

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 620.172

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-42-50

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ

Вдовенко Анастасия Дмитриевна, Никитенко Михаил Сергеевич,
Пимонов Максим Владимирович, Сивушкин Александр Сергеевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: pmv.tma@kuzstu.ru



Информация о статье

Поступила:

11 сентября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

механические свойства,
полимерные материалы,
послойное наплавление,
аддитивные технологии, 3D
печать, прочность, упругость,
статические нагрузки,
растягивающие нагрузки

Аннотация.

В машиностроении, особенно в условиях мелкосерийного и уникального производства, а также при создании сложных геометрических форм функциональных деталей аддитивные технологии становятся экономически эффективной альтернативой традиционным методам. Актуальность работы состоит в том, что в связи с особенностями послойной структуры и анизотропией свойств аддитивно изготовленных компонентов вопросы прочностных характеристик таких изделий требуют тщательного анализа, так как их поведение под воздействием механических нагрузок может значительно отличаться от свойств традиционных материалов. Работа посвящена анализу результатов разрушающего контроля прочности и пластичности опытных полимерных образцов, полученных аддитивным методом FDM-печати с заданными параметрами, а также оценке влияния технологических параметров печати на механические свойства образцов. Проведен сравнительный анализ модуля упругости, предела текучести, прочности и относительного удлинения нескольких стандартных топологий образцов из PLA и PETG пластиков. Установлено влияние вида пластика, технологических параметров FDM-печати, таких как плотность и тип структуры заполнения на механические характеристики полимерных образцов. Разработаны рекомендации по проектированию и изготовлению функциональных деталей, работающих в условиях растягивающих нагрузок. В работе представлены результаты комплексного исследования, направленного на оценку прочностных характеристик аддитивно изготовленных образцов методом FDM, с минимизацией массы, материальных и производственных затрат, с учетом специфики и разновидности пластика, а также оптимизации параметров 3D-печати. Полученные результаты позволили сформулировать рекомендации по выбору параметров печати для создания функциональных прототипов и конечных изделий, работающих в условиях механических нагрузок.

Для цитирования: Вдовенко А.Д., Никитенко М.С., Пимонов М.В., Сивушкин А.С. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров FDM-печати на механические свойства полимерных образцов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 42-50. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-42-50, EDN: ASBVVE

Введение

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к механическим характеристикам конструкционных материалов

[1, 2], особенно в условиях эксплуатационных нагрузок [3-5]. Одним из ключевых факторов, определяющих надежность деталей, являются их прочностные свойства и деформационные

характеристики при статическом нагружении. Внезапные разрушения остаются одной из наиболее распространенных причин отказов в авиационной, энергетической, транспортной и других ответственных отраслях промышленности [6-8], в связи с чем особую актуальность приобретают методы изготовления опытных образцов [9-11] и функциональных деталей [12-14], позволяющие сократить время и ресурсы при проектировании и изготовлении деталей и изделий. В последние годы для прототипирования и изготовления функциональных деталей активно применяют аддитивные технологии, которые позволяют изготавливать детали сложной геометрии с заданными механическими свойствами, в частности метод послойного наплавления (FDM – Fused Deposition Modeling) [15-17]. В машиностроении при мелкосерийном и уникальном производстве, а также при создании сложных геометрических форм аддитивные технологии представляют собой экономически выгодную альтернативу традиционным методам [18, 19]. Однако вопросы, связанные с прочностными характеристиками таких образцов, требуют детального изучения, поскольку их поведение при механическом нагружении может существенно отличаться от характеристик традиционных материалов из-за особенностей послойной структуры и анизотропии свойств [3-5].

Тем не менее, аддитивные технологии получили значительное развитие в последние годы [20-22] и встречается практика замены части деталей на изготавливаемые FDM методом [7, 8]. Также есть примеры изготовления методами аддитивных технологий ответственных деталей типа тел вращения [12], применение технологии 3D-печати для оптимизации ремонта зубчатых передач [14].

Методы исследования.

При выполнении работы проведены комплексные исследования, направленные на оценку прочностных характеристик (прочности и пластичности) аддитивно изготовленных образцов методом FDM, с минимизацией массы, материальных и временных затрат, с учетом специфики и разновидности пластика, оптимизация параметров 3D-печати, а также выявление оптимальных режимов их эксплуатации. Под оптимизацией параметров понимается процесс, направленный на достижение оптимального соотношения между скоростью и качеством печати, с учетом особенностей принтера, модели, программного обеспечения и материалов. Полученные данные могут быть использованы для повышения надежности деталей, работающих в условиях

статических растягивающих нагрузок, и снижения риска преждевременных разрушений. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». В пределах намеченной серии испытаний все образцы



Рис. 1. Универсальная испытательная машина (разрывная машина) UTS-111.2-30-42

Fig. 1. Universal testing machine (bursting machine) UTS-111.2-30-42

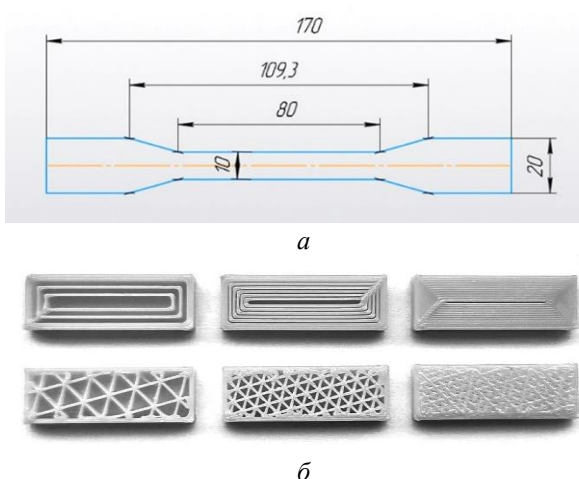


Рис. 2. Параметры образцов для испытаний, где: а – чертеж образца с размерами, б – различная плотность заполнения 33%, 66% и 99% для концентрического типа структуры (сверху) и треугольного типа структуры (снизу)

Fig. 2. Test samples, where: a – sample drawing, b – different filling density – 33%, 66% and 99% for concentric and triangular infilling structures

Таблица 1. Влияние плотности заполнения PLA и PETG образцов на их механические свойства
Table 1. Influence of the filling density of PLA and PETG samples on their mechanical properties

Материал	Плотность заполнения, %	Модуль упругости, МПа	Условный предел текучести при растяжении, МПа	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение, %
PLA	33	888,7	17,5	26,6	5,4
	66	1179,8	21,1	29,9	4,4
	99	1469,5	35,3	36,0	4,0
PETG	33	669,3	14,7	22,4	5,5
	66	894,2	16,5	28,0	5,8
	99	1125,3	18,8	34,3	4,9

нагружались одним способом и испытывались на испытательной разрывной машине UTC-111.2-30-42 (Рис. 1).

Образец для испытания растягивали вдоль его главной продольной оси с постоянной скоростью, в процессе растяжения измеряли нагрузку, выдерживаемую образцом, удлинение образца и определяли заданные показатели. Было испытано 15 образцов, выполненных из полилактида (PLA пластика) с плотностью заполнения (33%, 66%, 99%) и 15 образцов, выполненных из полиэтилентерефталатгликоля (PETG пластика) с плотностью заполнения (33%, 66%, 99%). Результаты полученных измерений представлены в Таблице 1.

Испытания образцов проводились непрерывно до образования трещины заданного размера или до полного разрушения. Форма и размер образца выбраны исходя из рекомендаций ГОСТ и представлены на Рис. 2.

Результаты и обсуждение.

В Таблице 1 представлены ключевые механические характеристики исследуемых образцов, включая модуль упругости, отражающий жесткость материала при малых деформациях, а также критические параметры при разрушении – условный предел текучести при растяжении, прочность при разрыве и относительное удлинение, характеризующие прочность и пластичность материала соответственно. Приведенные значения являются средними арифметическими, полученными в результате пяти независимых испытаний для каждого типа образцов. Такой подход обеспечивает статистическую значимость результатов, позволяя минимизировать влияние случайных факторов, таких как возможные микродефекты структуры, незначительные

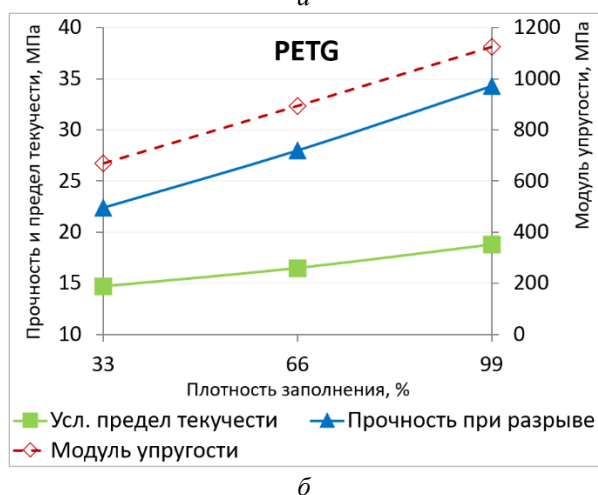
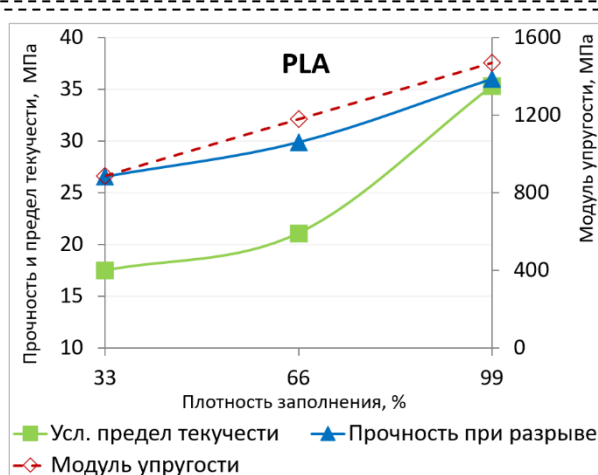


Рис. 3. Зависимость механических характеристик образцов от процента заполнения, где: а – PLA; б – PETG

Fig. 3. Dependence of the mechanical characteristics of the samples on the percentage of filling, where: а – PLA, b – PETG

колебания параметров печати или погрешности измерений. Все 30 образцов были изготовлены с использованием концентрического типа структуры заполнения (Рис. 26 сверху), что обеспечило сопоставимые условия для анализа влияния плотности на механические свойства.

Проведенный анализ показал корреляцию между плотностью заполнения объема образца и механическими характеристиками: с увеличением плотности от 33% до 99% наблюдается монотонный рост модуля упругости и прочности при разрушении для обоих материалов. При этом PLA демонстрирует более высокую прочность во всем диапазоне плотностей.

При этом именно при 66% плотности заполнения PETG достигает максимального относительного удлинения (5,8%), демонстрируя наилучший баланс между прочностью и пластичностью. Важно отметить, что при 66% плотности PETG сохраняет $\approx 80\%$ от максимальной прочности, достигаемой при 99% заполнении, что в сочетании с экономией материала и энергозатрат делает этот вариант наиболее практичным для прототипирования и изготовления деталей. Выбор именно PETG, а не PLA обоснован его преимуществом в лучшей пластичности во всем

диапазоне исследуемых плотностей заполнения при близких показателях прочности, что особенно важно для изучения влияния различных типов структур заполнения на механические характеристики. Таким образом, PETG с 66% плотностью заполнения

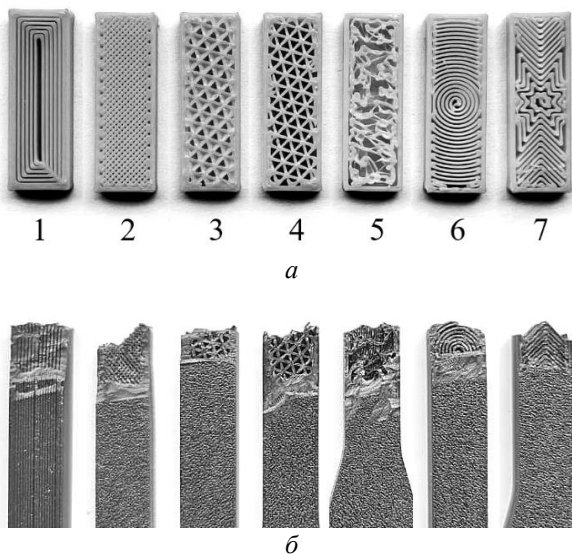


Рис. 4. Исследуемые типы структур заполнения внутреннего объема образцов, где а: 1 – концентрический; 2 – прямолинейный; 3 – куб; 4 – треугольники; 5 – молния; 6 – хорды Архимеда; 7 – спиральная октаграмма; б – соответствующие варианты разрушенных образцов с последующим обнажением заполнения

Fig. 4. The studied types of filling structures of the inner volume of the samples, where a: 1 – concentric, 2 – rectilinear, 3 – cube, 4 – triangles, 5 – lightning, 6 – Archimedes chords, 7 – spiral octagram; b – corresponding variants of the destroyed samples with subsequent exposure of the filling

Таблица 2. Влияние типа структуры заполнения PETG 66% образцов на их механические свойства
Table 2. Influence of the type of PETG filling structure of 66% of samples on their mechanical properties

№ п/п	Тип структуры внутреннего заполнения	Модуль упругости, МПа	Условный предел текучести при растяжении, МПа	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение, %
1	Концентрический	894,2	16,5	28,0	5,8
2	Прямолинейный	855,8	15,9	27,2	5,7
3	Куб	1097,3	21,2	34,0	4,9
4	Треугольники	917,9	18,6	30,2	12,7
5	Молния	785,9	15,3	25,6	5,3
6	Хорды Архимеда	883,1	15,5	24,8	4,2
7	Спиральная октаграмма	775,4	13,9	20,4	3,7

представляет собой оптимальный вариант, обеспечивающий наилучший баланс между механическими свойствами, чувствительностью к изменению типа структуры заполнения и практической целесообразностью.

Помимо плотности заполнения, существенное влияние на механические свойства напечатанных деталей оказывает тип структуры заполнения [5]. Современное программное обеспечение для 3D-печати предлагает широкий спектр вариантов заполнения внутреннего объема получаемых деталей, каждый из которых формирует уникальную микроструктуру образцов. В рамках проведенного эксперимента дополнительно проанализировано влияние семи распространенных типов структуры заполнения на механические характеристики образцов из PETG с 66% плотностью заполнения. Для этого было изготовлено и испытано еще 35 образцов, в которых формирование волокон для различных образцов задана выбранным типом структуры заполнения внутреннего объема. Визуальные

различия испытанных типов структур заполнения показаны на Рис. 4.

Результаты полученных измерений для оценки влияния типа структуры заполнения PETG 66% образцов на их механические свойства представлены в Таблице 2.

Проведенный анализ выявил существенную зависимость механических характеристик от типа структуры внутреннего заполнения.

Первое различие выявлено по внешнему виду диаграмм (Рис. 5), полученных после испытаний, для большинства типов заполнения характерны диаграммы вида, представленного на Рис. 5 а, однако для образцов с заполнением «Треугольники» (Рис. 5 б) появляется участок, монотонно снижающийся после достижения максимальной величины напряжений. Данный вид диаграммы в целом не характерен для полимерных материалов и, скорее всего, определяется именно конкретным типом структуры заполнения объема образца, при этом показатели механических свойств незначительно

превосходят значения для большинства из типов заполнений образцов, однако показатель относительного удлинения выше в 2-3 раза.

Сводные результаты основных показателей механических характеристик приведены на Рис. 6.

Тип структуры заполнения «молния», «хорды Архимеда» и «спиральная октаграмма» показывают снижение прочности из-за возникновения зон концентрации напряжений в местах резких изменений геометрии внутри образцов. Такая структура заполнения не рекомендуется для делателей и образцов, воспринимающих растягивающие статические или периодические динамические нагрузки.

Кубический тип структуры заполнения позволяет обеспечить

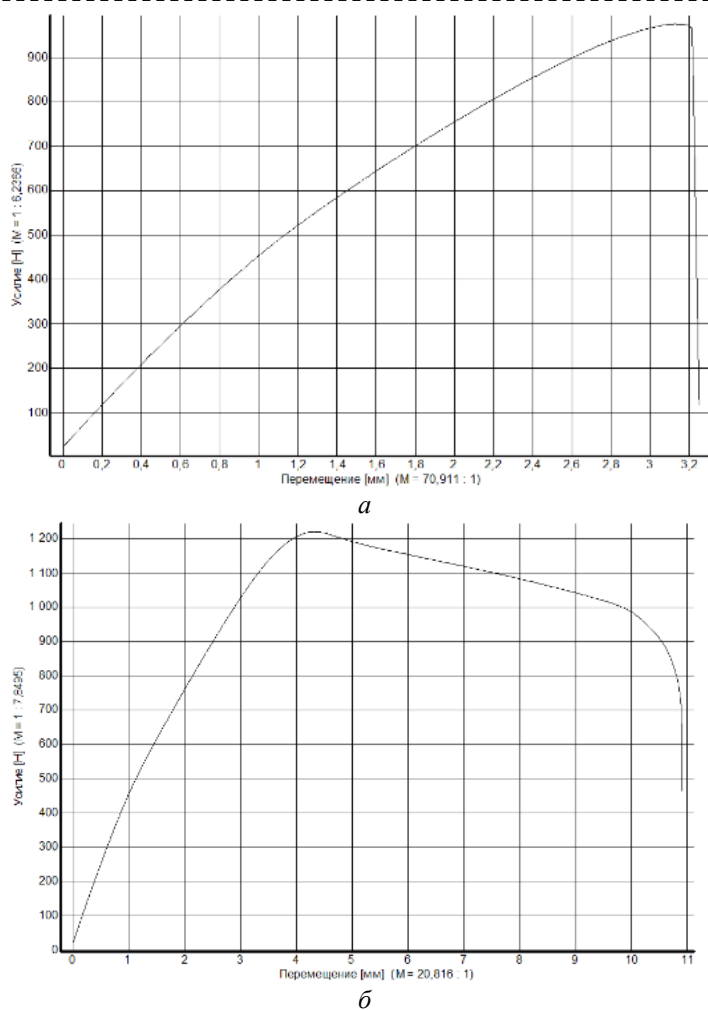


Рис. 5. Вид диаграммы испытания на растяжения для различных типов структуры заполнения образцов, где: а – прямолинейный; б – треугольники
Fig. 5. Tensile test diagrams for various types of sample filling structures, where: а – rectilinear, б – triangles

максимальные показатели прочности благодаря оптимальному распределению нагрузок.

Исследование влияния плотности заполнения подтвердило ожидаемую тенденцию – увеличение плотности от 33% до 99% приводит к монотонному росту прочностных характеристик причем PETG при максимальном заполнении не значительно отличается по показателям прочности от PLA, сохраняя при этом преимущество в пластичности.

Заключение

Полученные результаты позволили сформулировать четкие рекомендации по выбору параметров печати: кубическая структура оптимальна для деталей, требующих повышенной прочности, треугольное заполнение – для элементов, требующих повышенной пластичности, при этом следует избегать использования октаграммных структур в ответственных узлах.

Для дальнейшего углубления понимания структурно-свойственных взаимосвязей перспективными направлениями исследований представляются: изучение влияния толщины стенок и скорости экструзии, количественная оценка анизотропии механических свойств.

Практическая значимость работы заключается в возможности целенаправленного проектирования механических характеристик FDM-деталей через осознанный выбор параметров печати, что особенно актуально для создания функциональных прототипов и конечных изделий, работающих в условиях механических нагрузок.

Полученные результаты позволили установить количественные зависимости между технологическими параметрами FDM-печати, их прочностью и пластичностью, что представляет значительный интерес для проектирования ответственных конструкций, работающих в условиях статических растягивающих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов С. П. Прогнозирование влияния конструктивных факторов на сопротивление усталости материалов // Научный вестник МГТУГА. 2014. № 205. С. 67–73. EDN: SJZYXZ.
2. Шимохин А. В., Союнов А. С., Биткина Е. Е. [и др.] К вопросу о применении аддитивной технологии на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89. № 5. С. 357–365. DOI: 10.17816/0321-4443-111103. EDN: KPBBLF.
3. Ерпалов А. В., Шефер Л. А., Рихтер Е. Е. [и др.] Усталостные испытания материалов и конструкций с использованием современного оборудования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15. № 2. С. 70–80. EDN: TLJEN.
4. Капралов В. М., Осипов А. В., Нгуен Н. Т. Эксперименты по оценке усталостной прочности конструкционных материалов и деталей машин // Вестник Брянского государственного технического

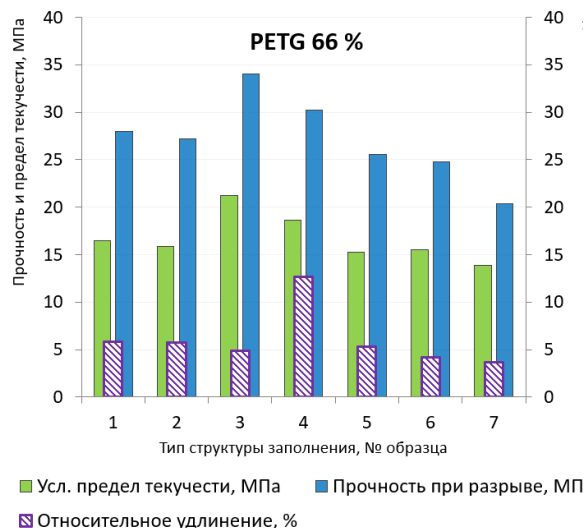


Рис. 6. Распределение механических свойств образцов в зависимости от типа структуры заполнения, где: 1 – концентрический; 2 – прямолинейный; 3 – куб; 4 – треугольники; 5 – молния; 6 – хорды Архимеда; 7 – спиральная октаграмма

Fig. 6. Distribution of mechanical properties of samples depending on the type of filling structure, where: 1 – concentric, 2 – rectilinear, 3 – cube, 4 – triangles, 5 – lightning, 6 – Archimedes chords, 7 – spiral octagram

университета. 2018. № 8(69). С. 25–35. DOI: 10.30987/article_5bb5e6a564b678.09621023. EDN: YTPLAD.

5. Zhang S., Zhang Y., Liu S. [и др.] A review of the performance of polymer parts printed on fused deposition modelling under cyclic loading // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2023. Vol. 44. Pp. 164–177. DOI: 10.1177/07316844231215392.
6. Jalil M. H., Todo M. Development and Characterization of Gear Shape Porous Scaffolds Using 3D Printing Technology // International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics. 2017. Vol. 7. Issue 2. Pp. 74–83. DOI: 10.17706/ijbbb.2017.7.2.74-83.
7. Pujari L., Manoj S., Gaddikeri O. [и др.] Recent advancements in 3D printing for gear design and analysis: a comprehensive review // Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2024. Vol. 7. Pp. 4979–5003. DOI: 10.1007/s41939-024-00529-w.
8. Jasiński K., Murawski L., Kluczyk M. [и др.] Analysis of the Possibility of Using 3D Printing for Emergency Replacement of Damaged Elements in the Marine Industry // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. P. 3458. DOI: 10.3390/app15073458.
9. Подкопаев С. А., Демишкевич Э. Б. Аддитивные технологии и прототипирование. Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 52 с. ISBN: 978-5-7038-5642-0. EDN: BGNYCU.
10. Amroune S., Belaadi A., Zaoui M. [и др.] Manufacturing of rapid prototypes of mechanical parts using reverse engineering and 3D Printing // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2022. Vol. 15. Pp. 167–176. DOI: 10.24874/jsscm.2021.15.01.11.
11. Ефременкова М. В., Черкасов П. В., Баловнев Е.

А. Анализ технологий синтеза геометрических форм изделий // XVII Всероссийская 70 науч.-практ. конф. молодых ученых «Россия молодая». Кемерово : КузГТУ, 2025. С. 31502.1–31502.7.

12. Нефелов И. С., Баурова Н. И. Технологические особенности изготовления методами аддитивных технологий деталей типа тел вращения, работающих в критических условиях эксплуатации // Технология металлов. 2025. № 7. С. 35–41. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-7-35-41. EDN: UUDBSE.

13. Антипов Д. В., Михеев М. А., Панин В. И. [и др.] Разработка технологии 3D печати корпусных деталей МКА НК // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 4(114). С. 110–113. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-110-113. EDN: QRSBIV.

14. Славкина В. Э., Мирзаев М. А., Лопатина Ю. А. Применение технологии 3D-печати для оптимизации ремонта зубчатых передач // Технический сервис машин. 2020. № 1(138). С. 58–64. EDN: WPQPOE.

15. Долголенко И. С., Нефелов И. С., Коноплин А. Ю. Исследование способов упрочнения структуры заполнения деталей, напечатанных с использованием методов 3D-печати // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. № 3. С. 27–31. DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-3-27-31. EDN: HKDJDE.

16. Ефременкова М. В., Попинако Я. В., Кизилев С. А. [и др.] Исследование программных способов корректировки дефектов послойного наплавления при печати на 3D-принтере // Наука и инновационные технологии. 2023. № 1(26). С. 104–111. DOI: 10.33942/sit042250. EDN: XIFAIL.

17. Vishwjeet Mr., Ambade V., Padole Mr. [и др.] Effect of infill density, infill pattern and Extrusion temperature on Mechanical Properties of Part produced by 3D printing FDM Technology Using ABS, PLA and PETG Filament: A Critical Review // International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR). 2023. Vol. 10. Pp. 130–136.

18. Игнатова А. С. Анализ экономической целесообразности применения аддитивных технологий (3D-печати) в механическом машиностроении // Молодой ученый. 2025. № 4(555). С. 32–35. EDN: TCVDIT.

19. Wohlers T. T., Caffrey T. Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates, 2014. 276 p.

20. Костяков А. Е. Анализ применения различных типов 3D-принтеров в машиностроении // Интерактивная наука. 2023. № 8(84). С. 7–13. DOI: 10.21661/r-560722. EDN: MCTIGU.

21. Kun K. Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology // Procedia Engineering. 2016. Vol. 149. Pp. 203–211. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.657.

22. Нефелов И. С., Баурова Н. И. Исследование влияния режимов 3D-печати на герметичность изделий машиностроения, изготовленных с использованием аддитивных технологий // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2025. № 5. С. 10–17. DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-5-10-17. EDN: PMWMWQ.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Вдовенко Анастасия Дмитриевна, магистрант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: nstvdvkn@gmail.com

Никитенко Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>, e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Пимонов Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-4692>, e-mail: pmv.tma@kuzstu.ru

Сивушкин Александр Сергеевич, старший преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: sas.pmh@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Вдовенко Анастасия Дмитриевна – проектирование и подготовка образцов, проведение измерений, выполнение экспериментов, написание текста.

Никитенко Михаил Сергеевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, подведение итогов, написание текста.

Пимонов Максим Владимирович – разработка методики проведения эксперимента, проведению измерений, анализ данных экспериментов, написание текста.

Сивушкин Александр Сергеевич – написание текста, обзор актуальной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FDM PRINTING PARAMETERS ON POLYMER SPECIMEN MECHANICAL PROPERTIES

Anastasia D. Vdovenko, Mikhail S. Nikitenko,
Maxim V. Pimonov, Alexander S. Sivushkin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: pmv.tma@kuzstu.ru

**Article info**

Received:

11 September 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: stress-related characteristics, polymer materials, FDM, additive technologies, 3D printing, strength, elasticity, static load, tensile load.

Abstract.

In mechanical engineering, especially in the conditions of small-scale and unique production, as well as in the creation of complex geometric shapes of functional parts, additive technologies are becoming a cost-effective alternative to traditional methods. The relevance of the work is that, due to the features of the layered structure and the anisotropy of the properties of additively manufactured components, the issues of the strength characteristics of such products require careful analysis, since their behavior under the influence of mechanical loads can differ significantly from the properties of traditional materials. The work is devoted to the analysis of the results of destructive testing of the strength and ductility of experimental polymer specimens, produced by the additive method of FDM-printing with specified parameters, and to the evaluation of the influence of technological printing parameters on the mechanical properties of the specimens. A comparative analysis of the modulus of elasticity, yield strength, tensile strength, and relative elongation of standard and topology-optimized specimens made from PETG and PLA plastics was conducted. The influence of the type of plastic, technological parameters of FDM-printing, such as infill density and infill pattern, on the mechanical characteristics of the polymer specimens was established. Recommendations for the design and manufacturing of functional parts operating under tensile loading conditions were developed. The work presents the results of a comprehensive study aimed at assessing the strength characteristics of additively manufactured specimens by the FDM method, with minimization of mass, material, and production costs, taking into account the specifics and variety of plastic, as well as the optimization of 3D-printing parameters. The results allowed us to formulate recommendations for selecting printing parameters for creating functional prototypes and final products operating under mechanical loads.

For citation: Vdovenko A.D., Nikitenko M.S., Pimonov M.V., Sivushkin A.S. Experimental investigation of FDM printing parameters on polymer specimen mechanical properties. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):42-50. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-42-50, EDN: ASBVVE

REFERENCES

1. Borisov S.P. Impact predication of design factors upon material fatigue resistance. *Scientific Bulletin of MSTUCA*. 2014; 205:67–73. (In Russ.)
2. Shimokhin A.V., Soyunov A.S., Bitkina E.E., Yankovsky K.A. On the issue of using additive technology at agricultural engineering enterprises. *Tractors and agricultural machinery*. 2022; 89(5):357–365. (In Russ.) DOI: 10.17816/0321-4443-111103. EDN: KPBBLF.
3. Erpalov A.V., Shefer L.A., Richter E.E., Taranenko P.A. Fatigue testing of materials and structures using modern equipment. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. 2015; 15(2):70–80. (In Russ.) EDN: TLJIEN.
4. Kapralov V.M., Osipov F.V., Nguen N.T. Assessment experiments on fatigue resistance of structural materials and machinery. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2018; 8(69):25–35. (In Russ.) DOI: 10.30987/article_5bb5e6a564b678. 09621023. EDN: YTPLAD.
5. Zhang S., Zhang Y., Liu S., Zhang Y. A review of the performance of polymer parts printed on fused deposition modelling under cyclic loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2023; 44:164–177. (In Eng.) DOI: 10.1177/07316844231215392.
6. Jalil M. H., Todo M. Development and Characterization of Gear Shape Porous Scaffolds Using 3D Printing Technology. *International Journal of Bioscience*,

Biochemistry and Bioinformatics. 2017; 7(2):74–83. (In Eng.) DOI: 10.17706/ijbbb.2017.7.2.74-83.

7. Pujari L., Manoj S., Gaddikeri O., Shetty P., Khot M. Recent advancements in 3D printing for gear design and analysis: a comprehensive review. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2024; 7:4979–5003. (In Eng.) DOI: 10.1007/s41939-024-00529-w.

8. Jasiński K., Murawski L., Kluczyk M., Wierchowski J., Chodnicki M., Lipinski K., Szeleziński A. Analysis of the Possibility of Using 3D Printing for Emergency Replacement of Damaged Elements in the Marine Industry. *Applied Sciences*. 2025; 15:3458. (In Eng.) DOI: 10.3390/app15073458.

9. Podkopaev S.A., Demishkevich E.B. Additive technologies and prototyping. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman; 2021. 52 p. (In Russ.) ISBN: 978-5-7038-5642-0. EDN: BGNVCU.

10. Amroune S., Belaadi A., Zaoui M., Nouredine M., Mohamad B., Khalissa S., Benyettou R. Manufacturing of rapid prototypes of mechanical parts using reverse engineering and 3D Printing. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. 2022; 15:167–176. (In Eng.) DOI: 10.24874/jsscm.2021.15.01.11.

11. Efremenkova M.V., Cherkasov P.V., Balovnev E.A. Analysis of technologies for the synthesis of geometric shapes of products. XVII All-Russian 70th scientific and practical conf. of young scientists «Young Russia». Kemerovo: KuzSTU; 2025; 31502.1–31502.7.

12. Nefelov I.S., Baurova N.I. Technological features of manufacturing parts of the type of bodies of revolution operating under critical operating conditions using additive technologies. *Technology of Metals*. 2025; 7:35–41. (In Russ.) DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-7-35-41. EDN: UUDBS.

13. Antipov D.V., Mikhhev M.A., Panin V.I., Zhukov V.V. Development of technology for 3d printing of body parts of a small space scanic nano-class vehicle. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023; 25(4):110–113. (In Russ.) DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-110-113. EDN: QRSBIV.

14. Slavkina V.E., Mirzayev M.A., Lopatina Yu.A. Using 3D printing technology to optimize gear repair.

Technical service of machines. 2020; 1(138):58–64. (In Russ.) EDN: WPQPOE.

15. Dolgolenko I.S., Nefelov I.S., Konoplin A.Yu. Study of methods for strengthening the filling structure of parts printed using 3D printing methods. *Repair. Restoration. Modernization*. 2023; 3: 27–31. (In Russ.) DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-3-27-31. EDN: HKDJDE.

16. Efremenkova M.V., Popinako Ya.V., Kizilov S.A., Nikitenko M.S. Investigation of software methods for correcting layer-by-layer surfacing defects when printing on a 3d printer. *Science and innovative technologies*. 2023; 1(26):104–111. (In Russ.) DOI: 10.33942/sit042250. EDN: XIFAIL.

17. Vishwjeet Mr., Ambade V., Padole Mr., Badole Mr. Effect of infill density, infill pattern and Extrusion temperature on Mechanical Properties of Part produced by 3D printing FDM Technology Using ABS, PLA and PETG Filament: A Critical Review. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*. 2023; 10:130–136. (In Eng.)

18. Ignatova A.S. Analysis of the economic feasibility of using additive technologies (3D printing) in mechanical engineering. *Young Scientist*. 2025; 4(555):32–35. (In Russ.) EDN: TCVDIT.

19. Wohlers T. T., Caffrey T. Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates; 2014. 276 p. (In Eng.)

20. Kostyakov A.E. Analysis of the use of various types of 3d printers in mechanical engineering. *Interactive Science*. 2023; 8(84):7–13. (In Russ.) DOI: 10.21661/is-560722. EDN: MCTIGU.

21. Kun K. Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. *Procedia Engineering*. 2016; 149:203–211. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.657.

22. Nefelov I.S., Baurova N.I. Study of the influence of 3D printing modes on the tightness of mechanical engineering products manufactured using additive technologies. *All materials. Encyclopedic reference book*. 2025; 5:10–17. (In Russ.) DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-5-10-17. EDN: PMWMWQ.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Anastasia D. Vdovenko, Master's student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: nstvdvkn@gmail.com

Mikhail S. Nikitenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8752-1332>, e-mail: ltd.mseng@gmail.com

Maxim V. Pimonov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9509-4692>, e-mail: pmv.tma@kuzstu.ru

Alexander S. Sivushkin, Senior lector, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: sas.pmh@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Anastasia D. Vdovenko – design and preparation of samples, carrying out measurements, performing experiments, writing text.

Mikhail S. Nikitenko – formulation of a research task, conceptualization of research, summing up, writing text.

Maxim V. Pimonov – development of experimental methods, measurements, analysis of experimental data, writing text.

Alexander S. Sivushkin – writing text, reviewing relevant literature.

All authors have read and approved the final manuscript.

