

Всероссийский конкурс учебно-исследовательских работ старшеклассников по
политехническим, естественным, математическим дисциплинам для учащихся
9-11 классов

инженерно-техническое творчество

***Аддитивные технологии и испытания механической
прочности образцов 3D печати***

Бутманов Данил Денисович,
10 класс, МБОУ «Лицей №1», г. Пермь

Баяндин Юрий Витальевич,
Доцент ИМСС Уро РАН, кандидат физико-математических наук

Пермь. 2018

Оглавление

- Введение
- История
- Устройство FDM 3D принтера
 - Кинематика
 - Экструдер
 - Электроника
 - Программное обеспечение
- Практическая часть
 - Печать образцов, возникшие сложности
 - Испытание
 - Анализ полученных данных
- Вывод
- Список используемой литературы

Введение

Аддитивные технологии (AM - Additive Manufacturing – от слова аддитивность – прибавляемый) – представляют собой послойное наращивание и синтез объекта с помощью компьютерных 3d технологий. В этой работе рассматривалась технология послойного направления пластика (FDM, FFF). В экспериментальной части было проведено исследование механической прочности на разрыв двух материалов ABS и PETG. Целью испытаний было узнать не только сами характеристики образцов распечатанных на принтере, но и то, насколько они будут отличаться от заявленных характеристик пластикового литого образца из такого же материала. Выбор ABS и PETG пластиков обусловлен тем, что ABS представлен на отечественном рынке материалов для 3D печати достаточно давно и успел завоевать популярность, а PETG только недавно начал проникать на рынок и его свойства остаются малоизвестными.

История

Предшественниками современных AM - технологий считаются две оригинальные технологии, появившиеся в XIX в. В 1890 г. Джозеф Е. Блантер предложил способ изготовления топографических макетов – трёхмерных карт поверхности местности. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались одна на другую в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой.

Вторая технология – фотоскульптура (Photosculpture) была предложена французом Вильямом де-Мариньяком в 1890 г. Суть её состояла в следующем: вокруг объекта располагали фотокамеры. Вильям использовал 24 камеры с шагом 15 градусов) и производили одномоментное фотографирование на все камеры. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину, в соответствии с профилем текущего контура.

Для уменьшения трудоемкости данного процесса немец Карло Баес в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – экспозиции.

В 1935 г. Исао Мариока предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру. Способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набор контуров. Контуров затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким способом формировался трёхмерный образ объекта. Или же, как и у Вильяма де-Мариньяка, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трёхмерного образа с помощью режущего инструмента.

В начале 1980-х годов американец Чарльз Хилл, работая в компании Ultra Violet Products, занимался разработкой и реализацией концепции трехмерной печати. В 1986 году он получил патент на стереолитографию и основал компанию 3D Systems.

Устройство, которое изобрел Хилл, «выращивало» смоделированный на компьютере 3D-объект из жидкой фотополимеризующейся композиции (ФПК), нанося её слой за слоем на подвижную платформу, погружаемую в ванну с ФПК. Толщина каждого отдельного слоя составляла примерно 0,1–0,2 мм.

Чарльз Хилл является также изобретателем формата STL, который используется всеми ведущими коммерческими CAD-пакетами при экспорте моделей для быстрого прототипирования.

Приблизительно в то же время Скотт Крамп из Stratasys разработал первый в мире FDM-аппарат (FDM — Fused Deposition Modeling – послойная заливка экструдированным расплавом или «печать расплавленным материалом»).

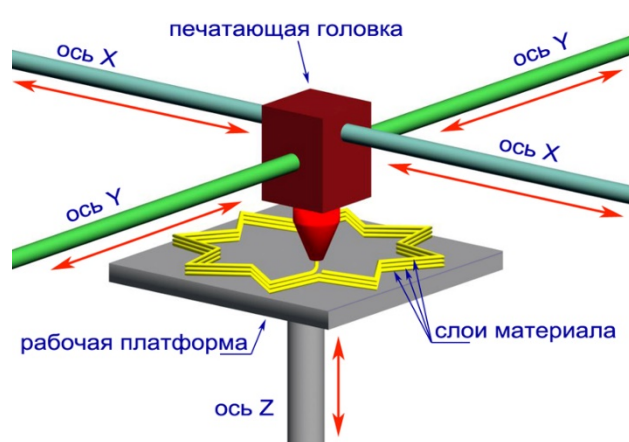
Первоначально обе технологии предназначались для получения моделей и макетов проектируемых изделий. В настоящее же время с помощью 3D-принтеров можно получать уже конечные готовые продукты.

Кинематика

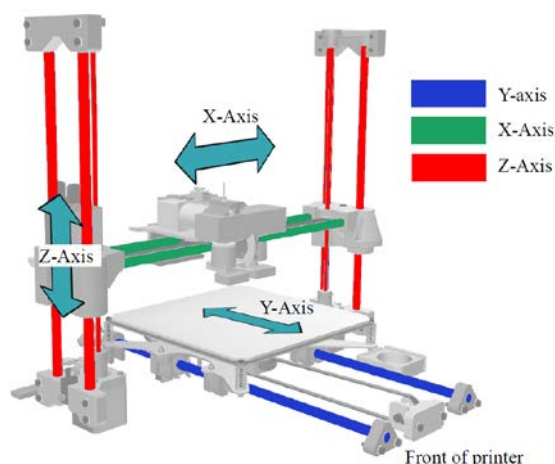
Кинематика всех FDM 3D принтеров выполняет одну функцию - перемещение головы принтера с установленным на ней экструдером относительно платформы по осям X, Y и Z. Для реализации этой задачи существует два основных пути решения:

1. Расположение направляющих, по которым осуществляется перемещение печатающей головки параллельно осям координат, имеет три разновидности:

- a. XY – head, Z-bed – Кинематика подразумевающая свободное перемещение печатающей головки в горизонтальной плоскости и платформы, на которую ложится распечатанная модель в вертикальной плоскости. Примером такой кинематики может служить принтер, используемый в этой работе - «Flying bear p902».



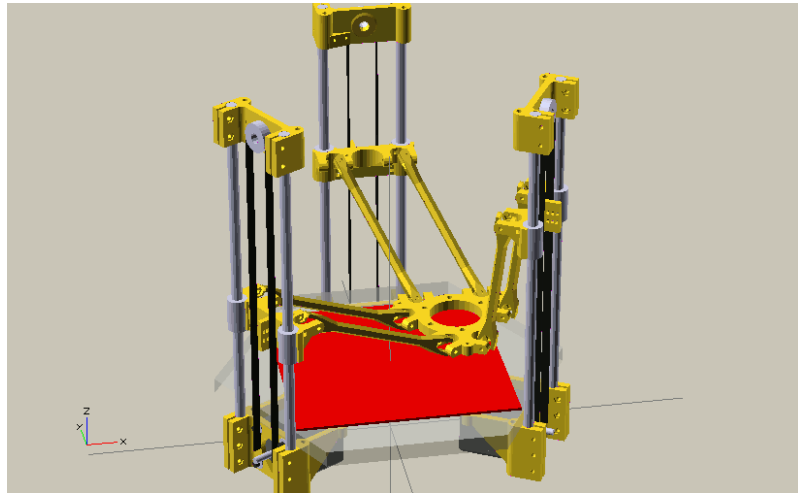
- b. XZ – head, Y – bed – Несколько более простая в исполнении и дешёвая кинематика. Имеет существенный недостаток в виде невозможности высокоскоростной (скорость перемещения головки более 60 мм/с) печати в виду больших ускорений, испытываемых моделью. Это ведет к увеличению вероятности отрыва моделей от платформы в процессе печати и невозможности печати тонких высоких моделей потому, что еще пластичная после печати модель от ускорений будет испытывать деформации, что неизбежно поведет за собой смещение слоев относительно друг друга. Примером такой кинематики могут служить принтеры марки «Prusha».



- с. Другие, более редкие, комбинации этих двух кинематик. Применяются не часто в связи с их не испытанностью и конструктивной сложностью.

2.

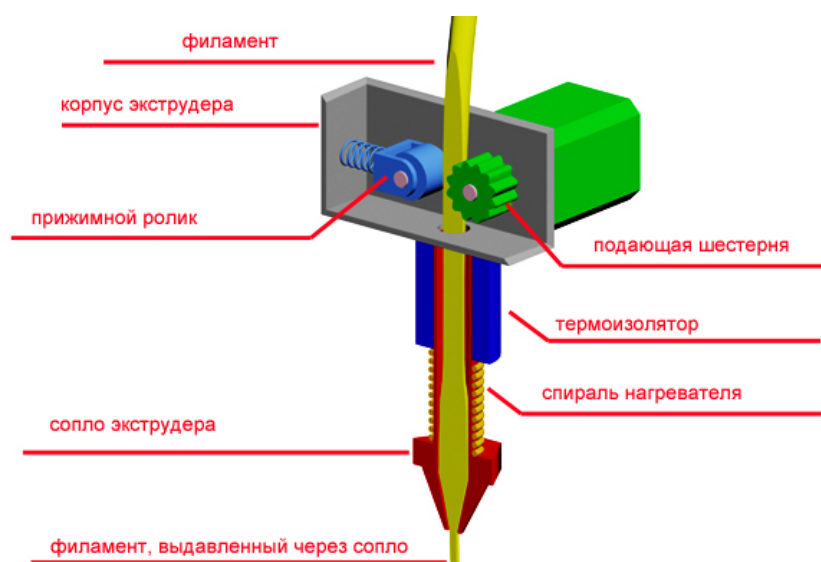
Дельта – кинематика, состоящая из трех вертикальных направляющих и подвешенной на шаровых соединениях голове. Хорошо подходит для печати узких и высоких моделей в связи с совершенно не подвижной платформой и высоко плавностью хода, но обладают меньшей скоростью печати и более требовательны к качеству комплектующих и точности сборки. А так же требует максимального облегчения головки принтера.



Экструдер

Экструдер (от лат. extrudo — выталкиваю) машина для размягчения (пластикации) материалов и придания им формы путем продавливания через профилирующий инструмент (т. н. экструзионную головку), сечение которого соответствует конфигурации изделия.

Общая модель экструдера для 3D принтера выглядит следующим образом: на вход экструдера подается пластиковая нить круглого сечения и стандартного диаметром 1.75 или 3 мм (пластиковый филамент). Далее шаговый двигатель с помощью подающей шестерни проталкивает пластик в нагревательный элемент, откуда расплав выходит линией примерно равной диаметру сопла. Чтобы пластик быстрее отвердел на выходе, из сопла его обдувают интенсивным потоком воздуха. Также необходим прижим пластика к шестерне, что осуществляется специальным механизмом.



На сегодняшний момент можно выделить два основных типа экструдеров – это директ и боуден. *Боуден* характерен тем, что весь проталкивающий механизм крепится на корпусе и подает пластик через трубку к нагревательному блоку, установленному на головке принтера. Это дает выигрыш в массе головки, что позволяет ускорить печать (вследствие уменьшения инерции головки) и снизить нагрузку на моторы, но создает дополнительные сложности в точном дозировании пластика, а также печати мягкими видами пластика. На принтерах с кинематикой дельта, боуден – стандартное решение. *Директ* экструдер является цельным блоком, установленным на головке принтера. Он позволяет печатать большим спектром материалов, но сильно утяжеляет головку принтера.

Также экструдеры бывают с редуктором и с прямой передачей. Дело в том, что шаговый двигатель на крайне малых оборотах необходимых в экструдере имеет низкий крутящий момент. Для того чтобы избежать пропуска шагов двигателем, а следовательно, недоэкструзии, на принтер устанавливают редуктор.

Электроника

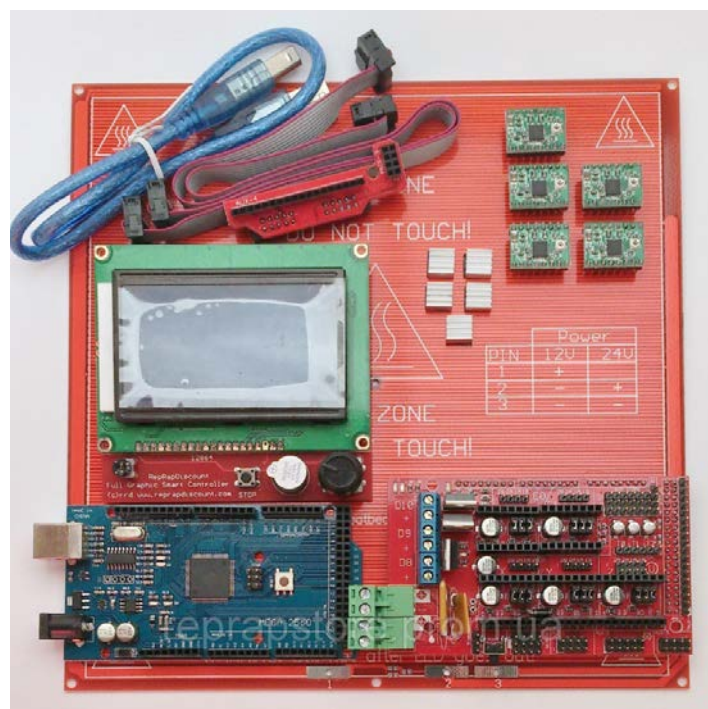
Электроника внутри принтера должна выполнять следующие функции:

- Чтение команд (поступают от ПК или с SD карты);
- Вычисление необходимых перемещений для выполнения команд;
- Управление нагревателями экструдера и стола;
- Управление двигателями;
- Взаимодействие с оператором.

Чаще всего в настольных принтерах применяют схемы, основанные на Ардуино Мега с процессором ATmega2560 и RAMPS - платой расширения для нее, а также несколькими драйверами управления шаговыми двигателями которые RAMPS и коммутирует. Дополнительно с этим идет модуль экрана с управляющим интерфейсом. Так же многие фирмы разрабатывают собственные платы под свои 3D принтеры, их решения бывают самыми разными - начиная от простого переноса всей схемы с Ардуино на одну плату для удобства монтажа и заканчивая разработкой новой системы на мощном иногда даже 32-битном процессоре. Такие мощности необходимы принтерам с кинематикой Дельта, поскольку для расчета требуются большие ресурсы. Когда же в слишком бюджетных Дельта-принтерах ставят Ардуино, при определенной скорости печати могут возникать простои головки на одном месте, отчего на модели появляются артефакты.

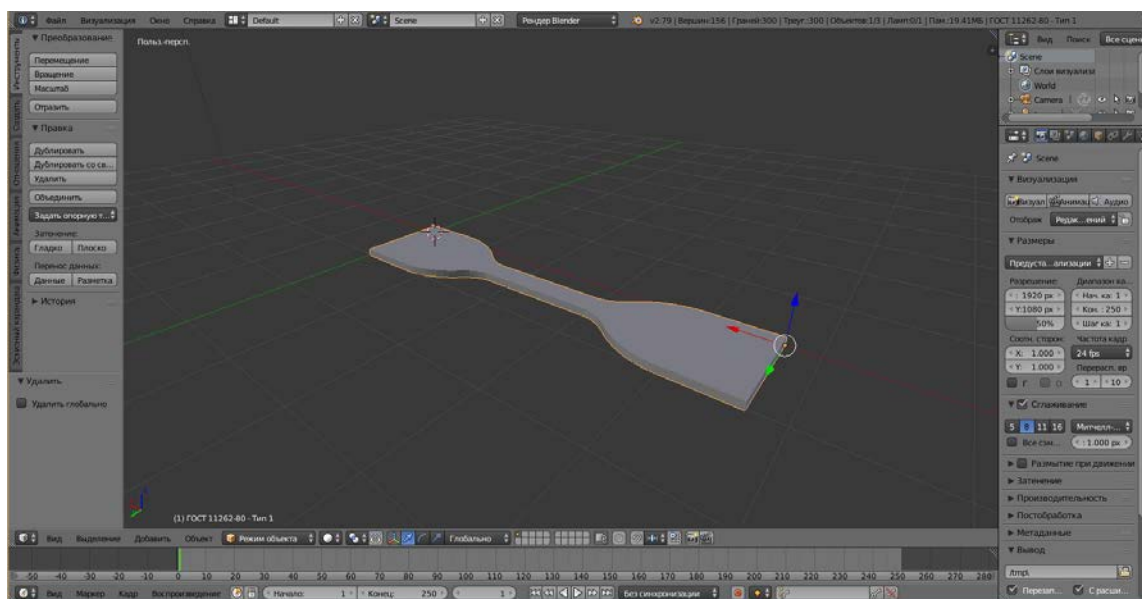
Нагревательная платформа.

Так же для того, чтобы пластик надежно фиксировался на платформе, повышают его адгезию к платформе. Делают это нанесением перфорированного покрытия на стол, сбрызгивания лаком и повышения его температуры. К тому же подогрев стола помогает уменьшить эффект температурной усадки пластика, что не дает углам модели загнуться и оторваться от стола.



Программное обеспечение

Процесс 3D печати начинается с создания 3D модели. Для этой цели существует огромное множество программ, но я буду показывать на примере бесплатной программы Blender3d. Для примера я возьму проект по изготовлению образцов для испытаний. Ниже представлен скриншот 3D модели.



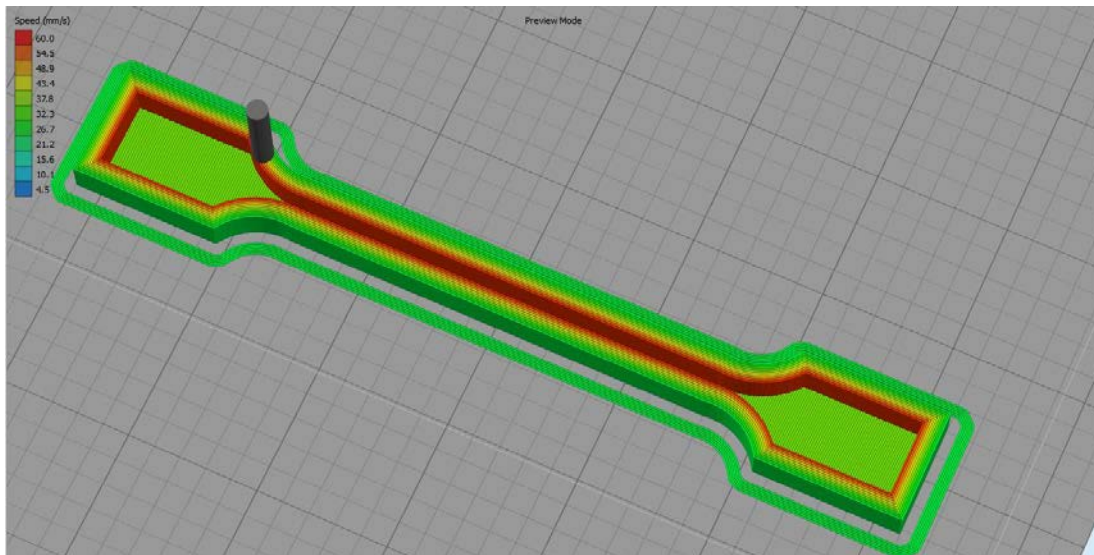
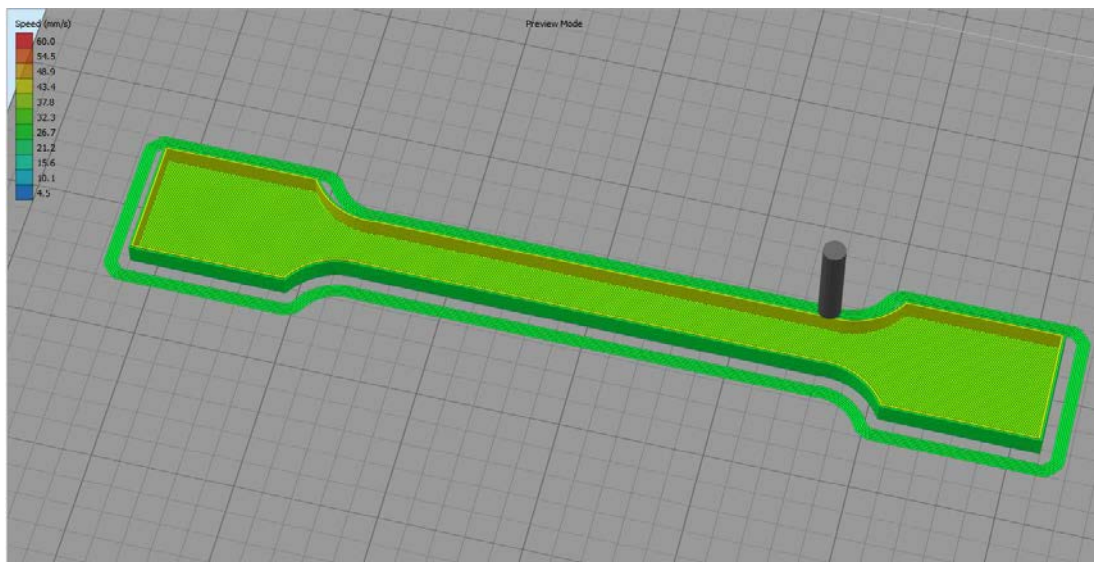
Следующий этап - это слайсинг модели, то есть нарезание её на слои и составление команд для 3D принтера. Так же на этом этапе задаются все настройки печати в том числе: температура экструдера, температура стола, ширина одной нити вышедшей из сопла, коэффициент заполнения, количество периметров и многое др. На этом этапе много тонкостей, но лучше всего будет рассказать о коэффициенте заполнения и количестве периметров.

3D принтер может печатать как цельные детали, так и облегченные: с полостями и перегородками внутри и внешней стенки, ширина которой кратна ширине одной нити пластика, вышедшей из экструдера.

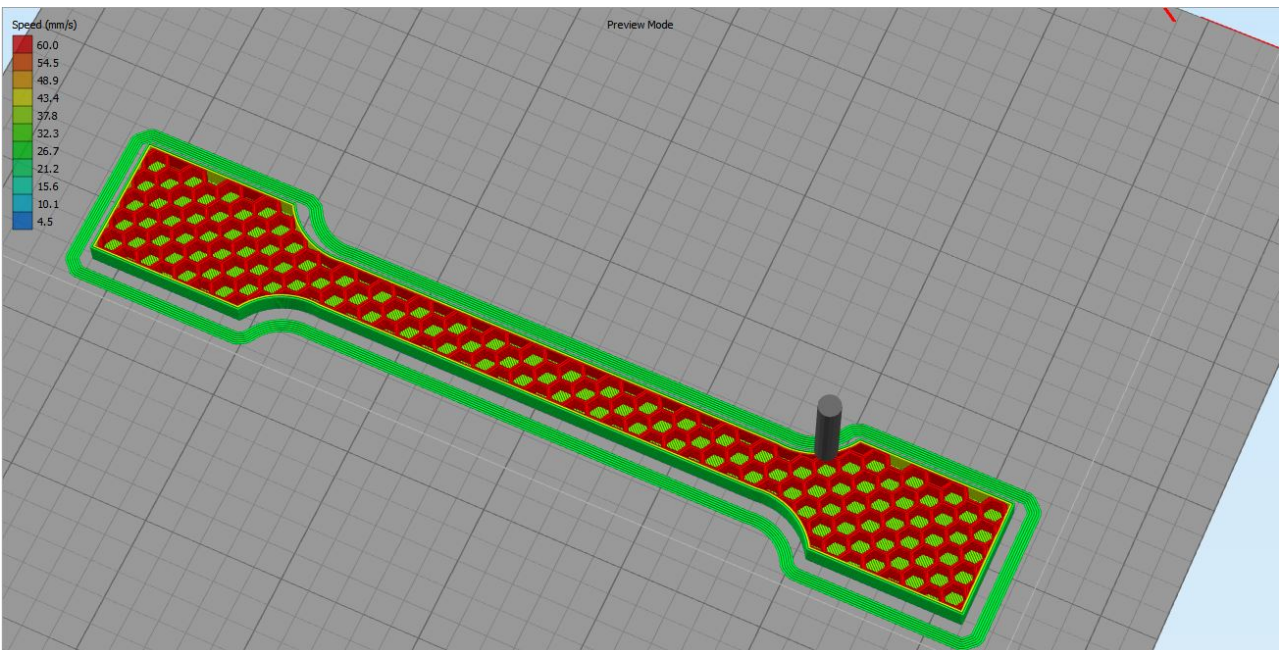
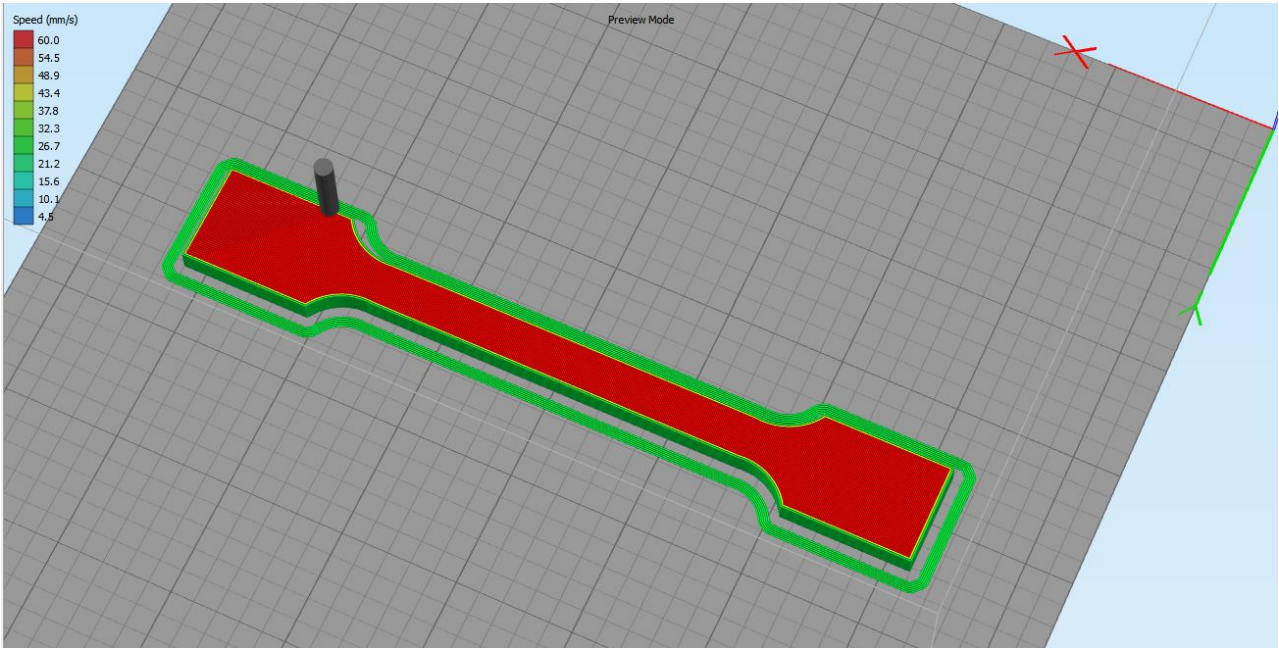
Количество периметров – этот параметр характеризует ширину стенки, итоговая ширина вычисляется по формуле

«ширина экструзии» * «кол-во периметров» = «ширина стенки».

Ниже представлена иллюстрация на примере увеличенного в 2 раза образца с двумя и десятью периметрами.



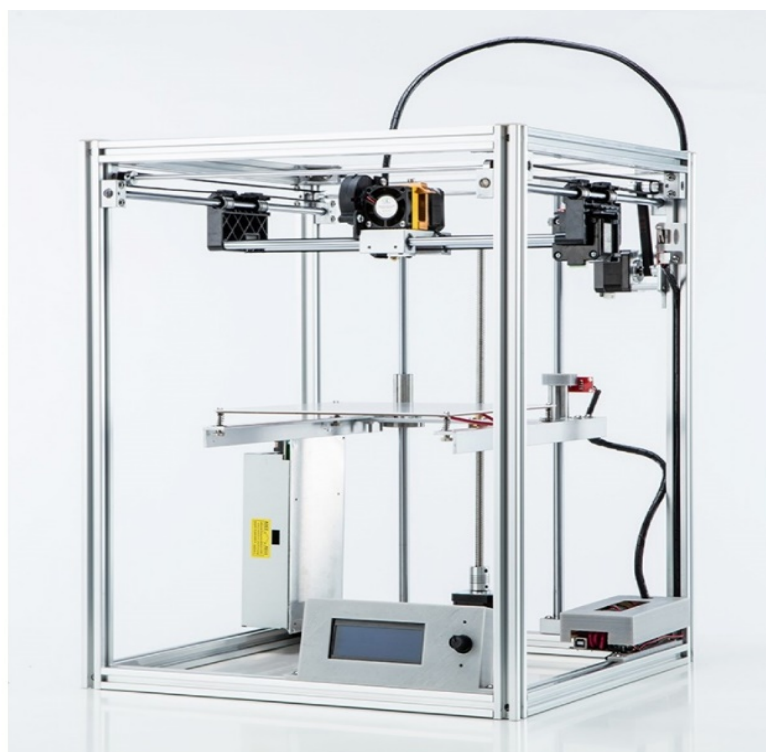
Коэффициент заполнения характеризует то, насколько много перегородок будет между стенками. 100% - цельная деталь, 0% - только оболочка. Ниже представлены скриншоты моделей деталей с заполнением 25% и 100%. 0% процентов вы можете наблюдать на иллюстрации выше. Форма заполнения - правильный шестиугольник.



Образцы на испытания были выполнены соплом 0.3 мм с 3 периметрами и 100% заполнением.

Практическая часть

В этой работе применялся 3D принтер модели «Flying bear p902» самостоятельной сборки. Он имеет кинематику XY – head, Z – bed, экструдер без редуктора и электронику на основе Ардуино. Каркас принтера выполнен в виде куба из специального алюминиевого профиля. Для перемещения печатающей головки по осям применены полированные валы и подшипники качения. Стол движется по вертикали с помощью трапецеидального винта.



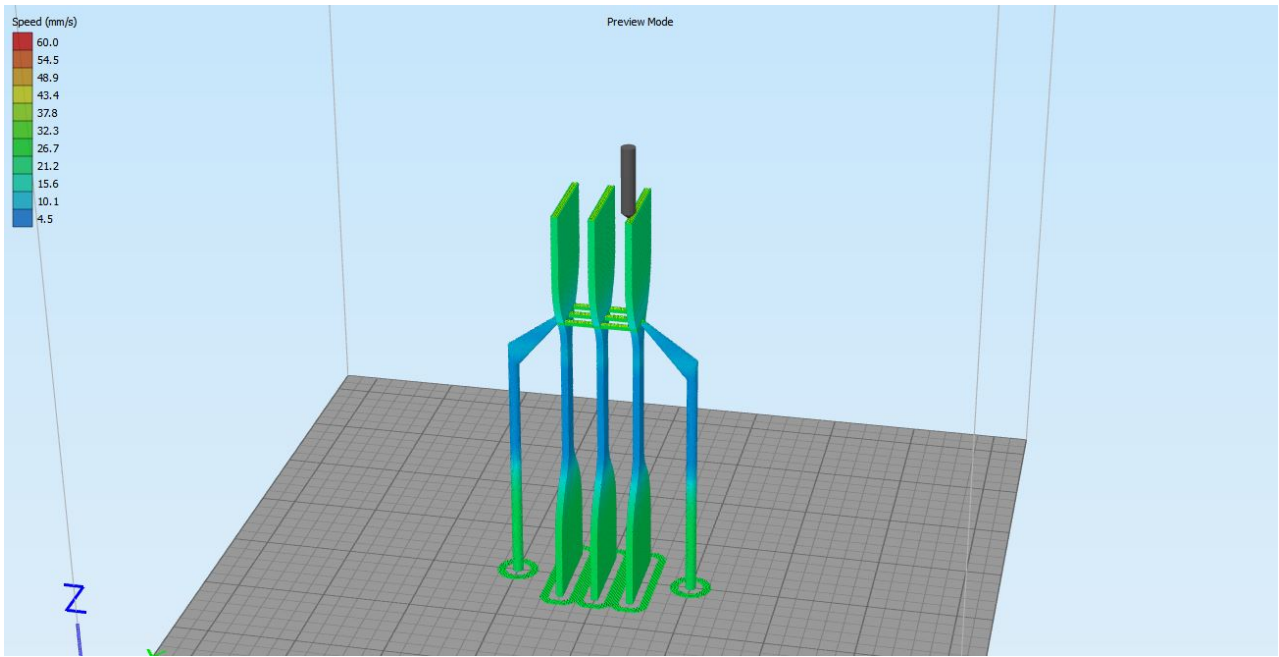
Печать образцов и возникшие сложности

Чертеж для модели образца был взят из «ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение» образец 1-ого типа.

Образцы для испытаний были выполнены соплом 0.4 мм с 2 периметрами и 100% заполнением.

Образцы печатались в двух направлениях. Половина параллельно плоскости платформы, горизонтально. В процессе печати таких образцов не возникло никаких сложностей. Другая половина печаталась перпендикулярно плоскости платформы, вертикально. В процессе печати этих образцов возникала проблема – настолько высокий и тонкий образец не успевал до конца остыть, оставался пластичен и испытывал деформации даже от движения по нему сопла, что вело за собой смещение слоев относительно друг друга.

Но, после сборки трех образцов в один пакет соединённый между собой с дополнительными поддержками по бокам, этот эффект был почти полностью исключен.



Модель вертикального расположение образцов на рабочем столе 3D принтера с поддержкой.

Испытания

Испытания проводились в Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, под руководством научного руководителя Баяндина Юрия Витальевича, на Гидравлическая испытательная машина BIS-100.

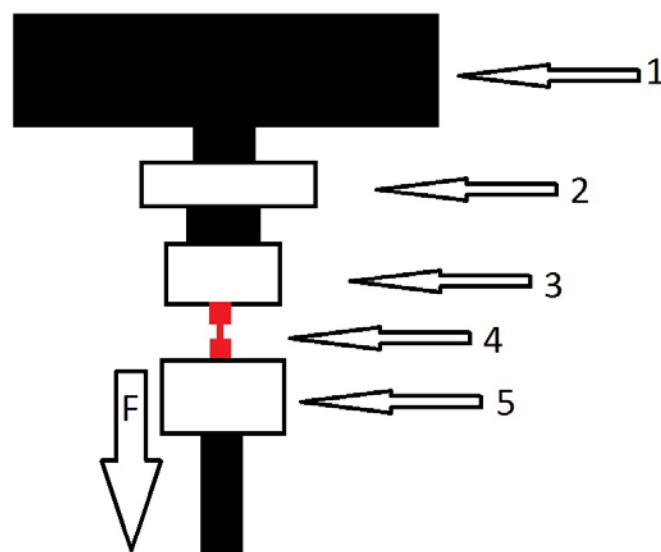
Схема испытаний

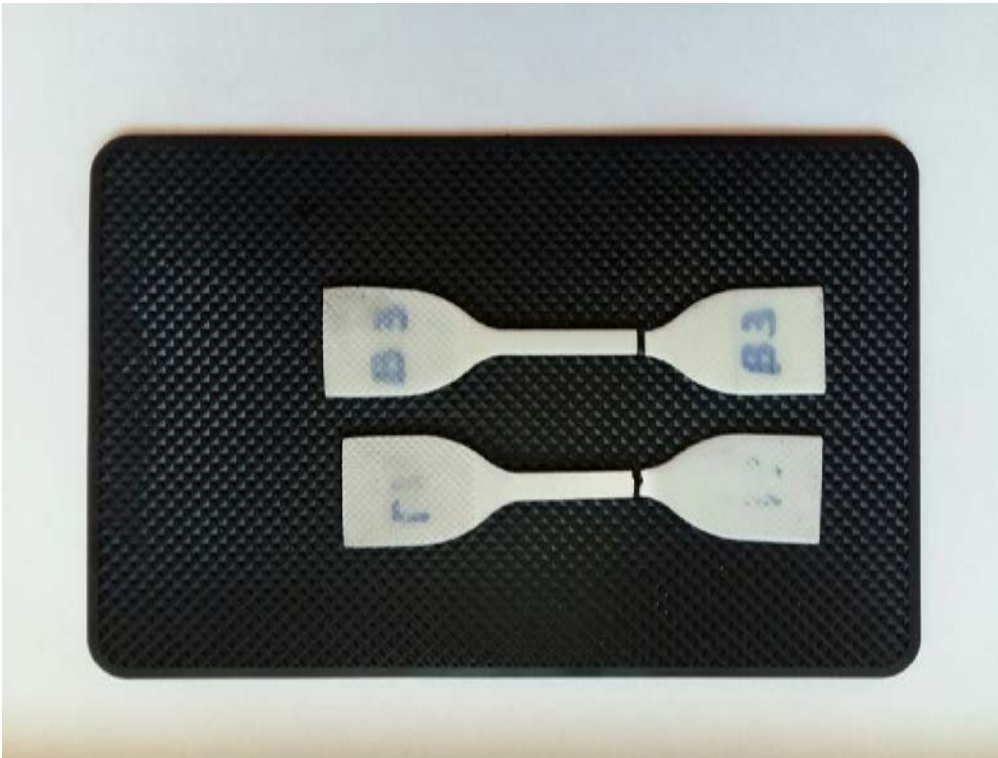
Сначала производили измерение реальных размеров образца, чтобы учесть неточности, возникшие при печати во время вычисления нагрузки. После зажатия образца, производилось растягивание с постоянной скоростью 0,3 мм/с. Испытания останавливались в момент разрыва заготовки. Показания динамометра записывались компьютером для дальнейшего построения графиков.



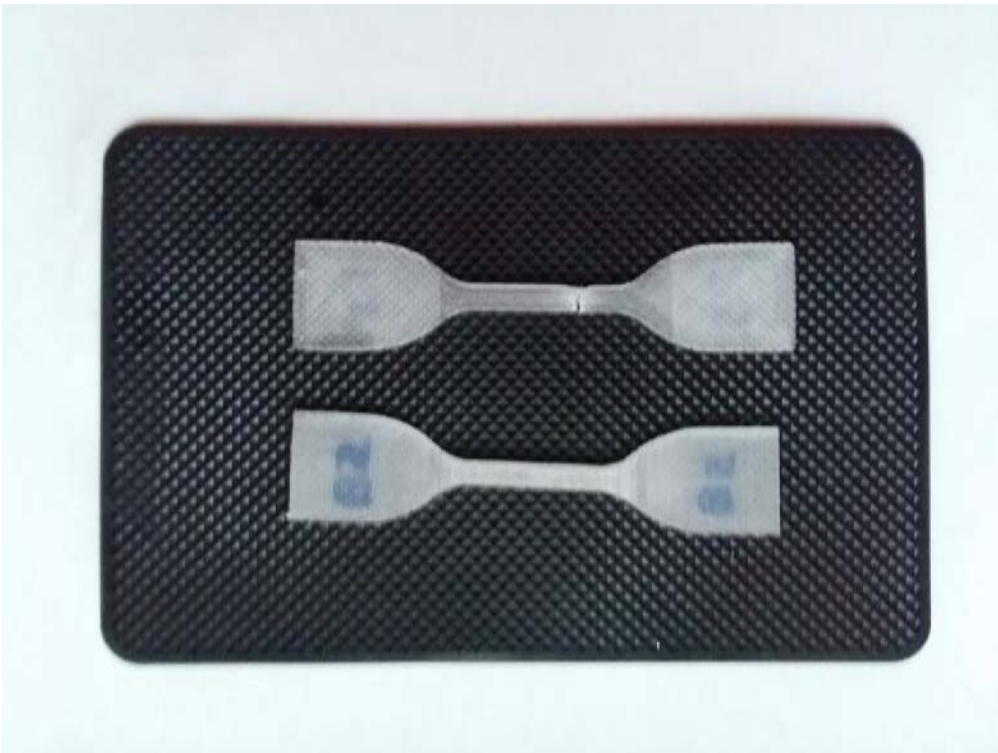
Схема установки

- 1 – Неподвижная станина
- 2 – Динамометр
- 3 – Неподвижный захват
- 4 – Образец
- 5 – Подвижный захват с поршнем





Образцы из ABS пластика после испытаний

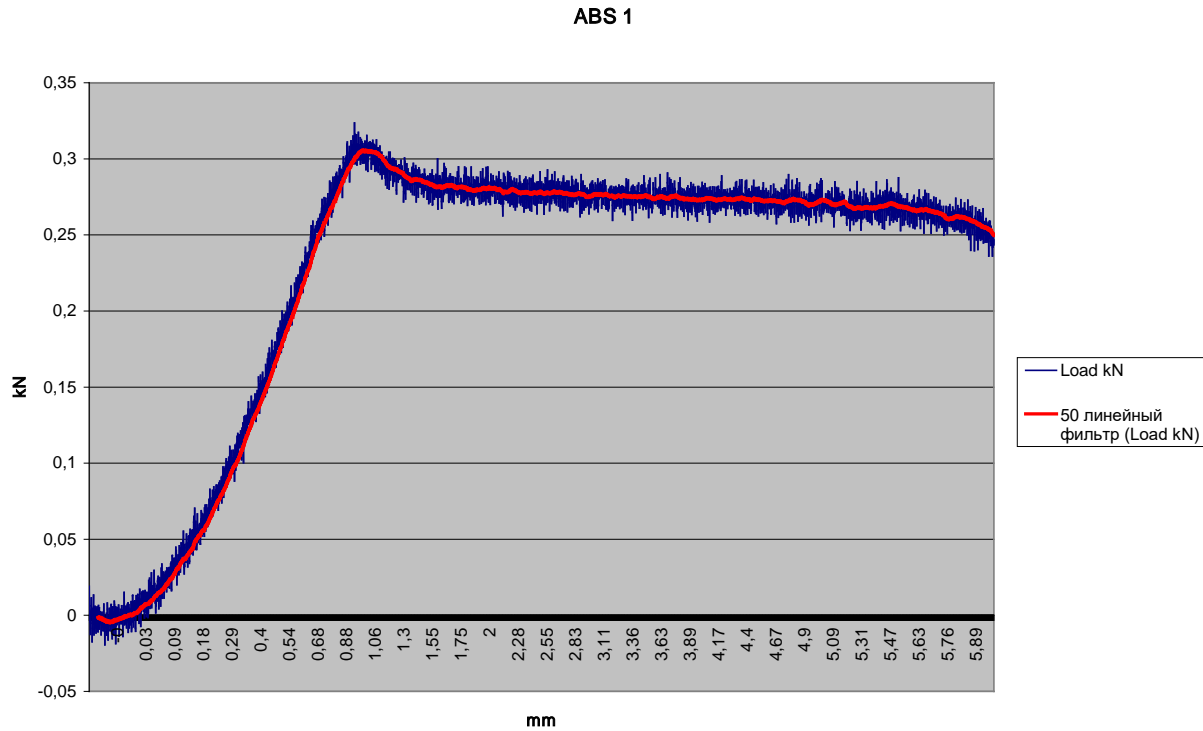


Образцы из PETG пластика после испытаний

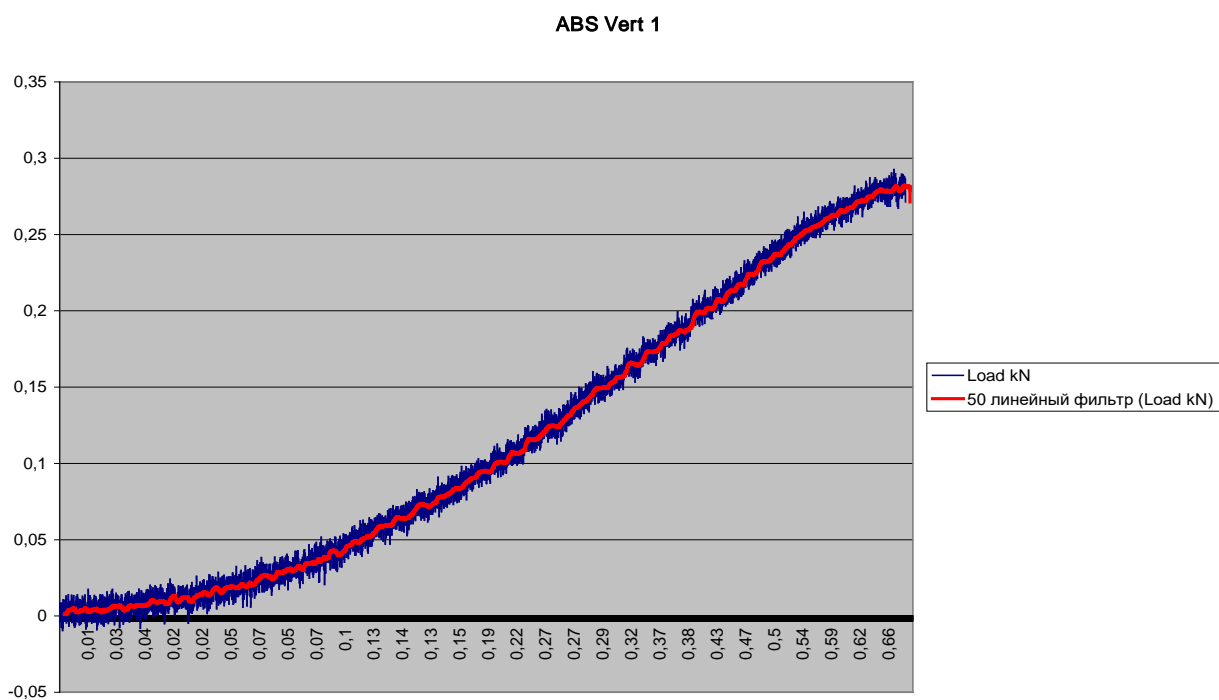
Анализ полученных данных

На основе полученных в процессе испытаний данных были составлены графики следующих видов:

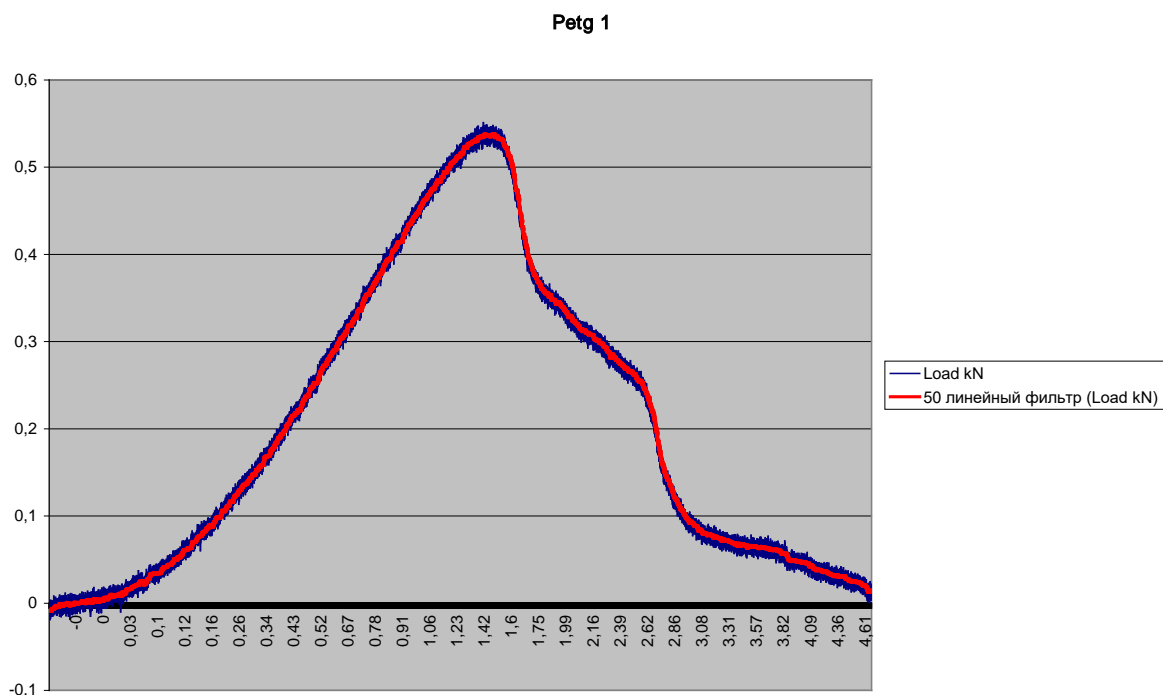
Для горизонтального ABS:



Для вертикального
ABS:



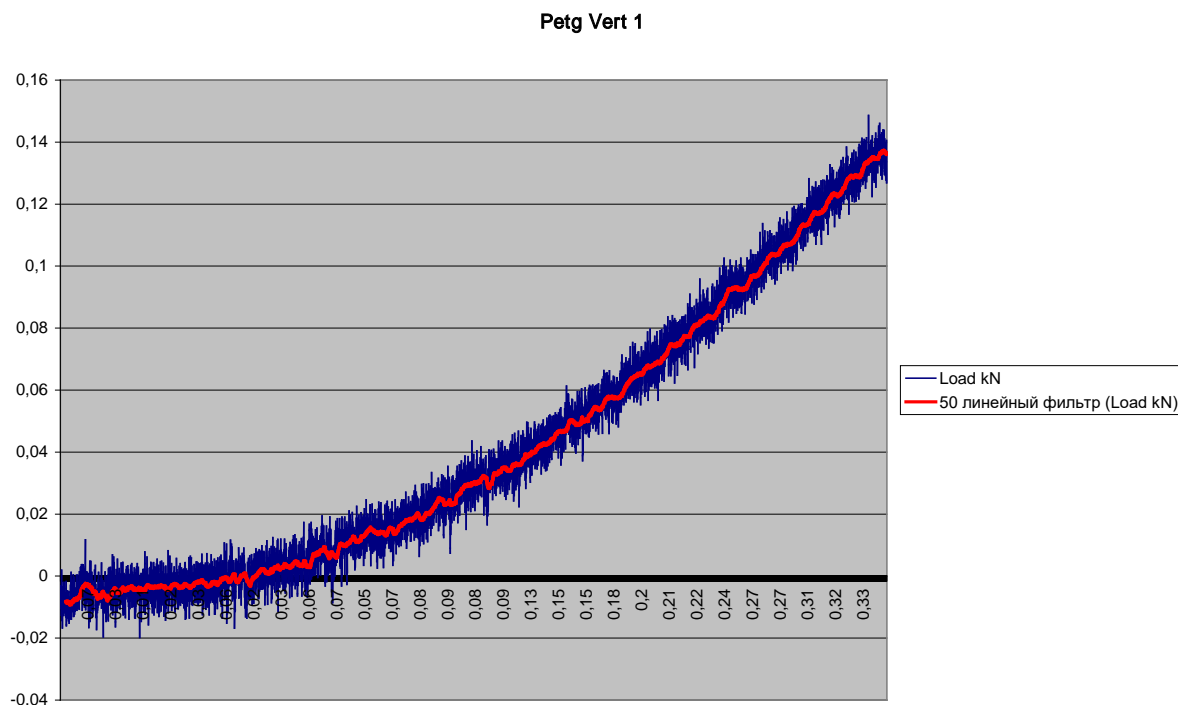
Для горизонтального



PETG:

Для вертикального

PETG:



На приведённых графиках ось x – нагрузка в kN, ось X - удлинение в мм. Синяя линия - зашумленные данные с динамометра растягивающей машины, красная - их усреднение.

Из указанных графиков была рассчитана итоговая таблица:

Экспе- римент	Fmax, kN	d, мм	h, мм	s мм ²	σ, МПа	L нач., мм	Δ L, мм	ε, мм	E	E среднее ариф- метическое	E стандарт- ное отклоне- ние
A1	0,3	6,4	1,6	10,24	29,30	25	0,98	0,0392	747,37		
A2	0,37	6,2	2	12,4	29,84	25	1	0,04	745,97	761,60	25,86544
A3	0,36	6,3	1,9	11,97	30,08	25	0,95	0,038	791,45		
AV1	0,28	6	2,5	15	18,67	25	0,7	0,028	666,67		
AV2	0,25	6	2,2	13,2	18,94	25	0,6	0,024	789,14	749,03	71,3353
AV3	0,2	5,9	2,1	12,39	16,14	25	0,51	0,0204	791,28		
P1	0,54	6,2	1,9	11,78	45,84	25	1,4	0,056	818,58		
P2	0,54	6,2	1,9	11,78	45,84	25	1,4	0,056	818,58	805,10	23,3386
P3	0,55	6,2	1,9	11,78	46,69	25	1,5	0,06	778,16		
PV1	0,14	5,9	2	11,8	11,86	25	0,38	0,0152	780,55		
PV2	0,13	5,9	2,1	12,39	10,49	25	0,36	0,0144	728,63	671,21	146,7413
PV3	0,055	5,9	2,2	12,98	4,24	25	0,21	0,0084	504,44		

Где F max – максимальная зарегистрированная усредненная сила(kN),

d и h ширина и высота рабочей части(мм),

s – площадь сечения рабочей части заготовки (мм²),

σ – механическое напряжение (МПа),

L нач - начальная расчетная длина (мм),

Δ L - удлинение при F max (мм),

ε - относительное удлинение (мм),

E – модуль упругости,

E среднее арифметическое – среднее арифметическое всех трех результатов,

E стандартное отклонение – стандартное отклонение по выборке из всех результатов.

Тесты были пронумерованы по системе:

A – ABS пластик, P – PETG пластик, V – вертикальное расположение при печати образца, 1/2/3 – номер эксперимента.

Например:

A1 – ABS первый тест,

AV2 – ABS вертикальное расположение второй тест,

P3 – PETG третий тест,

PV1 - PETG вертикальное расположение первый тест.

Из графиков и таблицы мы можем заключить следующие:

- У вертикально напечатанных образцов предел текучести куда ниже, чем у горизонтально напечатанных образцов. У образца из ABS пластика, расположенного при печати горизонтально, - 29,74 МПа, у образца из ABS пластика, расположенного при печати вертикально, - 17,92 МПа. У PETG - 46,12 МПа, против 8,86 МПа.
- ABS имеет лучшую межслойную адгезию, поскольку средний предел текучести у образца из ABS пластика, расположенного при печати вертикально равен 17,92 МПа, а у PETG - 8,86 МПа.
- Горизонтально напечатанные образцы из PETG пластика имеют больший предел текучести (46,12 МПа) и модуль упругости (805,10), чем из ABS пластика (29,74 МПа и 761,60)
- У PETG наблюдается следующее течение разрыва: сначала по мере удлинения начинает образовываться шейка, после разрывается заполнение, потом рвутся периметры. ABS же растягивается равномерно, по мере растяжения приобретая более белый цвет и рвется резко.

Стандартные значения прочности на разрыв для литых пластиков данного вида следующие:

ABS: Предел текучести при растяжении (23 C): 34 – 52 МПа

Модуль упругости при растяжении (23 C): 1700 – 2930.

PETG: Предел текучести при растяжении (23 C): 45 - 50 МПа

Модуль упругости при растяжении (23 C): 2000 - 2800 МПа

Как видно из таблиц предел текучести при горизонтальной 3D печати изменяется слабо, а вот модуль упругости уменьшается в несколько раз. При вертикальном расположении модели очень сильно страдают все характеристики пластика.

Вывод

На основе экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что 3D печатные образцы менее прочные, чем пластик, из которого они состоят, и в особенности это касается спекаемости вертикальных слоев. Это дает понимание того, что наряду с поиском более прочных видов пластика, подходящих для 3D печати, необходимо также искать пути укрепления деталей, сделанных на 3D принтерах, стремясь к достижению параметров пластика, из которого состоит распечатка. При этом распечатки из Petg пластик оказался более прочным на разрыв и обладающим большим модулем упругости, что подтверждает перспективность этого материала в 3D печати. Так же, в процессе испытаний было выявлено, что при направлении нагрузки вдоль слоев, после достижения предела текучести, оба пластика начинают тянуться, а при нагрузке поперек слоев - максимальная нагрузка сильно не достает до результатов горизонтальной распечатки. При этом текучесть пластика не наступает, и это является причиной повышенной хрупкости изделий 3D печати по слоям.

Но, несмотря на все недостатки, 3D печати она продолжает оставаться очень перспективной технологией в таких областях как: быстрое прототипирование (построение прототипов заводских изделий), архитектура, дизайн, изготовление мастермоделей для литья, изготовление изделий со сложной внутренней структурой и т.д.

Список используемой литературы:

- «Справочник по литьевым термопластичным материалам» И.А. Барвинский, И.Е. Барвинская
- «ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ, НАПЕЧАТАННЫХ С ПОМОЩЬЮ FDM ТЕХНОЛОГИИ» Александра Егоровна Иванова, Сергей Сергеевич Колмаков, Борис Георгиевич Скуйбин, Иван Александрович Лаптев
- «АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» В.С. Антонова, И.И. Осовская
- «Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies» David Ian Wimpenny Pulak M. Pandey L. Jyothish Kumar Editors
- «FULL RESEARCH ARTICLE Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material» Mst Faujiya Afrose, S. H. Masood Pio Iovenitti Mostafa Nikzad Igor Sbarski
- «ESTIMATING THE UNCERTAINTY OF TENSILE STRENGTH MEASUREMENT FOR A PHOTOCURED MATERIAL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING» Stanisław Adamczak, Jerzy Bochnia, Bożena Kaczmarska
- «Experimental and theoretical investigation of prestressed natural fiber-reinforced polylactic acid (PLA) composite materials» Sean A. Hinchcliffe, Kristen M. Hess, Wil V. Srubar III