопла экструдера.

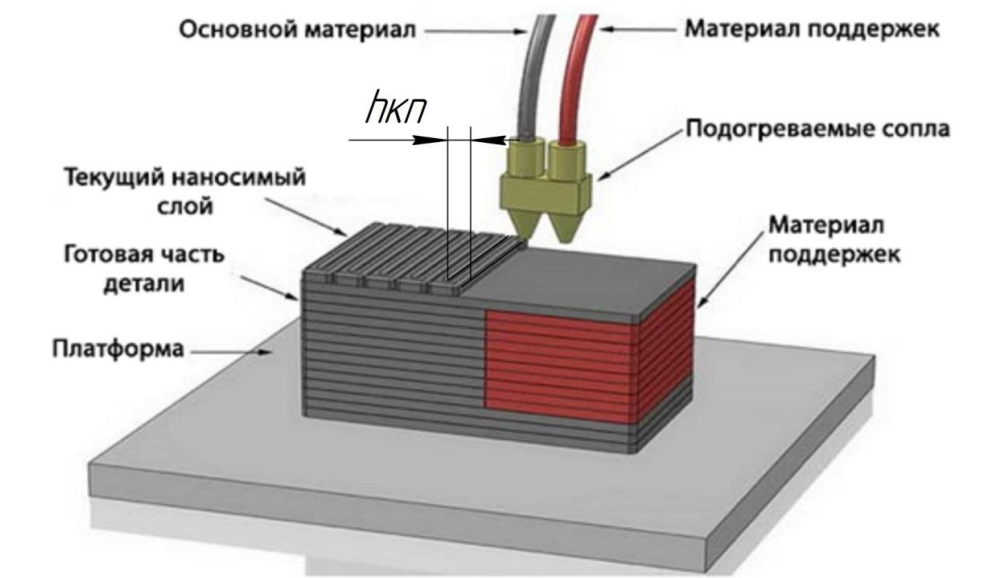


Рисунок 4.2 – Схема нанесения слоя в 3D-печати

$h_{кп}$ – ширина слоя, определяющая качество точности в плоскости печати

Таким образом качество точности зависит от толщины слоя и диаметра головки экструдера.

Разработаем чертежи для все печатных изделий (См. приложение В,Г) и определим качества точности. Качества назначаются следующим образом:

- 1) по габаритным размерам, на основе ГОСТ 25347 – 82 "Единая система допусков и посадок", выбирается необходимая строка с допусками;
- 2) на основе толщины слоя, диаметра головки экструдера и посадки детали, выбирается допуск и качество.

Пример системы расстановки качеств поясняется рисунком 4.3, на котором представлена схема штуцера с размерами. Требуется определить качество для диаметров 31,5 и 15 мм. На первом шаге определяется система назначения допусков на отклонения размеров: вала или отверстия. Для диаметра 31,5

выбирается система отверстия, диаметр 15 является охватываемым, по этому квалитет будет определяться по системе вала. Из таблицы 7 ГОСТ 25347 – 82 выбираем допуск и квалитет для диаметра 15 мм. При выборе допуска мы должны учитывать, что разница между предельными отклонениями должна превышать или равняться 150 мкм. Так как посадка с натягом выбираем квалитет h12.

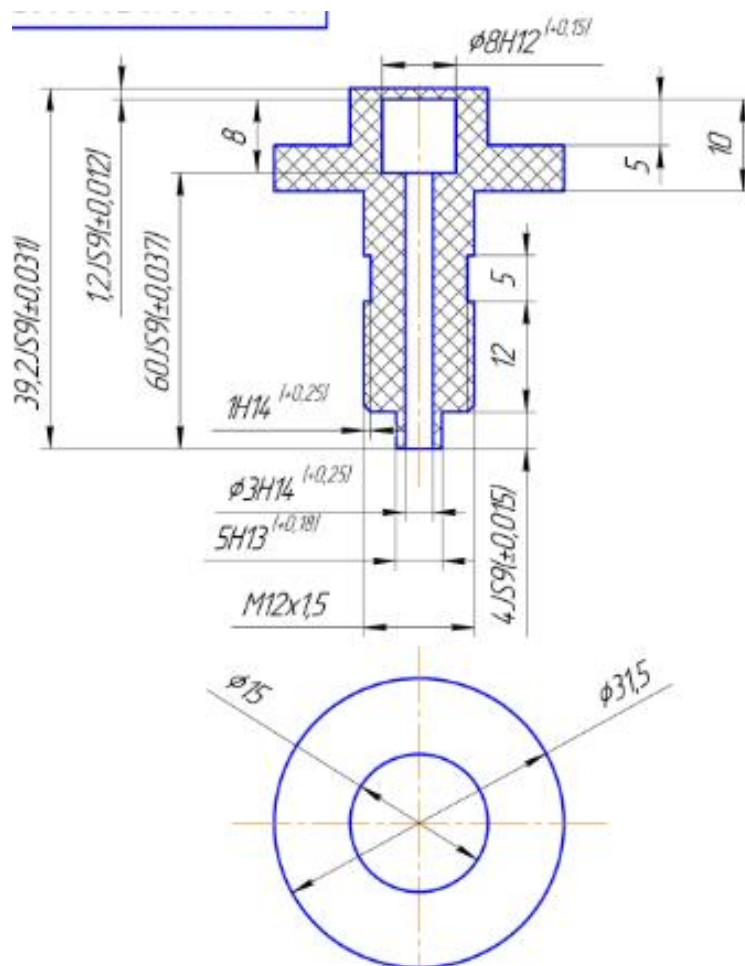


Рисунок 4.3 – Схема штуцера с размерами

Для определения квалитета для диаметра 31,5 обратимся к таблице 8 ГОСТ 25347 – 82 (Рисунок 4.5). Так как на данную деталь будет устанавливаться корпус выбираются предельные отклонения от 0 до 250 мкм. Таким образом для данного размера квалитет H12.

Квалитеты на все печатные детали представлены в таблице 4.1.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Таблица 4.1 – Квалитеты точности для печатных изделий FDM – технология

Деталь	Квалитеты точности по высоте печати	Квалитеты точности в плоскости печати
Штуцер вместе с мембраной	JS9	H12, H13, H14
Штуцер с отдельной мембраной	H11, H12, H13	JS12, H12, H13, H14
Корпус	H11	H12
Крышка	H13, H14	H12, H14
Колпачок	JS13, H13, H14	H12
Мембрана	JS9	H12
Кольцо для штуцера вместе с мембраной	H13, JS14	H12,
Кольцо	H13	H12
Кольцо для мембраны	H14	H12

Из анализа таблицы 4.1 делается вывод, что минимальный квалитет точности по высоте печати JS9, в плоскости печати h12.

Для DMLS-технологии квалитет точности по высоте печати будет определяться толщиной слоя – 50 мкм (Рисунок 4.1), в плоскости печати размером мелкозернистого порошка – 50 мкм. На основе ГОСТ 25347 – 82 назначаются все квалитеты (Таблица 4.2)

Таблица 4.2 – Квалитеты точности для печатных изделий DMLS – технология

Деталь	Квалитеты точности
Штуцер	JS9, H9, h10, H11
Корпус	H9
Крышка	H9, H10, H11

Продолжение таблицы 4.2.

Колпачок	H9, H11, JS11
Кольцо	JS11, H9, H10

4.2 Расчет времени изготовления деталей датчика и количества материалов, необходимых для изготовления датчика давления

Для расчета времени печати и объема затраченного материала, для FDM-технологии, можно воспользоваться любой бесплатной компьютерной программой, такой как MakerWare, Cura, Repetier-Host. Для вычисления воспользуемся программой Cura компании Ultimaker [14].

Cura 3D — это программа – слайсер для получения в компьютере цифрового файла для 3D-принтера в таком формате, который понимает аппаратура 3D – печати.

Cura создает бесшовную интеграцию между 3D-принтером, программным обеспечением и материалами для достижения идеальной печати:

- 200 настроек для достижения наилучших результатов для своих моделей;
- печать нескольких объектов одновременно с различными настройками для каждого объекта;
- поддержка форматов STL, 3MF и OBJ;
- программа с открытым исходным кодом и бесплатная,
- программа поддерживает 14 языков, в том числе русский.

В программе Solid Works построим 3D-модели деталей, сохраним с расширением stl и загрузим в рабочую среду Cura (Рисунок 4.4).

Далее для проведения расчетов производится настройка программы:

1) Выставляется толщина наносимого слоя. Данные для каждой детали представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Данные толщины наносимого слоя

Деталь (Материал)	Толщина слоя, мм	Деталь (Материал)	Толщина слоя, мм
Резиновый колпачок (RUBBER)	0.15	Штуцер (Bronzefill)	0.02
Крышка (ABS)	0.15	Крышка (PLA)	0.15
Кожух (ABS)	0.15	Кожух (PLA)	0.15
Кольцо (ABS)	0.15	Кольцо (PLA)	0.15

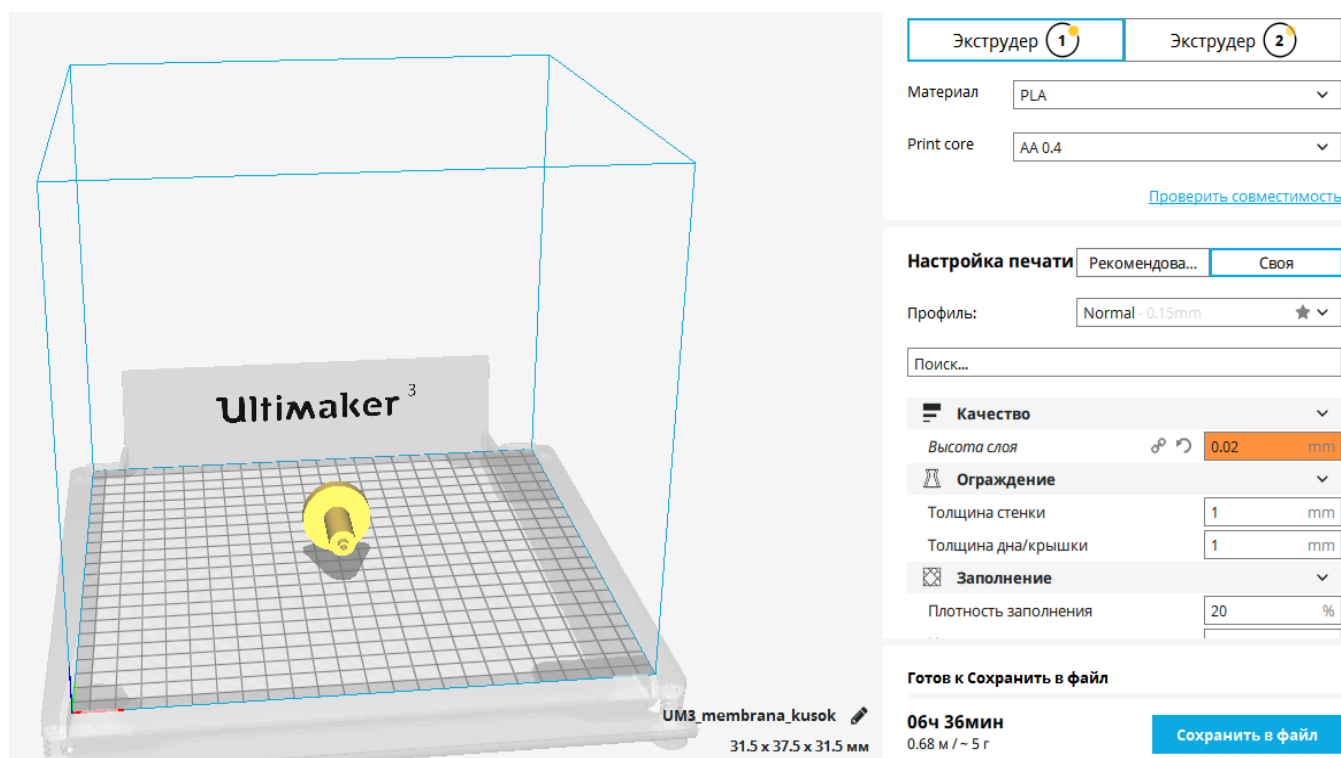


Рисунок 4.4 – 3D-модель штуцера в рабочей области программы Cura

2) Выставляется скорость печати. Данные скорости для каждой детали представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Данные скорости печати

Деталь (Материал)	Скорость печати, мм/с	Деталь (Материал)	Скорость печати, мм/с
Резиновый колпачок (RUBBER)	25	Штуцер (Bronzefill)	70
Крышка (ABS)	45	Крышка (PLA)	50
Кожух (ABS)	45	Кожух (PLA)	50
Кольцо (ABS)	45	Кольцо (PLA)	50

3) Выставляем температуру экструдера и стола для каждого материала. Данные температуры для каждого материала представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Данные температуры экструдера и стола для каждого материала

Материал	Температура, °С	
	Экструдер	Стол
RUBBER	230 – 250	100 – 120
ABS	220 – 260	110
PLA	190 – 230	70
Bronzefill	190 – 210	50 – 60

Для выбранных материалов приводятся значения длины на катушке и цены за нее. Данные представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Значения длины на катушке и цены за нее

Материал	Цена за катушку, руб	Длина материала на катушке, м
RUBBER	2990	350

Продолжение таблицы 4.6.

ABS	1190	396
PLA	1390	332
Bronzefill	5600	250
HIPS	1200	350
PVA	3000	350

Производится расчет времени, необходимого для печати детали, количества и стоимость материала. Полученные расчетные данные представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Расчетные данные для деталей

Деталь (Материал)	Время изготовления, мин	Количество требуемого материала, м	Стоимость материала изделия, руб
Резиновый колпачок (RUBBER)	43	0,26	2,2
Крышка(ABS)	23	0,25	0,8
Крышка(PLA)	25	0,24	1,0
Кожух(ABS)	167	2,29	6,9
Кожух(PLA)	221	2,05	8,6
Кольцо(ABS)	24	0,22	0,7
Кольцо(PLA)	23	0,19	0,8

Производится расчет времени, необходимого для печати различных моделей штуцера, количества и стоимость материала. Полученные расчетные данные представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Расчетные данные для разных моделей штуцера

Деталь (Материал)	Время изготовления, мин	Количество требуемого материала, м	Стоимость материала изделия, руб
Штуцер выполненный вместе с мембраной			
Штуцер (Bronzefill)	499	0,69	15,5
Штуцер с напаянной мембраной			
Штуцер (ABS)	71	0,81	2,5
Штуцер (PLA)	70	0,71	3,0
Кольцо (ABS)	15	0,10	0,3
Кольцо (PLA)	16	0,10	0,4
Мембрана (Bronzefill)	101	0,09	2,0

Суммируются время, необходимое для 3D-печати, и стоимость материала для изделия. Расчетные данные представлены в таблице 4.9, 4.10, 4.11, 4.12., 4.13.

Таблица 4.9 – Суммарное время и стоимость материала для изготовления деталей из ABS пластика с штуцером изготовленным вместе с мембраной

Деталь (Материал)	Время изготовления детали, мин	Стоимость материала, руб
Резиновый колпачок (RUBBER)	43	2,2

Продолжение таблицы 4.9.

Крышка(ABS)	23	0,8
Кожух(ABS)	167	6,9
Кольцо(ABS)	24	0,7
Штуцер (Bronzefill)	396	15,2
Сумма	653	26

Таблица 4.10 – Суммарное время и стоимость материала для изготовления деталей из PLA пластика с штуцером изготовленным вместе с мембраной

Деталь (Материал)	Время изготовления детали, мин	Стоимость материала, руб
Резиновый колпачок (RUBBER)	43	2,2
Крышка(PLA)	25	1,0
Кожух(PLA)	221	8,6
Кольцо(PLA)	23	0,8
Штуцер (Bronzefill)	396	15,2
Сумма	708	28

Таблица 4.11 – Суммарное время и стоимость материала для изготовления деталей из ABS пластика со штуцером с напаянной мембраной

Деталь (Материал)	Время изготовления детали, мин	Стоимость материала, руб
Резиновый колпачок (RUBBER)	43	2,2
Крышка(ABS)	23	0,8
Кожух(ABS)	167	6,9
Кольцо(ABS)	7	0,3

Продолжение таблицы 4.11.

Штуцер (ABS)	71	2,5
Кольцо для мембраны (ABS)	15	1,0
Мембрана (Bronzefill)	101	2,0
Сумма	427	15,7

Таблица 4.12 – Суммарное время и стоимость материала для изготовления деталей из PLA пластика со штуцером с напаянной мембраной

Деталь (Материал)	Время изготовления детали, мин	Стоимость материала, руб
Резиновый колпачок (RUBBER)	43	2,2
Крышка(PLA)	25	1,0
Кожух(PLA)	221	8,6
Кольцо(PLA)	8	0,4
Штуцер (PLA)	70	3,0
Кольцо для мембраны (PLA)	16	1,1
Мембрана (Bronzefill)	101	2,0
Сумма	484	18,3

Таблица 4.13 – Итоговая таблица времени изготовления и стоимости материала деталей

Изделие (материал)	Стоимость материалов для печати изделия, руб	Время изготовления, мин
Штуцер вместе с мембраной (ABS)	26	653

Продолжение таблицы 4.13.

Штуцер вместе с мембраной (PLA)	28	708
Штуцер с отдельной мембраной (ABS)	16	427
Штуцер с отдельной мембраной (PLA)	18,3	484

4.3 Определение чистовой обработки

После печати FDM-технологией изделие имеет ребристую поверхность, как представлено на рисунке 4.5. Обработать деталь можно различными способами:

- Обработка химическим способом;
- Обработка температурой;
- Механическая обработка;
- Покрытие поверхности различными шпатлевками.



Рисунок 4.5 – Изделие после 3D - печати FDM-технологией

4.3.1 Химический способ

Химический способ является наиболее щадящим и эффективным, но требует правильного подбора реагента. Например, ацетон отлично растворяет неровности на поверхности ABS-пластика, но совершенно бесполезен для обработки PLA-пластика. С другой стороны, дихлорэтан или дихлорметан хорошо выравнивают неровности PLA-пластика.

Растворители, использующиеся для обработки пластиков 3D-принтеров:

1) Для PLA-пластика:

Дихлорэтан - имеет два изомера: 1,2 — Дихлорэтан (хлористый этилен, опасный токсин, второй класс опасности), 1,1 — Дихлорэтан (хлористый этилиден, менее токсичен, третий класс опасности). Оба имеют резкий и неприятный запах, ядовиты, горючи, являются наркотическими и канцерогенными веществами, запрещены для бытового использования.

Дихлорметан (хлористый метилен) – бесцветная, легкоподвижная, горючая жидкость, имеет четвертый класс опасности, может оказывать наркотическое действие, так же является ядовитым и канцерогенным веществом.

Ацетон — очень плохо растворяет PLA-пластик, вместо этого происходит набухание, размягчение и коробление изделия. Может применяться только для чистки засоренных сопел.

Ацетон является токсичным и легковоспламеняемым материалом. При концентрации паров ацетона выше 13% в атмосфере эта воздушная смесь становится взрывоопасной. Поэтому необходимо все работы с растворителями проводить в хорошо проветриваемом помещении с принудительной вентиляцией, используя резиновые перчатки, респираторы и защитные очки.

Нельзя плотно закрывать резервуар (контейнер) с подогретым ацетоном, так как в связи с высокой степенью испарения может возникнуть ситуация, когда газы под давлением разорвут емкость и могут нанести повреждения.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

2) Для ABS-пластика:

Самый популярный растворитель – это ацетон, он достаточно дешевый, доступен и отлично справляется с поставленной задачей. Горюч, имеет резкий неприятный запах, быстро испаряется.

Этилацетат — имеет приятный запах по сравнению с ацетоном, четвертый класс опасности, практически не используется в быту, из – за этого труднодоступен. С ним удобно работать т.к. он быстро не испаряется и имеет приемлемый запах.

Дихлорэтан и дихлорметан тоже отлично растворяют ABS-пластик.

Обработка ацетоном

Этот метод очень прост и не требует особых затрат. Достаточно погрузить модель в концентрированный (неразбавленный) ацетон на 8-10 секунд и внешний слой изделия будет сглажен. После этого достаточно подержать модель на чистом воздухе, до полного испарения растворителя (около получаса).

Отрицательным фактором в данном методе является то, что очень сложно подобрать время выдержки, так как ацетон и его производные при превышении времени обработки, начинают растворять мелкие детали или всю конструкцию в целом. Также, при обработке изделий разного цвета, необходимо полностью менять состав растворителя, иначе это приведет к цветным разводам на поверхности моделей.

На сегодняшний день самым действенным и эффективным методом обработки поверхности 3D-моделей из ABS-пластика считается использование паров ацетона. В результате такой обработки поверхность изделия выглядит ровной и глянцевой.

При использовании данного способа выбранную конструкцию помещают в свободную емкость, на дне которой находится небольшое количество ацетона. Модель не должна соприкасаться с растворителем, и поэтому необходимо поместить ее на изолирующую платформу.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

Такой подставкой может быть платформа из древесины, но, учитывая пористость этого материала, лучше использовать металлическую основу. Она позволит легко отделить модель от опоры, одновременно не допуская прямого контакта поверхности конструкции с растворителем.

Для ускорения процесса обработки изделия парами ацетона рекомендуется подогреть емкость с реагентом и помещенной внутрь моделью до нужной температуры, но не доводить до кипения. Следует учитывать, что при кипении растворителя выделяется конденсат на плоскости обрабатываемой конструкции, что неизбежно вызовет образование на ней разводов. Таким образом, оптимальная температура ацетона должна быть в пределах (50 – 56) °С.

Обработку моделей таким методом можно проводить и без подогрева ацетона, но тогда эта процедура займет очень продолжительное время и будет не достаточно эффективна.

Обработанное изделие представлено на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Изделие, обработанное ацетоном

В связи со слабой устойчивостью ABS-пластика к внешним химическим воздействиям ацетоновых соединений, особенно, учитывая реакцию на

концентрацию паров растворителя, а их насыщенность зависит от температуры реактива — время выдержки в емкости (камере) может сильно различаться: от нескольких секунд (подогретый ацетон) до 40 минут (без подогрева). Но, при использовании прозрачного контейнера, есть возможность определить степень готовности и фазу завершения обработки визуально.

При использовании ацетона как методом погружения, так и методом обработки парами растворителя, готовой модели необходимо дать время проветриться, чтобы внешняя поверхность достаточно затвердела, иначе любое физическое воздействие может привести к разрушительным последствиям для формы изделия.

Кроме этого, нужно учитывать толщину стенок и необходимость сохранения тонких черт конструкции, так как при обработке ацетоном есть вероятность утери и того и другого (при работе с этим растворителем теряется внешний, тонкий слой конструкции).

Большинство растворителей, обладают свойствами легкого испарения и особыми специфическими характеристиками.

4.3.2 Воздействие высокой температуры

Используемые инструменты: газовая горелка или промышленный фен с регулируемой температурой. Последний наиболее предпочтителен т.к. исключает подгорания и сильный перегрев изделия. Такой метод термообработки дает удовлетворительные результаты, только если он используется для монолитных изделий из PLA-пластика. Так как очень трудно обеспечить равномерный нагрев поверхности, а длительное воздействие высокой температуры на отдельные фрагменты модели может привести к «вскипанию» пластика и искажению геометрических размеров.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

4.3.3 Ручная химическая обработка распечатанной 3D-модели

Такой вид сглаживания ребристости, неровностей и шероховатостей является очень действенным, но трудоемким и требующим определенного опыта и сноровки. Для этих целей 3D-мейкеры используют простые кисточки с натуральными волокнами, так как синтетический ворс сам может быть подвержен действию растворителя.

К положительному моменту такого способа обработки можно отнести возможность нанесения ацетона (другого растворителя) на определенные, отдельные участки поверхности модели, что позволяет оставить в сохранности острые грани и углы. Однако добиться идеальной чистоты поверхности в таком случае достаточно трудно. В условиях, когда пластик достаточно размягчен, сами волоски кисточки оставляют царапины и неровности, которые могут не успеть разгладиться до полного испарения растворителя.

Для ручной обработки поверхностей 3D-моделей создаются и используются специальные приспособления, одним из таких устройств является Makeraser, которое, по сути, представляет собой фломастер. В стержне находится ацетон или клей на его основе, в конструкции предусмотрен встроенный скребок для снятия уже готового изделия с платформы. Если судить о практичности его применения, то использовать Makeraser лучше всего при склеивании частей пластиковых конструкций или для обработки поверхности рабочего столика перед печатью 3D-модели, с целью предотвращения скручивания первых слоев будущей модели. Makeraser представлен на рисунке 4.7 [36].



Рисунок 4.7 – Устройство для ручной химической обработки Makeraser

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

4.3.4 Профессиональные установки для химической обработки

Кроме описанного ранее устройства Makeraser, предлагается большое количество установок (коммерческого производства), которые дают возможность обрабатывать заготовки и готовые конструкции при помощи паров ацетона и других химических веществ (например, дихлорметана или бутанона).

Так, например, компания Stratasys выпускает установку, известную как «Finishing Touch». Это оборудование позволяет обрабатывать любые изделия из ABS-пластика, доводя качество поверхностей до стандартов моделей, производимых литьем под давлением. Внешний вид установки представлен на рисунке 4.8а, вид камеры и изделия - на рисунке 4.8б [37].



Рисунок 4.8 – Установка «Finishing Touch» компании Stratasys

Кроме того, эта установка имеет систему рециркуляции, которая создает многократный оборот паров растворителя, что обеспечивает его экономию и отсутствие загрязнения окружающей среды.

Еще одно перспективное устройство Sky Tech MagicBox может обрабатывать не только ABS-пластик, но и PLA-пластик. В установке используется как реагент – ацетон, и, хотя он плохо растворяет полилактиды, тем не менее его

эффективность очень высока. Внешний вид установки Sky Tech MagicBox представлен на рисунке 4.9 [38]



Рисунок 4.9 – Установка Sky Tech MagicBox

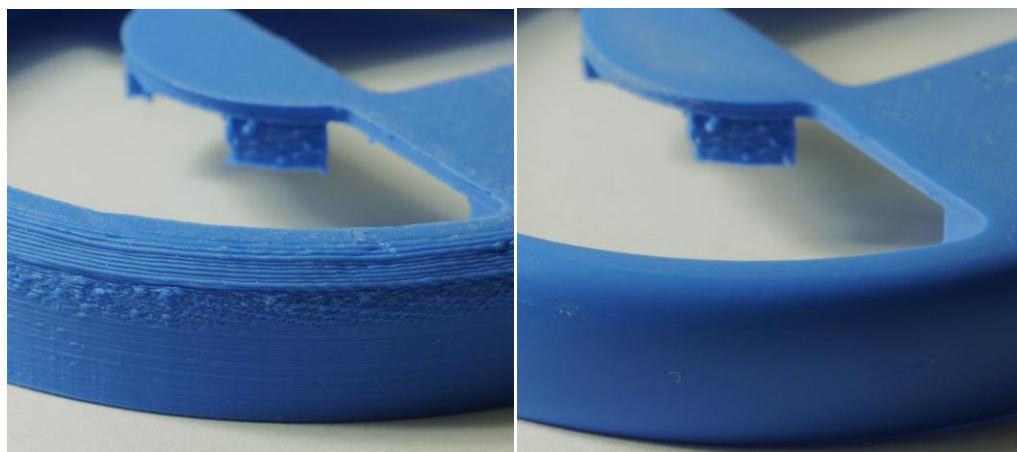
Такое оборудование будет очень полезным для фирм и компаний, занимающихся FDM 3D-печатью малыми сериями и небольшими партиями.

4.3.5 Механическая обработка распечатанной 3D-модели

В большинстве случаев требуется механическая обработка напечатанной 3D-модели. Дефекты чаще всего наблюдаются в местах соединения модели с поддержками или столом 3D-принтера. Вот здесь и понадобится обработка надфилем или напильником, а затем шлифовальной бумагой. Изделие до обработки представлено на рисунке 4.12 а, изделие после обработки – рисунок 4.12 б.

Инструменты, используемые для механической обработки:

1. Различные надфили и напильники (Рисунок 4.14).
2. Шлифовальная бумага. Наиболее часто используются микронные листы.
3. Канцелярский скальпель (Рисунок 4.16).



а)

б)

Рисунок 4.12 – Изделие до обработки



Рисунок 4.15 – Напильники



Рисунок 4.16 – Канцелярский скальпель

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ

Лист

73

4. Профессиональные бормашины типа Dremel (Рисунок 4.17). С помощью него можно сверлить, шлифовать, гравировать, резать и т.д.



Рисунок 4.17 – Профессиональные бормашины типа Dremel

4.3.6 Покрытие распечатанной 3D-модели различными шпатлевками

В качестве материалов могут использоваться различные шпатлевки для пластика и шпатлевки на эпоксидной основе. Основным минусом этого метода является то, что после нанесения и отверждения потребуется механическая обработка.

Различные одно и двухкомпонентные шпатлевки можно найти в автомагазинах. Наносить рекомендуется резиновым шпателем. Необходимо учитывать, что однокомпонентные шпатлевки обладают значительной усадкой, вследствие этого шпатлевку придется наносить несколько раз. Она подходит для выравнивания достаточно крупных изделий и неровностей. Двухкомпонентные смеси усадкой практически не обладают и высыхают быстрее. К ним относятся

также эпоксидные шпатлевки, представляющие большой интерес при обработке мелких дефектов.

На изображении представлено изделие обработанное сначала грунтовкой, затем однокомпонентной шпатлевкой, отшлифованное и покрашенное (Рисунок 4.18.).



Рисунок 4.18 – Изделие после обработки

Эпоксидные шпатлевки требуют больше времени на подготовку и сохнут дольше, но результат превосходит все ожидания. Все мелкие неровности и впадины сглаживаются. Для работы с этим материалом обязательно используют резиновые перчатки.

Пример изделия, покрытого эпоксидным клеем, грунтовкой и окрашенного (Рисунок 4.19). ХТС 3D — специальный эпоксидный клей предназначен для шпатлевки распечатанных 3D-моделей. Обладает слабым запахом, сохнет от 2 – 4 часов, легко обрабатывается.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

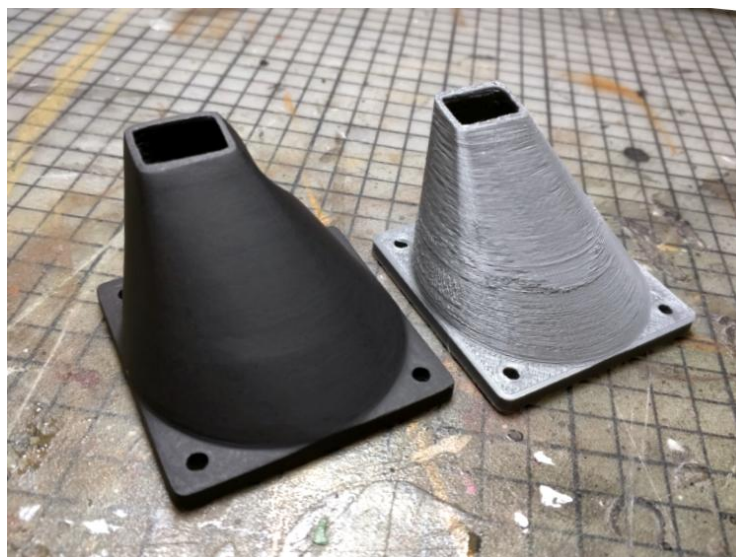


Рисунок 4.19 – Пример покрытия изделия

Для датчика давления будет выполнена химическая обработка.

Для DMLS-технологии чистовая обработка будет заключаться в следующем:

Все детали DMLS должны подвергаться процессу снятия нагрузки до их снятия со строительной платформы во избежание процесса деформации. Циклы снятия нагрузки, проводимые варьируются в зависимости от сплава, но как правило выполняются при температуре 1950°F (1065°C) в течение 1.5 часа. В зависимости от используемого металлического сплава и геометрии детали, снятие нагрузки может выполняться при температуре 1725 – 1850°F (940 – 1010°C) с последующим охлаждением детали. После снятия нагрузки металл возвращается в упругое состояние.

Образование разломов во время эксплуатации DMLS детали предотвращается посредством жесткой термической обработки.

Вторичные методы термообработки, такие как горячее изостатическое прессование (HIP), термообработка с образованием твёрдого раствора (SHT) и дисперсионное упрочнение (PHT) помогут сделать детали износостойкими, наделив их свойствами, аналогичными свойствам металлов, обрабатываемых под давлением. Эти методы, как неоднократно показывала практика, увеличивали плотность деталей до показателей плотности от ~95.5% до 100%.

Помимо упрочняющей обработки детали DMLS могут быть подвергнуты ручной полировке для получения гладкой поверхности и механической доработке для обеспечения соответствия критических допусков. Поверхность детали DMLS после ее изготовления составляет ~8.8 Ra мкм. Очистка стеклянной дробью сгладит поверхность до Ra 2.5-6 мкм, в то время как обработка голтовкой повысит качество поверхностей до Ra 0.8-3.1 мкм. Метод ручной полировки применяется для единичных уникальных деталей, которые требуют исключительного качества поверхности.

Выводы по четвертой главе: на основе исходных данных выполнена оценка квалитетов точности изготовления деталей датчика, времени и количества материалов, необходимых для его изготовления.

Квалитеты для технологии послойного наплавления (FDM) определены в диапазоне от 9 – 14, для технологии лазерного спекания (DMLS) в диапазоне от 9 – 11.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе осуществлен информационный поиск по теме исследования. Произведен расчет надежности датчика давления изготавливаемого с применением 3D-технологий. Разработана 3D-модель датчика давления. Проведены прочностные расчеты в программе SolidWorks. На основе исходных данных выполнена оценка качеств точности изготовления деталей датчика, времени и количества материалов, необходимых для его изготовления. Подготовлена конструкторская документация на два варианта деталей датчика давления, изготавливаемых методом 3D-печати.

Исходя из технологии производства выявлено:

1) Для FDM-технологии производство штуцера чувствительного элемента возможно только при условии 3D-принтера с двумя головками экструдера, либо при изготовлении мембраны отдельно от штуцера.

2) С помощью DMLS-технологии можно изготовить штуцер вместе с мембраной.

По критериям прочности и надежности выявлено, что минимальная толщина мембраны для материала BronzeFill составляет 1,2 мм, а для традиционного материала и Titanium Ti64ELI – 0,1 мм.

Квалитеты для технологии послойного наплавления (FDM) определены в диапазоне от 9 – 14, для технологии лазерного спекания (DMLS) в диапазоне от 9 – 11.

Таблица 4.14 – Итоговая таблица времени изготовления и стоимости материала деталей

Изделие (материал)	Стоимость материалов для печати изделия, руб	Время изготовления, мин
Штуцер вместе с мембраной (ABS)	26	653

Продолжение таблицы 4.14.

Штуцер вместе с мембраной (PLA)	28	708
Штуцер с отдельной мембраной (ABS)	16	427
Штуцер с отдельной мембраной (PLA)	18,3	484

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 3D-принтер MASSPORTALPHARAONXD 30. – <http://top3dshop.ru/kupit-3d-printer/prof/3d-printer-massportal-pharaoh-xd-30.html>.
2. 3D-принтер EOS M 290 (DMLS) общие понятия. – <http://3dtoday.ru/3d-printers/eos/eos-m-290/>.
3. 3D-принтер EOS M 290 (DMLS) технические характеристики. – <http://www.tdno.ru/oborudovanie/dmls-printer-eos-m290>.
4. 3D-принтер HerculesStrong 2017 (FDM) общие сведения. – <http://3dtoday.ru/3d-printers/imprinta/hercules-strong-2017/>.
5. 3D-принтерHerculesStrong 2017 (FDM) технические характеристики. – <http://imprinta.ru/hercules-strong-2017/>.
6. 3D-принтер HerculesStrong 2017 (FDM) технические характеристики. – <http://top3dshop.ru/kupit-3d-printer/hercules-strong-2017.html>.
7. АО Полема. – <http://interplastica.ru/files/13.pdf>.
8. Аскарова, А.Г. Автоматизация газораспределительной станции: дипломный проект. студент/ А.Г. Аскарова. – Уфа, 2015. –109 с.
9. Бирюков, Е. Эволюция датчиков изображения: от ПЗС к КМОП // Компоненты и технологии, 2007. № 10. С. 56 – 59.
10. Виглеб, Г. Датчики. Устройство и применение./Г. Виглеб.–М.:Издв–во Мир, 1989.–191с.
11. Виды 3D-принтеров порошковых. – <http://www.techno-guide.ru/informatsionnye-tekhnologii/3d-tekhnologii/vidy-3d-printerov-i-trekhmernoj-pечати.html>.
12. ГОСТ 14254 – 96 (МЭК 529-89). Межгосударственный стандарт. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (КОД IP). – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 5 с.
13. ГОСТ 15150 – 69. Межгосударственный стандарт. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5).). – М.: Изд – во стандартов, 1971. – 7 с.

14. ГОСТ 27.002 – 89. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Изд - во стандартов, 2002. – 69 с.

15. ГОСТ 27.301 – 95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Расчет надежности. – М.: Изд - во стандартов, 1997. – 20 с.

16. ГОСТ 25346 – 89. Межгосударственный стандарт. Основные норм взаимозаменяемости. – М.: Изд - во стандартов, 1990. – 41 с.

17. ГОСТ 25347 – 82. Межгосударственный стандарт. Единая система допусков и посадок. – М.: Изд - во стандартов, 1983. – 54 с.

18. ГОСТ 11710 – 66. Межгосударственный стандарт. Допуски и посадки деталей из пластмасс. – М.: Изд - во стандартов, 1966. – 11 с.

19. Готра, З.Ю. Датчики: Справочник/З.Ю. Готра, О.И. Чайковский.–Львов: Изд–во Каменяр, 1995.–313 с.

20. Датчик давления Метран-150. – <http://www2.emersonprocess.com/ru-RU/brands/Metran/products/Pressure/transmitters/metran-150/Pages/index.aspx>.

21. Интеллектуальные датчики давления серии Метран–100. – <http://komplektprom.ru/d/202414/d/opisanie-metran-100.pdf>.

22. Карева, Н.Т. Термическая обработка сталей и сплавов: учебное пособие / Н.Т. Карева, И.В. Лапина, С.И. Ильин. – 2–е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.–98с.

23. Компания Imprinta. – <http://3dtool.ru/category/3d-printery/>.

24. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях/ А.Ф. Котюк. – М.:Изд–во Радио и связь, 2006. – 157 с.

25. Михайлова, А. Е.3D-принтер — технология будущего /А.Е. Михайлова, А.Д. Дошина// Молодой ученый. — 2015. — №20. — С. 40-44.

26. Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла / В.М Труханов, А.М. Матвеев; под ред. В.М Труханов. – М.: Спектр, 2012. – 664с.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

27. Официальный сайт промышленной группы Мида. – <http://midaus.com/kontakty.html>
28. Растворение подставок печати. – <http://makerplus.ru/wiki/postobrabotka-modelej-posle-3d-pechati>.
29. Свойства полистирола. – <http://3dtoday.ru/wiki/polystyrol/>.
30. Тензометрический датчик давления МИДА-ДИ-13П(М). – <http://grempis.com.ua/data/doc/mida.pdf>.
31. Титоренко, К.В. Исследование усталости металлов с помощью тензодатчиков / К.В. Титоренко, А.В. Дудко //Альманах. Научный поиск: теория и практика. – 2017. – С. 66 – 69.
32. Токопроводящая нить для 3D- принтеров. – <https://geektimes.ru/post/241888/>.
33. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: учебное пособие / В.И. Феодосьев. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Изд -во "Наука", 1972. – 544с.
34. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов: учебное пособие / В.Г. Фокин. – Самара: Изд - во Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.
35. Фирма Makeraser. – <http://www.3dindustry.ru/article/1452/>.
36. Характеристика HIPS-пластика. – <http://rusabs.ru/blogs/blog/samoe-glavnoe-o-filamente-hips-dlya-3d-pechati>.
37. Характеристика PVA-пластика. – http://3dtoday.ru/wiki/pva_plastic/.
38. Характеристика PLA-пластика. – http://3dtoday.ru/wiki/PLA_plastic/.
39. Характеристика ABS-пластика. – http://3dtoday.ru/wiki/abs_plastic/.
40. Характеристика порошка Titanium. – <http://normin.ru/products/Spherical-titanium-and-titanium-alloys-powders.compressed.pdf>.
41. Экструзионный(FDM) 3D–принтер «Engineer V2». – <http://3dtoday.ru/3d-printers/3dexperts/engineer-v2/>.
42. Энциклопедия 3D-печати. – http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/.
43. BronzeFill. – <http://3dtoday.ru/industry/colorfabb-provodit-beta-testirovanie-pla-bronze-i-bamboofill-novykh-materialov-dlya-pechati.html>.

44. DMLS-технология. – http://3dtoday.ru/wiki/DMLS_print/.
45. EOS TITANIUM. – <http://3dtoday.ru/industry/the-company-eos-announced-the-creation-of-two-new-metal-materials-for-3d-printing.html>.
46. Finishing Touch компании Stratasys. – <https://3dboom.ru/aksessuary/stanciya-ochistki-stratasys-fortus-finishing-touch-smoothing-station.html>.
47. PVA пластик. – http://3dsector.ru/PVA-plastik_365t.html.
48. PVA пластик. – <https://www.ink-market.ru/catalog/list/type/1946.html>.
49. RUBBER .– <https://rec3d.ru/shop/plastik-dlya-3d-printerov/rubber/rubber-plastik-rec-1-75mm-chjornyj>.
50. Sky Tech MagicBox. – <http://top3dshop.ru/aksessuary-dlya-3d-printera/skymaker-magicbox.html>.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Семеренко, Н.О. Разработка датчика давления, изготавливаемого с применением 3D-технологии / Н.О. Семеренко, Д.А. Кацай // Профессорско-преподавательская конференция. Передано в редколлегию сборника научных статей ЮУрГУ в апреле 2018 г.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Кацай, Д.А. Разработка датчика давления, изготавливаемого с применением 3D-технологии / Д.А. Кацай, Н.О. Семеренко // Сборник научных работ 36й Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения. — Москва : Изд-во ЕНО, 2018. — С. 38 – 40.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		85

ПРИЛОЖЕНИЕ В

- 1) Датчик давления. Сборочный чертеж 12.04.01.2018.521.01.00 СБ;
- 2) Колпачок 12.04.01.2018.521.01.01;
- 3) Крышка 12.04.01.2018.521.01.02;
- 4) Корпус 12.04.01.2018.521.01.03;
- 5) Кольцо 12.04.01.2018.521.01.04;
- 6) Штуцер 12.04.01.2018.521.01.05.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

- 1) Датчик давления. Сборочный чертеж 12.04.01.2018.521.02.00 СБ;
- 2) Кольцо 12.04.01.2018.521.02.04;
- 3) Штуцер 12.04.01.2018.521.02.05;
- 4) Мембрана 12.04.01.2018.521.02.06;
- 5) Кольцо для мембраны 12.04.01.2018.521.02.08.

					КЭ – 225.12.04.01.2018.308 – 521. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87