

УДК 621.98:004.94

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ 3D-ПЕЧАТИ: ОПТИМИЗАЦИЯ
ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОЧНЫХ И ЛЕГКИХ ИЗДЕЛИЙ В
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ****Николаев Сергей Викторович,**Старший преподаватель кафедры физики, биологии и инженерных технологий филиала
МАУ в г. Апатиты
qwerty-1990@yandex.ru**Николаева Елена Владимировна,**Специалист по учебно-методической работе ОКСиСО
филиала МАУ в г. Апатиты
89537562801@yandex.ru**Аннотация**

В статье рассматриваются технологические аспекты 3D-печати, влияющие на прочность и вес изделий, с акцентом на образовательное применение для обучающихся. Приведены результаты анализа ключевых параметров печати (ориентация слоев, плотность и тип заполнения, количество периметров, температура, толщина слоя, ширина линий) и их влияния на механические характеристики объектов. Описана методика проведения практических экспериментов с проектированием, печатью и испытанием тестовых образцов, позволяющая сформировать у обучающихся навыки оптимизации конструкций. Сформулированы рекомендации по выбору параметров печати для достижения баланса между прочностью, весом и экономичностью изделия.

Ключевые слова: 3D-печать, FDM, параметры печати, прочность изделий, образовательные технологии, оптимизация конструкции, аддитивные технологии.

**TECHNOLOGICAL ASPECTS OF 3D PRINTING: OPTIMIZING
PARAMETERS TO CREATE STRONG AND LIGHTWEIGHT PRODUCTS IN
THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT****Sergey V. Nikolaev,**Senior lecturer of the Department of Physics, Biology and Engineering Technologies Murmansk
Arctic University, Apatity Branch
qwerty-1990@yandex.ru**Elena V. Nikolaeva,**Specialist in educational and methodological work of OKSiSO Murmansk Arctic University,
Apatity Branch
89537562801@yandex.ru

ABSTRACT

The article examines technological aspects of 3D printing affecting the strength and weight of products, with a focus on educational applications for learners. The study analyzes key printing parameters (layer orientation, infill density and pattern, number of perimeters, temperature, layer height, line width) and their impact on the mechanical properties of objects. A methodology for conducting practical experiments involving the design, printing, and testing of sample parts is presented, enabling learners to develop skills in optimizing structures. Recommendations are provided for selecting printing parameters to achieve a balance between strength, weight, and cost efficiency.

Keywords: 3D printing, FDM, printing parameters, product strength, educational technologies, design optimization, additive manufacturing.

3D-печать, или аддитивное производство, является одной из наиболее перспективных технологий современности, применяемой в промышленности, медицине, архитектуре и образовании. Одной из ключевых задач при использовании данной технологии является обеспечение высокой прочности и долговечности изделий при минимальном весе и оптимальном расходе материалов.

Для обучающихся, осваивающих инженерное проектирование, важно не только понимать принципы работы оборудования, но и уметь подбирать параметры печати в зависимости от эксплуатационных требований к изделию. Оптимизация технологических параметров позволяет достигать баланса между прочностью, весом, качеством и экономичностью, что является актуальной задачей как в учебных, так и в профессиональных проектах.

Целью исследования является определение оптимальных параметров FDM-печати для создания прочных и легких изделий, а также разработка методики, позволяющей использовать данную технологию в образовательной среде.

В ходе работы были проанализированы различные публикации, в том числе статья Y. AbouelNour и др. (2024) [1] о прочностных испытаниях образцов, напечатанных по стандарту ASTM D638 с встроенными внутренними геометрическими элементами. В ней представлена методика создания искусственных дефектов в моделях с помощью модификации G-кода, их изготовление на FFF-принтере из PLA, а также результаты испытаний на разрыв с построением диаграмм напряжение-деформация и расчетом предела прочности при растяжении. Авторы показали, что увеличение количества внутренних дефектов приводит к закономерному снижению прочности и деформационной способности образцов. Полученные данные могут служить эталонной базой для исследователей, оценивающих влияние дефектов на механические свойства изделий, изготовленных аддитивными методами.

Также была проанализирована статья Ghaznavi Youvalari et al. (2025) [2], посвящённая экспериментальному исследованию механических свойств полимерных образцов (PLA, ABS, эпоксидной смолы), изготовленных методом 3D-печати. В работе проведены комплексные испытания на растяжение, ударную вязкость (тест Изода) и усталостную прочность (ротационный изгиб). Результаты выявили ряд ключевых закономерностей:

PLA продемонстрировал аномально высокую усталостную долговечность (42 160 циклов при 28 МПа), несмотря на хрупкое разрушение при статическом растяжении. Авторы объясняют это двумя факторами: низким уровнем приложенных напряжений (42%

от предела прочности) и локальным нагревом материала в зоне циклической деформации, снижающим хрупкость.

ABS подтвердил превосходную ударную вязкость (18.2 кДж/м²) благодаря эластичным сегментам бутадиена в структуре, но показал умеренную усталостную прочность (7 096 циклов).

В качестве основной технологии выбрана FDM-печать ввиду доступности, простоты эксплуатации и широкого применения в образовательных лабораториях. Для экспериментов использовались 3D-принтеры Raise 3D N2 Duo и Flying Bear Reborn, работающие с пластиками PLA и PETG.

Выбор материала для 3D-печати напрямую влияет на прочность, гибкость, термостойкость, вес и стоимость изделия, а также на сложность процесса печати. PLA популярен для декоративных изделий и прототипов благодаря простоте печати и доступности, тогда как ABS и PETG подходят для функциональных деталей, выдерживающих механические и температурные нагрузки. ABS требует более высоких температур и тщательной подготовки, PLA — минимальных настроек, а PETG сочетает прочность, гибкость и простоту работы. Экономически целесообразно выбирать PLA и PETG для большинства задач, прибегая к более дорогим материалам (нейлон, композиты) лишь при необходимости особых эксплуатационных свойств [3].

Методика исследования включала:

Теоретический анализ технологий, материалов и программного обеспечения.

Экспериментальное определение влияния параметров печати на прочность и вес изделий.

Сравнительное тестирование образцов с разными параметрами.

Как ключевые параметры печати, в работе рассматривались восемь основных факторов:

1. Ориентация слоев (учет анизотропии);
2. Плотность заполнения;
3. Тип (паттерн) заполнения;
4. Количество периметров (оболочек);
5. Температура печати;
6. Толщина слоя;
7. Ширина линий;
8. Охлаждение.

Тестовые образцы проектировались в CAD-системе Fusion 360 в соответствии со стандартами для испытаний на растяжение и на сжатие. Максимальная прочность при сжатии достигается при горизонтальной ориентации слоев. Для частично заполненных моделей ключевыми факторами являются не только ориентация слоев, но и структура заполнения [4]. Экспорт моделей выполнялся в STL-формате, подготовка к печати — в слайсере IdeaMaker.

На этапе проектирования модели создавались в Fusion 360 по параметрам, указанным в стандартах. Конструкция образцов включала зону захвата и рабочую часть с постоянным сечением.

Перед началом работы было необходимо изучить стандарты, такие как ГОСТ или ASTM, чтобы определить основные параметры модели. Например, для тестовых образцов на растяжение часто используется стандарт ASTM D638-I, где длина образца составляет 50 мм, а расстояние захвата — 165 мм [5]. В качестве стандарта для сжатия используется ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологии [6].

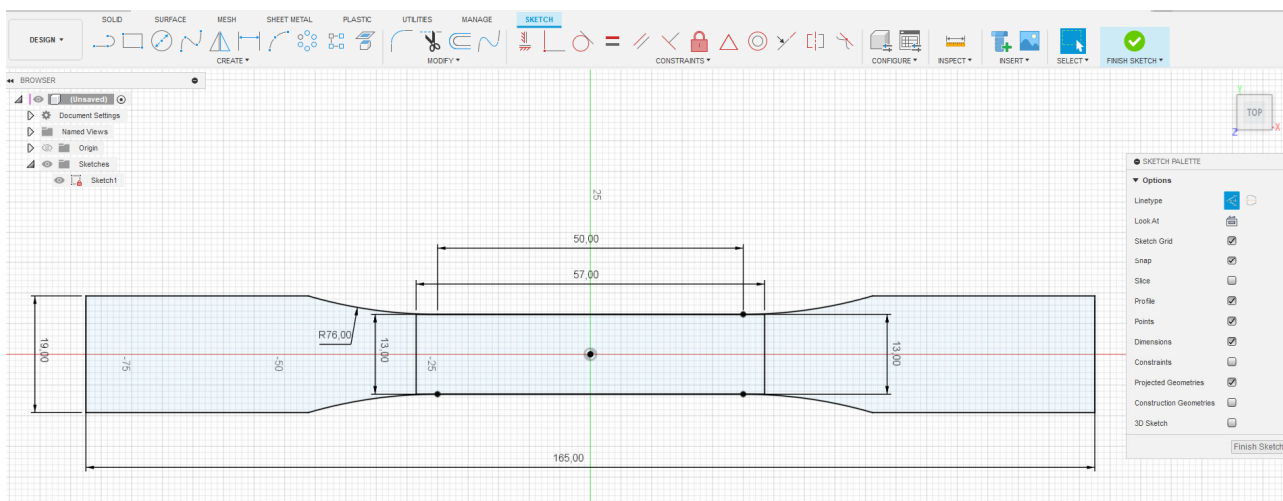


Рисунок 1. Эскиз лопатки, созданный в Fusion 360. Составлено автором.

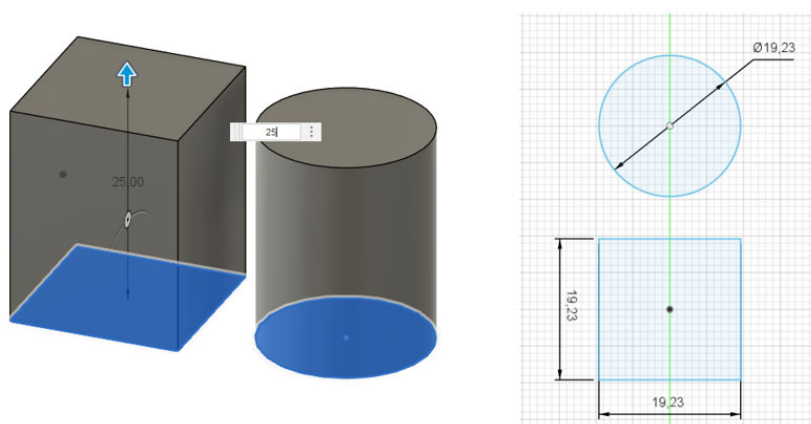


Рисунок 2. Образец для испытаний на сжатие по ГОСТ Р 57558-2017. Составлено автором.

На этапе экспорта и подготовки к печати файлы экспортировались в STL и загружались в слайсер IdeaMaker. Для каждой серии образцов создавались отдельные профили с изменением одного исследуемого параметра, остальные параметры оставались неизменными.

Пример неизменяемых параметров:

материал – PLA или PETG;

высота слоя – 0,2 мм;

ширина линии – 0,4 мм;

скорость печати – 60 мм/с;

охлаждение – минимальное, включение только на нависаниях.

Для исследования влияния отдельных параметров печати были сформированы следующие серии (Таблица 1, рис. 4-9):

Серия	Параметр	Значения	Прочие параметры
1	Ориентация слоев	Параллельно нагрузке / Перпендикулярно нагрузке	Заполнение 50%, кубическое, 4 периметра
2	Плотность заполнения	20% / 50% / 100%	Ориентация параллельная, соты, 4 периметра

3	Тип заполнения	Соты / Кубическое / Гироид	Плотность 50%, параллельная ориентация, 4 периметра
4	Кол-во периметров	2 / 4	Плотность 50%, кубическое заполнение

Таблица 1. Матрица экспериментальных настроек

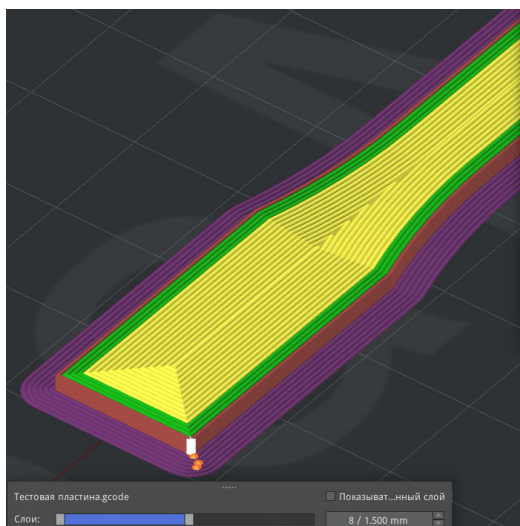


Рисунок 3. Слайсинг образца с укладкой слоев вдоль прикладываемой нагрузки, 100% заполнение, тип заполнения – концентрическое. Время печати и вес аналогично: 22 минуты, 5.6 г. Составлено автором.

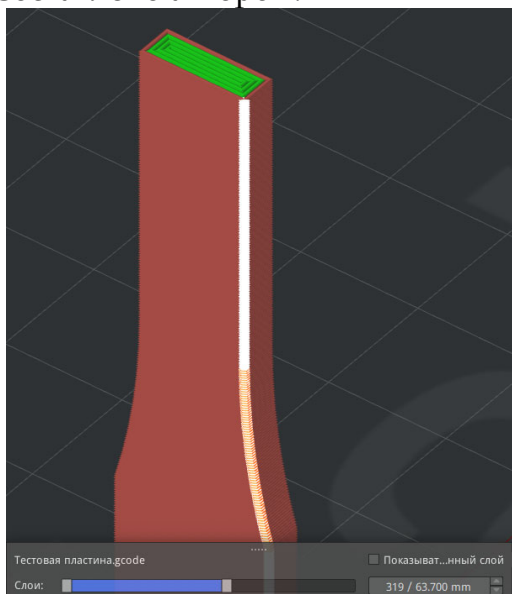


Рисунок 4. Второй образец. Аналогичные параметры рис. 4, за исключением перпендикулярного расположения слоёв. Составлено автором.

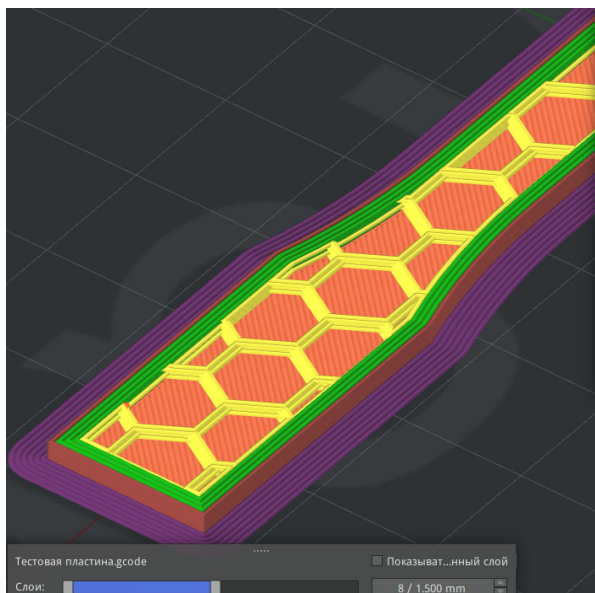


Рисунок 5. Третий образец. Продольное расположение слоев, 20% заполнение, тип заполнения – соты. 19 минут, 3.8 г. Составлено автором.

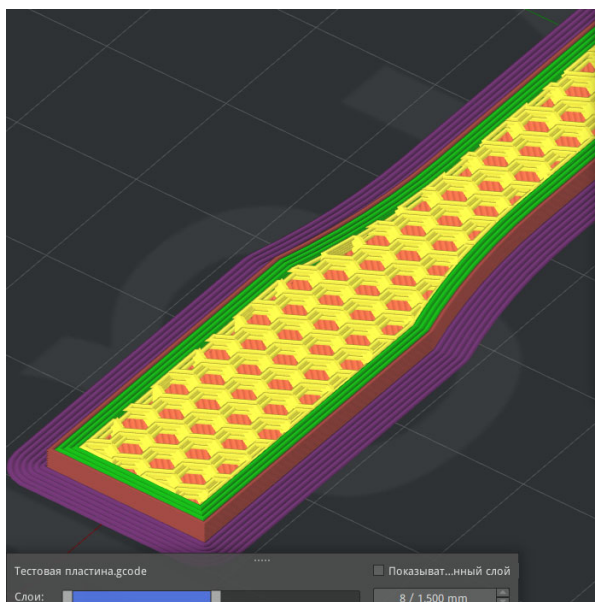


Рисунок 6. Четвертый образец. Продольное расположение слоев, 50% заполнение, тип заполнения – соты. 23 минуты, 4.2 г. Составлено автором.

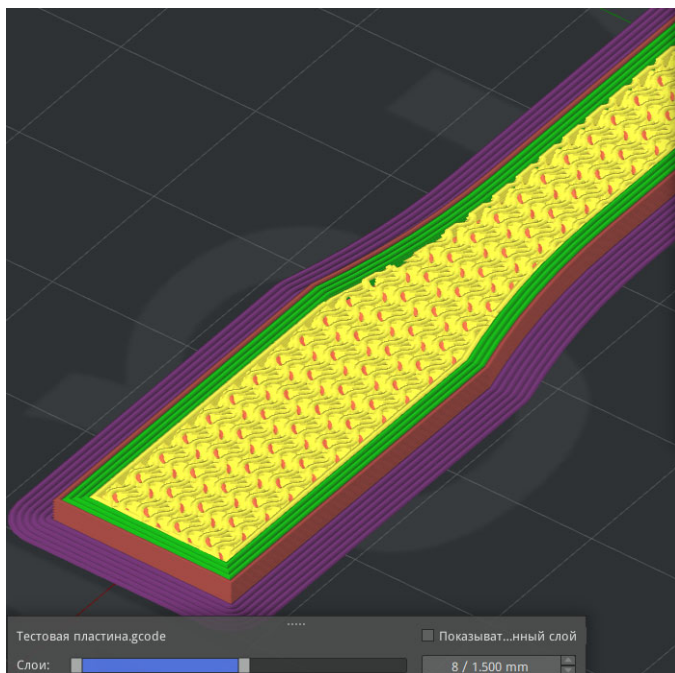


Рисунок 7. Пятый образец. Продольное расположение слоев, 50% заполнение, тип заполнения – гироид, 4 периметра. 23 минуты, 4.4 г. Составлено автором.

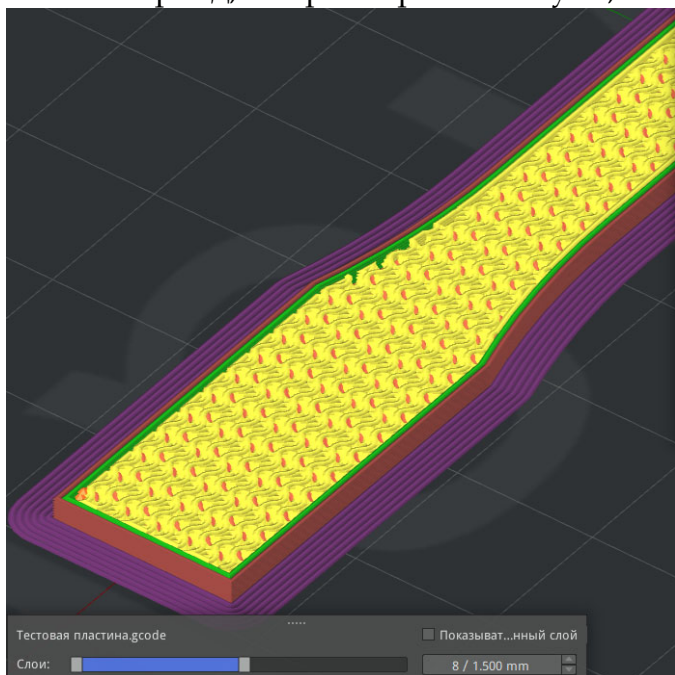


Рисунок 8. Шестой образец. Продольное расположение слоев, 50% заполнение, тип заполнения – гироид, 2 периметра. 21 минута, 4.1 г. Составлено автором.

Испытания проводились с использованием слесарных тисков (рис. 10) [7] в качестве устройства для приложения нагрузки и цифрового датчика силы с диапазоном до 80 Н. Данный метод обеспечивал плавное и контролируемое увеличение нагрузки на образец.

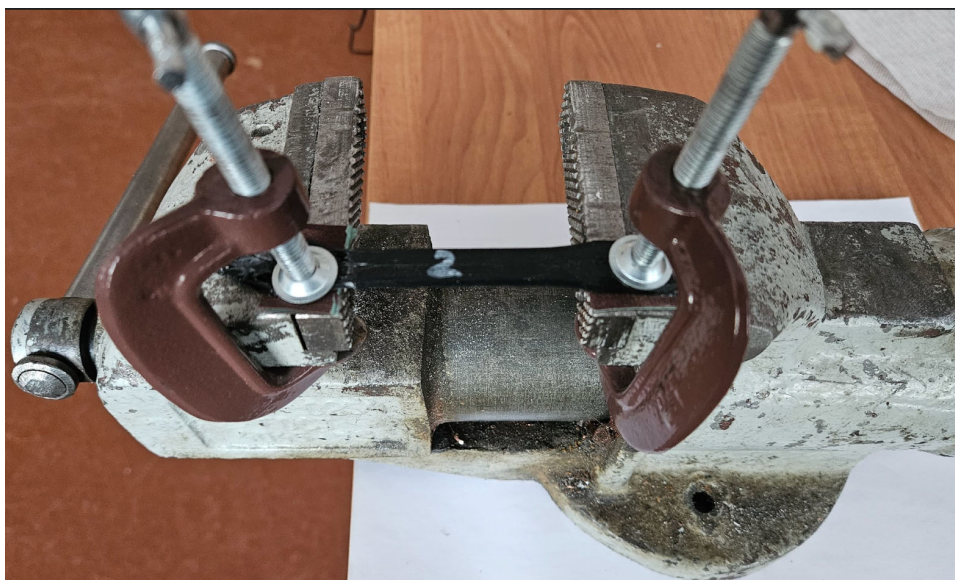


Рисунок 9. Установка образца в тиски. Составлено автором.

Для фиксации момента разрушения и анализа прочности использовались:
 величина силы, измеренная датчиком;
 фотофиксация момента разрушения;
 визуальный осмотр зоны разрушения для определения характера поломки
 (межслойное разрушение или скол в материале).

Процедура испытаний

Образец закреплялся в зажимах тисков в зоне захвата (широкая часть лопатки).

Рукоятка тисков вращалась с постоянной скоростью до момента разрушения.

Значение силы фиксировалось цифровым датчиком.

Проводилось документирование типа разрушения.

Для пересчета усилия на разрыв без учета трения в винтовом механизме использовалась формула:

$$F = T / r * \tan(\alpha + \theta),$$

где: F – усилие на разрыв;

T – крутящий момент, приложенный к рукоятке тисков;

r – радиус винта;

α – угол подъема резьбы;

θ – угол трения.

Подставляя параметры тисков (длина рукоятки 0,22 м, шаг резьбы 5 мм, диаметр винта 22 мм, усилие руки 30 Н, коэффициент трения $\mu = 0,2$), получено усилие порядка 2173 Н (~217 кг) для PLA.



Рисунок 10. Измерение длины рукоятки. Составлено автором.



Рисунок 11. Измерение шага резьбы. Один полный оборот рукоятки в среднем равняется перемещению губок тисков на 5 мм. Составлено автором.



Рисунок 12. Для измерения диаметра винта, тиски были предварительно разобраны. Составлено автором.



Рисунок 13. Для количественной оценки прочности образцов использовался цифровой датчик силы с пределом измерений 80 Н. Составлено автором.

В процессе тестирования фиксировался момент разрушения и визуально оценивался характер поломки. В ходе экспериментов установлено, образцы с параллельным расположением слоев к направлению нагрузки выдерживали заметно большую нагрузку, чем при перпендикулярной ориентации.

Увеличение плотности с 20% до 50% давало рост прочности, но дальнейшее повышение до 100% увеличивало вес изделия без значительного прироста прочности.

Кубическое и гироидное заполнение показали более равномерное распределение нагрузки и лучшие прочностные показатели по сравнению с «сотами».

Увеличение числа периметров с 2 до 4 приводило к значительному росту прочности при минимальном увеличении массы.

На рисунках 14-15 показаны разрушения образцов с разным количеством периметров, демонстрирующие роль оболочек в сопротивлении нагрузке.

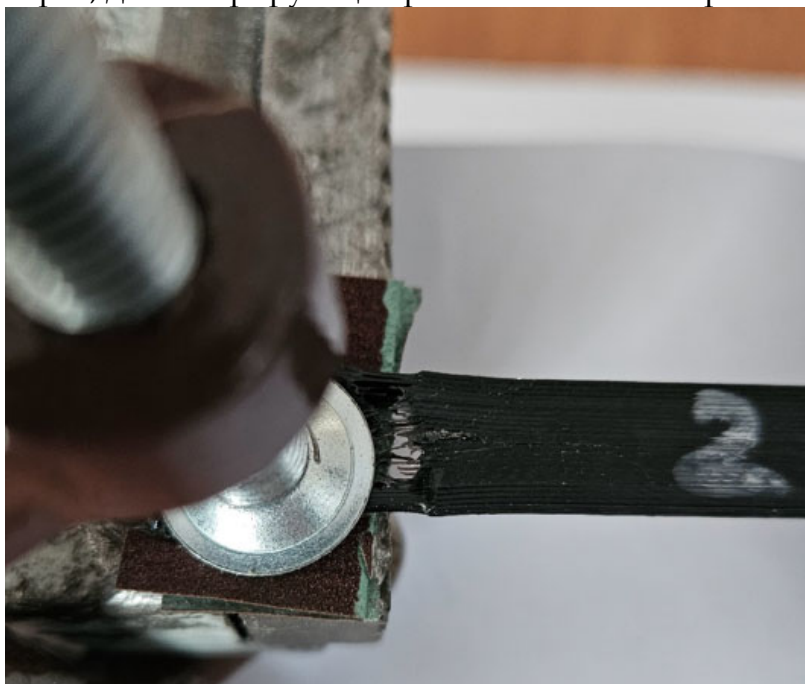


Рисунок 14. Разрыв образца. Составлено автором.



Рисунок 15. Наглядное представление, что решающим фактором остаются периметры модели, а не внутреннее заполнение модели. Составлено автором.

Проведённое исследование подтвердило, что параметры печати в технологии FDM оказывают существенное влияние на прочностные характеристики изделий.

В качестве основных выводов проделанной работы можно утверждать, что ориентация слоев — ключевой фактор, определяющий прочность изделия. Оптимальная плотность заполнения для функциональных деталей в учебных условиях — 20–30%.

Кубическое и гироидное заполнение предпочтительнее для изделий, работающих под нагрузкой. Увеличение количества периметров – эффективный способ повышения прочности без значительного утяжеления.

Разработанная методика проведения экспериментов может быть интегрирована в образовательный процесс для формирования у обучающихся навыков оптимизации конструкций.

Список литературы:

1. AbouelNour, Y., Rakauskas, N., Naquila, G. et al. Tensile testing data of additive manufactured ASTM D638 standard specimens with embedded internal geometrical features. *Sci Data* 11, 506 (2024).
2. Ghaznavi Youvalari, A., Alizadeh Kaklar, J. & Mohamadi, M. Investigation of mechanical properties in PLA, ABS and epoxy resin parts fabricated by 3D printing technology. *Sci Rep* 15, 27777 (2025).
3. Qbed.space [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qbed.space/knowledge/blog/filament-comparison?ysclid=m8a7jpw0vf490323957> (дата обращения: 10.03.2025).
4. Rec3D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rec3d-ru.turbopages.org/rec3d.ru/s/rec-wiki/prochnost-raznykh-vidov-zapolneniy/> (дата обращения: 10.03.2025).
5. ASTM D638-22. Standard test method for tensile properties of plastics. – ASTM International, 2022. – 12 p.
6. ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологии. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2017. – 12 с.
7. ГОСТ 16518-96. Тиски станочные с ручным и механизированным приводами. – М.: Стандартиформ, 1996. – 24 с.

References:

1. AbouelNour, Y., Rakauskas, N., Naquila, G. et al. Tensile testing data of additive manufactured ASTM D638 standard specimens with embedded internal geometrical features. *Sci Data* 11, 506 (2024).
2. Ghaznavi Youvalari, A., Alizadeh Kaklar, J. & Mohamadi, M. Investigation of mechanical properties in PLA, ABS and epoxy resin parts fabricated by 3D printing technology. *Sci Rep* 15, 27777 (2025).
3. Qbed.space [Electronic resource]. – Available at: <https://www.qbed.space/knowledge/blog/filament-comparison?ysclid=m8a7jpw0vf490323957> (accessed: 10.03.2025).
4. Rec3D [Electronic resource]. – Available at: <https://rec3d-ru.turbopages.org/rec3d.ru/s/rec-wiki/prochnost-raznykh-vidov-zapolneniy/> (accessed: 10.03.2025).
5. ASTM D638-22. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. – ASTM International, 2022. – 12 p.
6. GOST R 57558-2017. Additive technologies. Basic terms and definitions. – Moscow: Standartinform, 2017. – 12 p.

7. GOST 16518-96. Machine vises with manual and mechanized drives. – Moscow: Standartinform, 1996. – 24 p.