

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 67.017

EDN: IUXLYT

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-1-19-33



Экспериментальное исследование прочностных характеристик при растяжении термопластичных материалов – PLA+, TPU E95A и TPU 60D CFF, полученных методом FDM

Д.Ю. Левин¹, А.А. Болдырев², М.Е. Подшибякин³, О.А. Рябина⁴✉

¹⁻⁴Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Резюме. Цель работы – провести исследование, сравнительный анализ и оценку прочностных характеристик термопластичных изделий, изготовленных с использованием технологии 3D-печати методом Fused Deposition Modelling (моделирование методом послойного наплавления). Экспериментальные исследования проводились на образцах, изготовленных из различных термопластичных материалов, в частности PLA+ (Polylactic Acid), TPU E95A (Thermoplastic Polyurethane) и TPU 60D CFF (Thermoplastic Polyurethane with Carbon Fiber Fill). Испытания 15 образцов осуществлялись на электромеханической универсальной испытательной машине WDW-100E (Китай). Рассматривались механические свойства, такие как прочность, пластичность и упругость при растяжении неметаллических термопластичных материалов. Выявлено, что образцы, изготовленные из различных термопластичных материалов, показывают разнообразие механических свойств (прочность, пластичность и упругость) при растяжении и поведении при максимальной нагрузке до 1,39 кН. Это позволило предложить рекомендации по настройке параметров печати для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик деталей, изготавливаемых из рассматриваемых типов пластика, и использованию изучаемых материалов в машиностроении, автомобилестроении, медицине и др. По результатам проведенных исследований сформирована сравнительная таблица образцов. Показано, что важным параметром, дополняющим выбор структуры заполнения изделия, является ориентация модели при печати. Слои, уложенные в плоскости печатного стола, обеспечивают прочность при разрыве до 60 МПа, тогда как в перпендикулярном положении этот показатель снижается в несколько раз. Ориентация детали на платформе должна выбираться с учетом направления предполагаемых эксплуатационных нагрузок. Результаты работы будут полезны для таких отраслей, как машиностроение, автомобилестроение и судостроение, где изделия подвергаются высоким механическим нагрузкам. Полученные данные помогут улучшить долговечность и надежность изделий, а также повысить эффективность и экономическую обоснованность производства.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, термопластичные материалы, прочностные характеристики, PLA+, TPU E95A, TPU 60D CFF, FDM, механические свойства, параметры печати

Для цитирования: Левин Д.Ю., Болдырев А.А., Подшибякин М.Е., Рябина О.А. Экспериментальное исследование прочностных характеристик при растяжении термопластичных материалов – PLA+, TPU E95A и TPU 60D CFF, полученных методом FDM // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 1. С. 19–33. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-19-33>. EDN: IUXLYT.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Tensile properties of thermoplastic materials produced by FDM: PLA+, TPU E95A, and TPU 60D CFF

Dmitrii Yu. Levin¹, Aleksandr I. Boldyrev², Maksim E. Podshibyakin³,
Olga A. Riabinina⁴✉

¹⁻⁴Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. This study examines the tensile properties of thermoplastic components manufactured using fused deposition modeling (FDM). Experimental tests were carried out on samples printed from three thermoplastic materials: polylactic acid (PLA+), thermoplastic polyurethane (TPU E95A), and carbon-filled thermoplastic polyurethane (TPU 60D CFF). Fifteen samples were tested using an electromechanical universal testing machine (WDW-100E, China) to determine their strength, ductility, and elasticity. The results show that samples printed from different thermo-

plastics exhibit a wide range of tensile properties and distinct behavior under maximum loads reaching up to 1.39 kN. To optimize the performance of components made from the studied plastics, recommendations for adjusting printing parameters were developed, along with guidance for their use in mechanical engineering, automotive engineering, medicine, and related fields. The experimental data are summarized in a comparative table, which shows that print orientation and infill structure are critical parameters. Depositing layers in the plane of the build platform provides tensile strengths of up to 60 MPa, while printing in the perpendicular orientation significantly reduces this value. Therefore, part orientation should be selected according to the anticipated direction of service loads. The results are directly applicable to industries such as mechanical and automotive engineering and shipbuilding, where high mechanical loads demand improved durability, reliability, and production efficiency.

Keywords: additive technologies, 3D printing, thermoplastic materials, strength characteristics, PLA+, TPU E95A, TPU 60D CFF, FDM, mechanical properties, printing parameters

For citation: Levin D.Yu., Boldyrev A.I., Podshibyakin M.E., Riabinina O.A. Tensile properties of thermoplastic materials produced by FDM: PLA+, TPU E95A, and TPU 60D CFF. *iPolytech Journal*. 2026;30(1):19-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-19-33>. EDN: IUXLYT.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы аддитивные технологии становятся неотъемлемой частью производственных процессов, предлагая уникальные возможности для изготовления деталей сложной формы с высокой точностью. Эти технологии, основанные на поэтапном наложении материала, представляют собой альтернативу традиционным методам производства. Одной из ключевых областей применения аддитивных технологий является создание элементов конструкций, где требуется высокая степень точности при создании геометрии.

Преимущество аддитивных технологий заключается в возможности использования различных видов материалов, среди которых особое место занимают термопластичные материалы. Одним из самых распространенных методов 3D-печати является метод послойного наплавления FDM (от англ. Fused Deposition Modeling), который использует пластиковые нити для создания объектов [1]. Популярность метода FDM обусловлена низкой стоимостью принтеров и расходных материалов, что делает его доступным для широкого круга пользователей. Метод приобрел значительную распространенность благодаря легкости и доступности комплектующих, необходимых для сборки принтеров FDM. Это позволяет значительно снизить затраты на эксплуатацию 3D-принтеров, что делает технологию более привлекательной для пользователей и производителей [2, 3].

Физико-механические свойства термопластичных материалов, используемых в 3D-печати, представляют собой актуальную область научных исследований. С каждым годом увеличивается количество экспериментальных данных, что способствует углу-

бленному пониманию влияния параметров печати на прочностные характеристики материалов. Важным аспектом является не только улучшение технологий печати, но и расширение знаний о физико-механических свойствах напечатанных изделий, что является необходимым условием для их эффективного применения в различных областях промышленности.

Ряд исследований, выполненных как отечественными, так и зарубежными учеными [4–8], сосредоточен на анализе влияния параметров печати, таких как скорость, тип и плотность заполнения, на прочность изделия. Эти работы подтвердили, что изменения в настройках печати могут существенно влиять на механические характеристики материалов, что открывает новые возможности для их применения в инженерных задачах.

Однако существующие исследования зачастую ограничены узким набором материалов. Настоящее исследование направлено на изучение прочностных характеристик различных термопластичных материалов, в частности PLA+ (Polylactic Acid), TPU E95A (Thermoplastic Polyurethane) и TPU 60D CFF (Carbon Fiber Fill). Это позволит сформулировать точные рекомендации по настройке печати для достижения оптимальных механических свойств изготавливаемых изделий.

Результаты текущего исследования позволяют обоснованно выбирать материалы для 3D-печати. Это особенно важно для отраслей, где детали подвергаются значительным механическим нагрузкам, таких как машиностроение, автомобилестроение и судостроение, где надежность и долговечность материалов играют решающую роль [9–11].

Разработанные на основе исследования рекомендации по выбору и настройке параметров печати будут способствовать повышению прочности, долговечности и эксплуатационной надежности изделий, что сделает 3D-печать более эффективным и экономически обоснованным инструментом для производства высококачественных деталей.

Алгоритм проведения экспериментальных исследований представлен на рис. 1.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальные исследования проводились на образцах, полученных по технологии FDM, согласно ГОСТ 11262-2017⁵, тип 1А (рис. 2). Ввиду специфики данной технологии размеры образцов в области утолщений для захвата испытательной машиной были увеличены.

Для образцов была создана 3D-модель, обусловленная размерами образца типа 1А с изменениями, и сохранена в формате stl

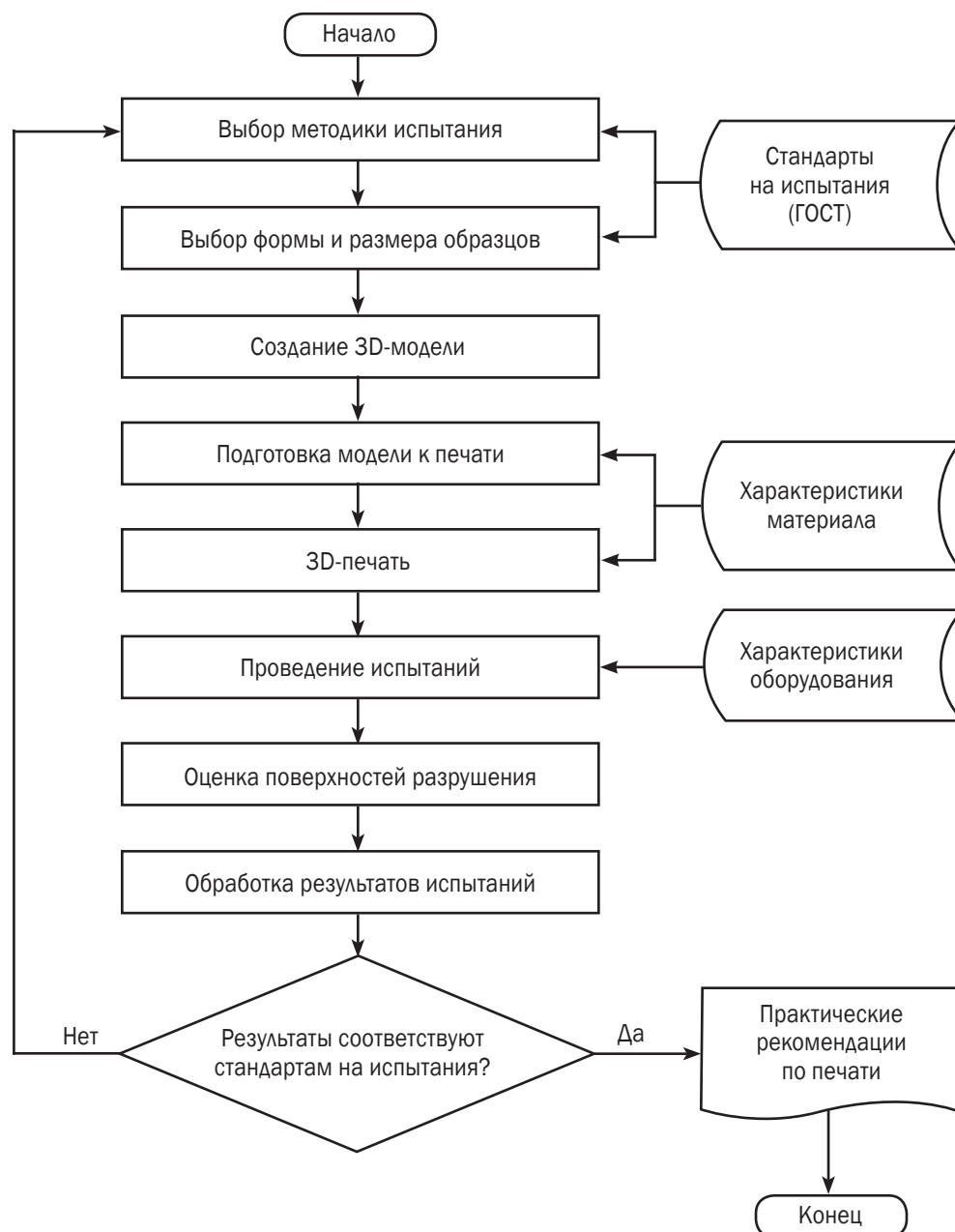
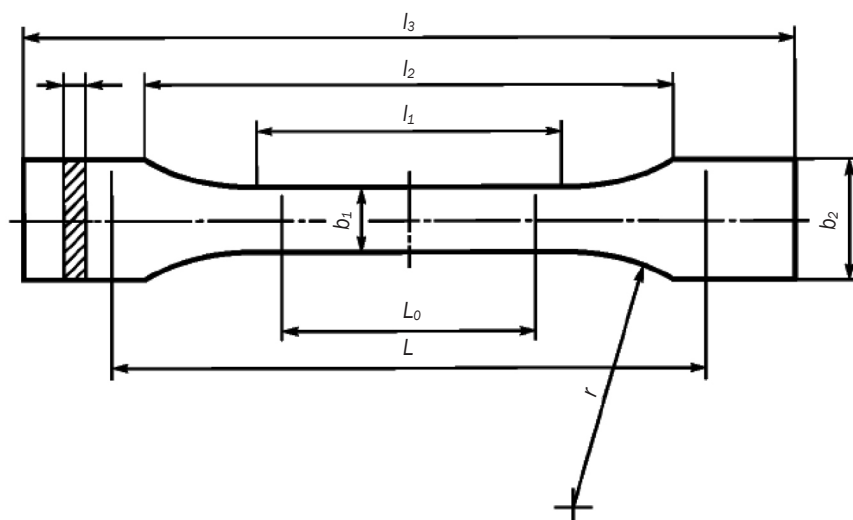


Рис. 1. Алгоритм проведения экспериментальных исследований
Fig. 1. Experimental study algorithm

⁵ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Введ. 30.11.2017. М.: Стандартинформ, 2018.



Размер	Образец типа		
	1A	1B	2
l_3 Общая длина	170	Более 150	Более 150
l_1 Длина узкой части с параллельными сторонами (рабочая часть)	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$	$60,0 \pm 0,5$
r Радиус закругления	24 ± 1	$60,0 \pm 0,5$	$60,0 \pm 0,5$
l_2 Расстояние между широкими частями с параллельными сторонами	$109,3 \pm 3,2$	$108,0 \pm 1,6$	-
b_2 Ширина головки	$20,0 \pm 0,2$		$20,0 \pm 0,5$
b_2 Ширина узкой (рабочей) части	$10,0 \pm 0,2$		$10,0 \pm 0,5$
h Рекомендуемая толщина	$4,0 \pm 0,2$		$4,0 \pm 0,4$ (от 1 до 10)
L_0 Рекомендуемая расчетная длина	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
Расчетная длина, используемая при контроле качества или указанная в нормативном или техническом документе на материал	$50,0 \pm 0,5$		
L Первоначальное расстояние между зажимами	115 ± 1	115 ± 1	115 ± 5

Рис. 2. Образец типа 1A

Fig. 2. Type 1A sample

(от англ. STereoLithography – формат файла, который описывает геометрию поверхности трехмерного объекта) для последующего импорта в слайсер (рис. 3).

Как было сказано ранее, в качестве материалов для исследования были выбраны термопластичные материалы: PLA+, TPU E95A и TPU 60D CFF.

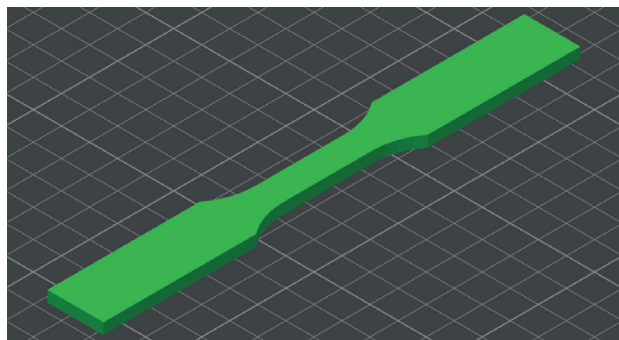


Рис. 3. 3D-модель образца типа 1A с изменениями

Fig. 3. Type 1A sample 3D model with alterations

PLA – это термопластичный филамент, получаемый из возобновляемых ресурсов, таких как кукурузный крахмал или сахарный тростник. PLA характеризуется низким уровнем усадки и хорошей детализированностью при 3D-печати. PLA широко используется для прототипирования и изготовления декоративных изделий. Однако материал имеет ограниченную стойкость к воздействию высоких температур и недостаточную гибкость, что ограничивает его применение в некоторых более требовательных областях [12–14].

Для расширения области применения PLA была разработана улучшенная версия – PLA+. Она сохраняет все основные преимущества стандартного PLA, такие как легкость в печати и низкий уровень усадки, но отличается улучшенными механическими свойствами. Добавление различных модификаторов в состав PLA+ повышает его прочность, тер-

мостойкость и долговечность. Эти улучшения делают PLA+ более подходящим для функциональных применений, где требуется не только высокая детализация, но и увеличение прочности и стойкости к внешним воздействиям. Для исследования был использован филамент eSun PLA+. Характеристики изучаемого филамента представлены в табл. 1.

TPU, в свою очередь, представляет собой гибкий и эластичный материал, который отличается высокой износостойкостью и устойчивостью к воздействию химических веществ [15–17].

Существуют различные модификации TPU, которые могут быть адаптированы для различных условий эксплуатации. Одной из таких модификаций является TPU 60D CFF, который отличается повышенной жесткостью и улучшенными механическими характеристиками по сравнению с другими типами TPU. В состав TPU 60D CFF входят углеродные волокна, которые повышают прочность и жесткость материала, сохраняя при этом его эластичность и устойчивость к воздействию внешних факторов. Для исследования был выбран филамент U3Print TPU

FLEX CFF 60D. Характеристики филамента представлены в табл. 2.

Еще одной модификацией является TPU E95A, который отличается повышенной эластичностью. TPU E95A обладает отличной устойчивостью к растяжению и высокими показателями упругости, что делает его идеальным для создания изделий, которые должны совмещать гибкость и устойчивость к механическим воздействиям, таким как прокладки, амортизаторы и другие детали, подвергающиеся значительным нагрузкам. Для исследования был выбран филамент eSUN TPU E95A (eSUN – бренд материалов для 3D-печати, основанный компанией Shenzhen Esun Industrial Co.). Характеристики филамента представлены в табл. 3.

Не менее важным является задание параметров печати образцов. Для этого 3D-модель образца была импортирована в программу-слайсер.

Исходя из предоставленных производителями характеристик, были заданы параметры печати для PLA+ (рис. 4), TPU E95A и TPU 60D CFF (табл. 4).

Таблица 1. Характеристики eSun PLA+

Table 1. eSun PLA+ specifications

	Производитель	eSUN
	Тип пластика	PLA+ (усиленный PLA)
	Диаметр нити	1,75 мм
	Температура плавления	205–225 °C
	Температура стола	45–60 °C
	Скорость печати	40–100 мм/с
	Плотность	1,24 г/см ³
	Предел прочности	63 МПа
	Относительное удлинение	20%

Таблица 2. Характеристики U3Print TPU FLEX CFF 60D

Table 2. U3Print TPU FLEX CFF 60D specifications

	Производитель	U3Print
	Тип пластика	TPU с углеволокном (>15%)
	Диаметр нити	1,75 мм
	Температура плавления	200–220 °C
	Температура стола	70 °C
	Скорость печати	20–50 мм/с
	Плотность	1,10 г/см ³
	Предел прочности	15,8 МПа
	Относительное удлинение	32,5%

Таблица 3. Характеристики eSUN TPU E95A**Table 3.** eSUN TPU E95A specifications

	Производитель	eSUN
	Тип пластика	TPU
	Диаметр нити	1,75 мм
	Температура плавления	220–250 °C
	Температура стола	45–60 °C
	Скорость печати	20–50 мм/с
	Плотность	1,21 г/см ³
	Предел прочности	35 МПа
	Относительное удлинение	>800 %

Таблица 4. Параметры печати**Table 4.** Print settings

Параметры печати	Материал образца		
	PLA+	TPU 60D CFF	TPU E95A
Высота слоя, мм	0,2	0,2	0,2
Толщина стенок, мм	1	0,8	0,8
Количество линий заполнения стенок	5	2	2
Толщина верха и низа, мм	1	1	1
Количество слоев верха и низа	5	5	5
Заполнение, %	30	30	30
Тип заполнения	Линейный	Линейный	Линейный
Скорость печати, мм/с	40	20	20
Скорость печати заполнения, мм/с	40	20	20
Скорость печати стенок, мм/с	20	10	10
Скорость печати внешних стенок, мм/с	40	10	10
Скорость печати внутренних стенок, мм/с	40	20	20
Скорость перемещения, мм/с	40	40	40
Расстояние ретракта, мм	4	8	8
Скорость обдува, %	100	100	100

Образцы печатаются с заполнением 30% и толщиной слоя в 0,2 мм, что является допустимым для проведения испытаний.

После задания настроек заготовки были отправлены на печать на FDM 3D-принтер. Процесс печати представлен на рис. 4.

Результатом печати стали образцы, представленные на рис. 5.

Таким образом была изготовлена партия по 5 образцов из каждого филамента (суммарно 15 экземпляров).

Испытания образцов осуществлялись на испытательной установке WDW-100E (рис. 6).

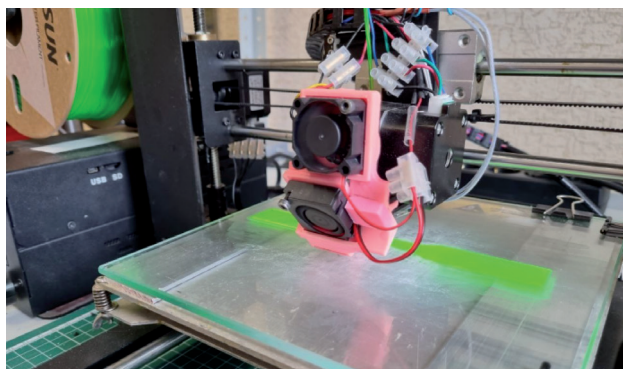


Рис. 4. Процесс печати образцов
Fig. 4. Sample printing process



Рис. 5. Полученные после печати образцы
Fig. 5. Samples obtained after printing



Рис. 6. Электромеханическая испытательная машина WDW-100E
Fig. 6. Electromechanical testing machine WDW-100E

Электромеханическая универсальная испытательная машина WDW-100E применяется для проведения статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб неметаллических материалов. А также для испытания цветных металлов, имеющих небольшие значения параметров прочности. Технические характеристики установки представлены в табл. 5.

Указанные технические характеристики оборудования позволяют провести экспериментальные исследования над полученными 3D-печатью образцами из различных термопластичных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заготовки были закреплены в захватах для плоских образцов и зажаты на расстоянии (L), указанном в ГОСТ 11262-2017⁵, тип 1А (см. рис. 2). Скорость испытания на разрыв составляла 5 мм/мин.

На рис. 7 представлен график «нагрузка-деформация», а в табл. 6 указаны экспериментальные значения образцов из PLA+.

Площадь поперечного сечения определялась по фактическим замерам напечатан-

Таблица 5. Технические характеристики WDW-100E
Table 5. WDW-100E specifications

Максимальная нагрузка, кН	100
Жесткость силовой рамы, кН/мм	300
Относительная погрешность измерения нагрузки, %	±1
Диапазон измерения нагрузки, %	0,4–100
Диапазон измерения деформации, %	2–100
Относительная погрешность измерения деформации, %	±1
Разрешение перемещения, мм	0,001
Относительная погрешность измерения перемещения, %	±1
Диапазон скоростей нагружения, мм/мин	0,005–500
Пределы допускаемой погрешности поддержания скорости нагружения, %	±1
Максимальное перемещение при растяжении, мм	600
Максимальное перемещение при сжатии, мм	600
Ширина рабочего пространства для испытаний, мм	600
Габаритные размеры, мм	1010×750×2210
Масса, кг	1100
Мощность, кВт	1,5
Электропитание	380±10В, 50 Гц, 3 фазы

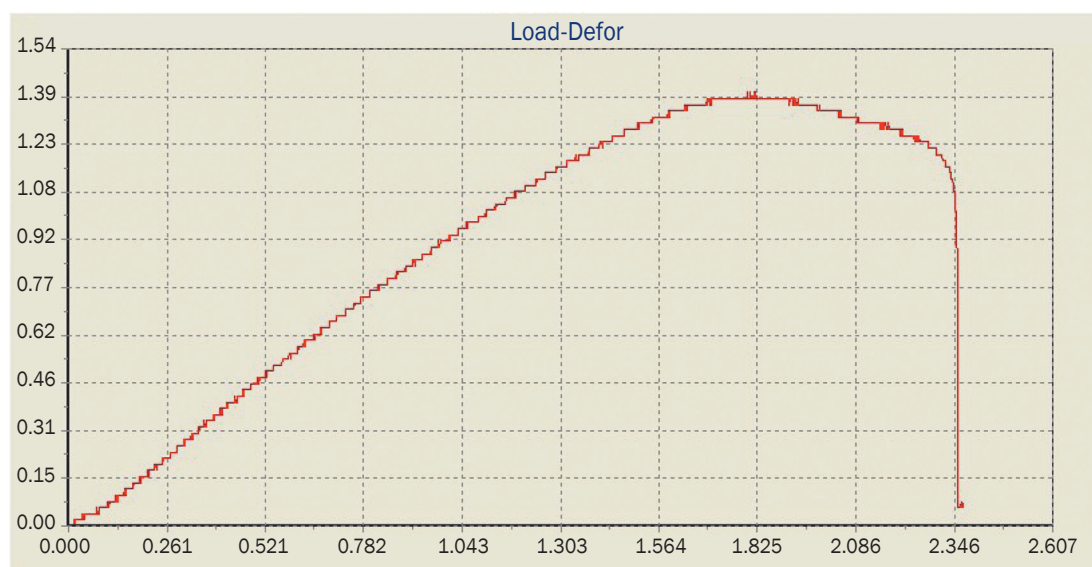


Рис. 7. График «нагрузка-деформация» для образцов из PLA+

Fig. 7. Load-strain diagram for PLA+ samples

Таблица 6. Экспериментально зафиксированные значения измерений параметров образцов из PLA+

Table 6. Experimentally determined measurements of PLA+ samples parameters

Показатель	Значение
Максимальная нагрузка F_m , кН	1,39
Фактическая площадь поперечного сечения S_0 , мм ²	38,5
Условное временное сопротивление разрыву R_m , МПа	36,1
Относительное удлинение A , %	4,5

ных образцов, что объясняет отличия от расчетного значения для образца.

В ходе испытания образцов из PLA+ с внутренним заполнением 30% была получена типичная диаграмма растяжения, отражающая хрупкое поведение материала. Максимальная нагрузка, зафиксированная на вершине диаграммы, составила 1,39 кН. При фактически измеренной площади поперечного сечения 38,5 мм² это соответствует условному временному сопротивлению разрыву на уровне 36,104 МПа. Полученное значение находится в нижнем диапазоне типичных прочностных характеристик для PLA+, что обусловлено особенностями структуры напечатанного образца (частичное заполнение) и влиянием параметров печати. Относительное удлинение при разрыве составило 4,5%, что подтверждает хрупкость материала. При таких условиях образец демонстрирует поведение, типичное для жестких термопластов без выраженной зоны пластической деформации.

На рис. 8 представлен график «нагрузка-деформация», а в табл. 7 указаны экспе-

риментальные значения образцов из TPU 60D CFF.

На начальном участке диаграммы наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и удлинением, что указывает на упругую деформацию без изменений в структуре материала. Наблюдается постепенное изменение наклона графика, что свидетельствует о переходе к пластической деформации. После достижения максимальной нагрузки график показывает серию небольших изменений наклона, что обусловлено неравномерной нагрузкой и локальными разрывами в материале, связанными с его слоистой структурой. Завершается график резким падением нагрузки, что свидетельствует о разрушении образца. Максимальная нагрузка, зафиксированная на графике, составила 0,57 кН, что при фактической площади поперечного сечения 37,43 мм² дает условное временное сопротивление разрыву 15,23 МПа. Этот показатель отражает умеренную прочность TPU 60D CFF и соответствует заявленным производителем характеристикам. Относительное удлинение при

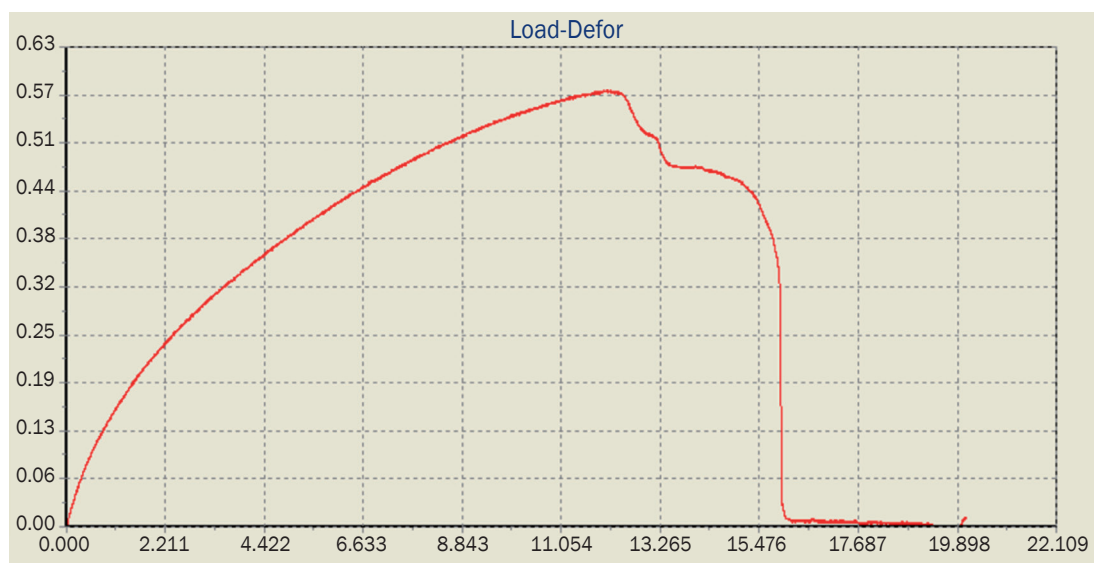


Рис. 8. График «нагрузка-деформация» для образцов из TPU 60D CFF
Fig. 8. Load-strain diagram for TPU 60D CFF samples

Таблица 7. Экспериментально зафиксированные значения измерений параметров образцов из TPU 60D CFF
Table 7. Experimentally determined measurements of TPU 60D CFF samples parameters

Показатель	Значение
Максимальная нагрузка F_m , кН	0,57
Фактическая площадь поперечного сечения S_0 , мм ²	37,43
Условное временное сопротивление разрыву R_m , МПа	15,23
Относительное удлинение A , %	30

разрыве составило 30%, что подтверждает высокую пластичность материала и его способность к значительным деформациям. Эти параметры говорят о том, что материал обладает хорошей эластичностью, однако его

прочность и устойчивость к разрыву могут быть ограничены из-за особенностей структуры и входящей в него примеси.

На рис. 9 представлен график «нагрузка-деформация», а в табл. 8 указаны экспе-

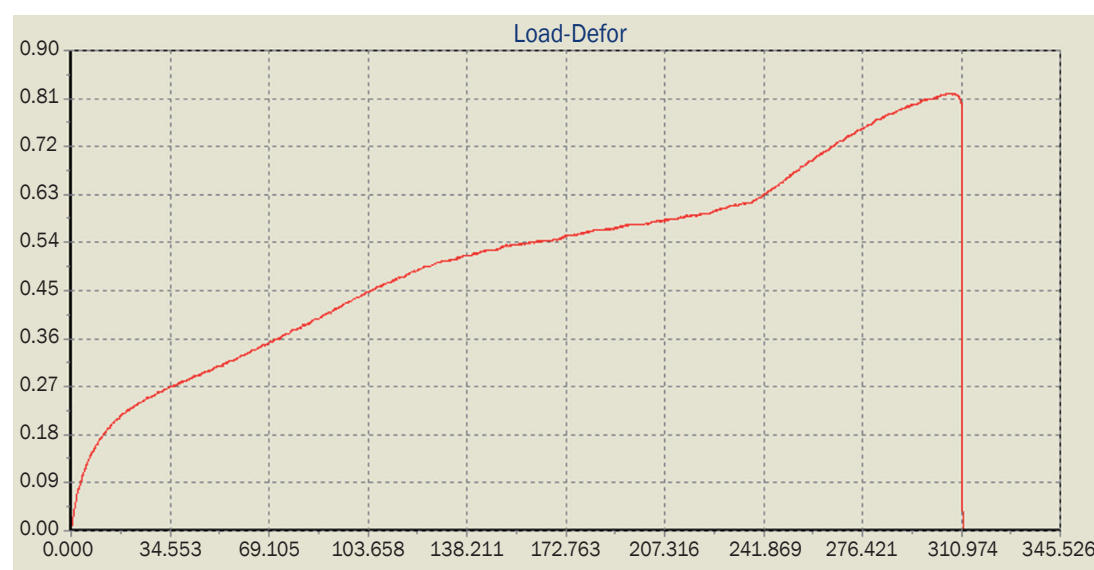


Рис. 9. Сравнение образцов
Fig. 9. Comparison of samples

Таблица 8. Экспериментально зафиксированные значения измерений параметров образцов из TPU E95A
Table 8. Experimentally determined measurements of TPU E95A samples parameters

Показатель	Значение
Максимальная нагрузка F_m , кН	0,81
Фактическая площадь поперечного сечения S_0 , мм ²	28,64
Условное временное сопротивление разрыву R_m , МПа	28,28
Относительное удлинение A , %	763,5

риментальные значения образцов из TPU E95A.

Диаграмма деформации TPU E95A на разрыв показывает последовательное изменение поведения материала в процессе растяжения. На начальном участке графика материал проявляет упругую деформацию, что отражается в линейной зависимости между нагрузкой и удлинением. По мере увеличения нагрузки кривая становится более полой, что свидетельствует о переходе материала в фазу пластической деформации. В этой области материал продолжает удлиняться при увеличении нагрузки, что указывает на развитие микропластических деформаций в его структуре. После достижения максимальной нагрузки происходит резкое снижение графика, что связано с разрушением материала. Максимальная нагрузка составила 0,814 кН. При фактически измеренной площади поперечного сечения 28,64 мм² это соответствует условному временному сопротивлению разрыву 28,28 МПа. Такое значение следует рассматривать как условное, поскольку образцы печатались с внутренним заполнением 30%, что снижает реальные прочностные характеристики по сравнению с полнотелыми образцами. Эти показатели характеризуют материал TPU E95A как эластичный с относительно хорошими прочностными свойствами, что характерно для термопластов с высокой гибкостью. Относительное удлинение при разрыве составило 763,5%, что подтверждает исключительную пластичность материала и его способность к значительным деформациям до разрушения.

Стоит зафиксировать изменение образца в момент проведения испытания (рис. 10). Его продольный размер после разрыва значительно превышает длину исходного образца, что связано с высоким относительным удлинением материала.

В ходе испытаний образцы разрушались как во внешних слоях, так и во внутренних (рис. 11).



Рис. 10. Изменение образца из TPU E95A
Fig. 10. Changes in the TPU E95A sample



Рис. 11. Деформация образцов после проведения испытаний
Fig. 11. Deformation of samples after testin

На основе полученных результатов испытаний можно произвести сравнение материалов для 3D-печати и их механических свойств.

ОБСУЖДЕНИЕ

Образцы, изготовленные из PLA+, продемонстрировали характерный для хрупких материалов тип разрушения, сопровождающийся частичной потерей материала, что свидетельствует о его низкой пластичности.

В отличие от PLA+, образцы из TPU 60D CFF, несмотря на наличие изломов, не потеряли значительного объема материала. Это объясняется упругими свойствами TPU: после прекращения внешнего воздействия волокна материала стремились вернуться в исходное положение. Была зафиксирована пластическая деформация. Внешние слои волокон в некоторых местах разорвались вдоль направлений слоев, что также свидетельствует о малом проценте пластической деформации.

Иной характер разрушения наблюдался у образцов из TPU E95A, который отличается более высокой пластичностью. На начальном этапе воздействия на образцы – разрушения происходили преимущественно внутри их структуры, что выражалось в сильной расслоенности материала. Далее, с увеличением нагрузки, разрушались внешние слои. Материал продолжал сохранять значительную пластичность, и после разрушения слои стремились восстановить первоначальное положение, что привело к заметному вытягиванию и изгибу заготовки вдоль слоев. Этот процесс подразумевает более высокую степень пластической деформации по сравнению с TPU 60D CFF.

Образцы, изготовленные из различных материалов, показали различные механические свойства, что позволяет сделать несколько важных выводов относительно печати и использования этих материалов в

различных областях. Ниже приведена сравнительная таблица образцов (табл. 9).

PLA+ продемонстрировал характерный для подобных пластмасс излом с частичной потерей материала. Это указывает на то, что PLA+ может быть использован для создания изделий, которые не подвергаются значительным механическим нагрузкам. TPU 60D CFF продемонстрировал эластичный и упругий характер разрушения. Этот материал оказался более устойчивым к деформации, что позволяет использовать его для создания гибких и амортизирующих деталей. TPU 60D CFF не потерял материал при разрушении, что говорит о его способности возвращаться в исходное состояние после воздействия внешней силы. TPU E95A показал отличающийся характер разрушения: разрушались внутренние слои, а затем слои внешнего периметра. Этот материал оказался самым пластичным среди рассмотренных и подходит для деталей, которые подвергаются значительным нагрузкам и деформациям.

В ходе проведения испытаний характеристики филаментов, указанные производителями, были подтверждены. Погрешностью измерений в данном случае являлся процент заполнения, равный 30%. Для повышения прочности изделий, напечатанных с использованием данных филаментов, рекомендуется использовать дополнительные методы обработки. Для PLA+ подойдет химическая или лазерная обработка, которая позволит добиться лучшего качества поверхности. TPU химическая обработка не подойдет из-за высокой стойкости материала. Эти методы могут значительно улучшить характеристики изделий, подвергающихся значительным нагрузкам.

Для повышения эффективности печати можно сделать выводы о выборе подходящих параметров внутреннего заполнения. В ходе изучения научной литературы [18–21] установлено, что структура и плотность заполнения

Таблица 9. Сравнение образцов
Table 9. Comparison of samples

Параметры, полученные при проведении испытаний	Материал образца		
	PLA+	TPU 60D CFF	TPU E95A
Максимальная нагрузка F_m , кН	1,39	0,57	0,81
Фактическая площадь поперечного сечения S_0 , мм ²	38,5	37,43	28,64
Условное временное сопротивление разрыву R_m , МПа	36,1	15,23	28,28
Относительное удлинение A , %	4,5	30	763,5

оказывают существенное влияние на механические характеристики и расход материала. Оптимизация внутренней геометрии позволяет снизить массу изделия на 25–35% при сохранении достаточной прочности. При использовании гексагонального заполнения с плотностью от 30 до 40% удается достичь уменьшения веса без потери прочности. Треугольное и ромбовидное заполнения оказываются особенно эффективными при более низкой плотности. В то же время линейные и решетчатые структуры используются в задачах, где необходима минимизация времени печати.

Важным параметром, дополняющим выбор структуры заполнения изделия, является ориентация модели при печати. Слои, уложенные в плоскости печатного стола, обеспечивают прочность при разрыве до 60 МПа, тогда как в перпендикулярном положении этот показатель снижается в несколько раз. Ориентация детали на платформе должна выбираться с учетом направления предполагаемых эксплуатационных нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что поведение различных термопластичных материалов отличается при механическом воздействии на них. Это позволяет сделать вывод о том, что выбор филамента, используемого для 3D-печати, играет ключевую роль в формировании прочностных характеристик будущего изделия. Сравнительный анализ показал преимущества материалов класса TPU при изготовлении деталей с повышенными требованиями к эластичности, тогда как PLA следует использовать для изделий, которые не подвергаются значительным механическим нагрузкам.

В дальнейшем целесообразно учитывать плотность заполнения и применение методов геометрической и топологической оптимизации для формирования более точных рекомендаций по достижению конкретных эксплуатационных характеристик изделий, изготавливаемых 3D-печатью по технологии FDM.

Список источников

1. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кадамов Е.А., Гайнутдинов Т.М., Нагопетьян Е.М. [и др.]. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. С. 123. EDN: YJKSTJ.
2. Белоусов А.В., Храпов С.С., Тен А.В., Садчиков Н.В., Болдырева Ю.А. Параллельный FDM-принтер // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2016. № 4. С. 116–131. <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2016.4.9>. EDN: XDBQNH.
3. Рябина О.А., Левин Д.Ю., Свиридов Д.А., Алешина А.Э. Проблемы, возникающие в процессе литья по выплавляемым моделям с применением 3D печати методом FDM // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. II Всерос. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 11–12 апреля 2024 г.). Воронеж: Университетская книга, 2024. С. 304–308. EDN: NNOYIB.
4. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. С. 66. EDN: LSMZMB.
5. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765–776. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776>. EDN: ZEUQGN.
6. Levin D., Kuzovkin A. Laser polishing as method of improving surface quality of fused deposition modeling (FDM) parts made by metal-filled plastic // Антропоцентрические науки в образовании: вызовы, трансформации, ресурсы: сб. науч. ст. Междунар. форума профессионального образования (г. Воронеж, 9–10 апреля 2024 г.). Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. Р. 350–353. EDN: LXPTJB.
7. Balasubramanian M., Saravanan R., Yang Yo-Lun, Sathish T., Shanmugam V. Exploring the synergistic influence of FDM parameters and strain rate on tensile strength and failure mechanism of FDM printed PLA // Progress in Additive Manufacturing. 2024. Vol. 10. Iss. 4. P. 2765–2774. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00782-y>.
8. Левин Д.Ю., Подшибякин М.Е., Рябина О.А., Болдырев А.И. Экспериментальное исследование различных способов постобработки пластиковых деталей, изготовленных методом 3D-печати // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 322–335. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-322-335>. EDN: OPPOEU.
9. Запольский И.С., Левин Д.Ю., Рябина О.А. Анализ проблем, возникающих при эксплуатации настольных 3D-принтеров с открытым типом конструкции // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения «АПИР-28»: сб. науч. тр. Национальной науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Тула, 13–15 ноября 2023 г.). Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 249–252. EDN: FKOCZF.
10. Khodae A., Abedini V., Kami A. Effects of fused filament fabrication (FFF) process parameters on tensile and flexural properties of ABS/PLA multi-material // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2024. Vol. 46. P. 628. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05189-y>.

11. Mathew A., Kishore S.R., Tomy A.T., Sugavaneswaran M., Scholz S.G., Elkaseer A., et al. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts // *Progress in Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 8. P. 1161–1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>. EDN: ASYRUS.
12. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107. P. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.
13. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 24. P. 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.
14. Faizaan M., Shenoy Baloor S., Nunna S., Mallya R., Rao Udupi S., Ramanath Kini Ch., et al. A study on the overall variance and void architecture on MEX-PLA tensile properties through printing parameter optimisation // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Iss. 1. P. 3103. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87348-2>. EDN: WINNDL.
15. Farid M.I., Wu Wenzheng, Li Guiwei, Zheng Aodu, Zhao Yu. Superior tensile properties of FDM 3D-printed TPU/E-TPU layered structure // *Journal of Materials Research*. 2024. Vol. 39. Iss. 14. P. 2051–2066. <https://doi.org/10.1557/s43578-024-01365-x>. EDN: ULVSVV.
16. Nofar M., Mohammadi M., Carreau P.J. Effect of TPU hard segment content on the rheological and mechanical properties of PLA/TPU blends // *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137. Iss. 45. P. e49387. <https://doi.org/10.1002/app.49387>. EDN: PGQXAN.
17. Emami N. Additive manufacturing of TPU and hybrid TPU-PLA formwork for custom repetitive precast concrete // *Journal of Architectural Engineering*. 2024. Vol. 30. Iss. 3. P. 1–16. <https://doi.org/10.1061/jaeied.aeeng-1764>. EDN: DBHKSP.
18. Murali A., Subhash N.N., Deepu D.R., Velayudhan S., Parameswaran R. Design of experiment to optimize the printing parameters on tensile properties of 3D printed ethylene vinyl acetate (EVA) // *Progress in Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 10. Iss. 8. P. 5507–5523. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00921-5>.
19. Болдырев А.А., Левин Д.Ю., Рябинина О.А., Болдырев А.И. К вопросу технологичности изделий сниженной массы в авиационной и ракетно-космической технике, полученных с помощью дегенеративного дизайна // *Воронежский научно-технический Вестник*. 2021. Т. 4. № 4. С. 29–35. <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-29-35>. EDN: ZFEYJS.
20. Aboelella M.G., Ebeid S.J., Sayed M.M. Layer combination of similar infill patterns on the tensile and compression behavior of 3D printed PLA // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Iss. 1. P. 11759. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94446-8>.
21. Распопина В.Б., Мартынова В.В., Ступина Е.А. Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия // *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 4. С. 477–487. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.

References

1. Goncharova O.N., Berezhnoj U.M., Bessarabov E.N., Kadamov E.A., Gaynutdinov T.M., Nagopetyan E.M., et al. Additive technology is a dynamically developing production. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2016;4:123. (In Russ.). EDN: YJKSTJ.
2. Belousov A.V., Khrapov S.S., Ten A.V., Sadchikov N.V., Boldyreva Yu.A. Parallel FDM printer. *Mathematical Physics and Computer Simulation*. 2016;4:116-131. (In Russ.). <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2016.4.9>. EDN: XDBQHJ.
3. Ryabinina O.A., Levin D.Yu., Sviridov D.A., Aleshina A.E. Problems arising in the process of casting by the lost-wax process with 3D printing using the FDM method. In: *Development prospects of the processing technology and equipment in mechanical engineering: Collected scientific articles of the 2nd All-Russian scientific and technical conference*. 11–12 April 2024, Voronezh. Voronezh: Universitetskaya kniga; 2024, p. 304-308. (In Russ.). EDN: NNOYIB.
4. Balashov A.V., Markova M.I. Study of the structure and properties of products obtained by 3D printing. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2019;1:66. (In Russ.). EDN: LSMZMB.
5. Petrov V.M., Bezpal'chuk S.N., Yakovlev S.P. 3D-printing from plastics: inner structure influence on the strength. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2017;9(4):765-776. (In Russ.). <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776>. EDN: ZEUQGN.
6. Levin D., Kuzovkin A. Laser polishing as method of improving surface quality of fused deposition modeling (FDM) parts made by metal-filled plastic. In: *Anthropocentric sciences in education: challenges, transformations, resources: Collected scientific articles of the International forum of professional education*. 9–10 April 2024, Voronezh. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2024, p. 350-353. (In Russ.). EDN: LXPTJB.
7. Balasubramanian M., Saravanan R., Yang Yo-Lun, Sathish T., Shanmugam V. Exploring the synergistic influence of FDM parameters and strain rate on tensile strength and failure mechanism of FDM printed PLA. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024;10(4):2765-2774. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00782-y>.
8. Levin D.Yu., Podshibyakin M.E., Riabinina O.A., Boldyrev A.I. Experimental study of different methods for post-processing plastic parts manufactured by 3D printing. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):322-335. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-322-335>. EDN: OPPOEU.

9. Zapolskii I.S., Levin D.Yu., Ryabinina O.A. Analysis of problems arising during operation of desktop 3D printers with an open type of design. In: *Bulletin of Tula State University. Automation: problems, ideas, solutions "APIR-28" Collected scientific works of the National scientific and technical conference with international participation*. 13–15 November 2023, Tula. Tula: Tula State University; 2023, p. 249-252. (In Russ.). EDN: FKOCZF.
10. Khodae A., Abedini V., Kami A. Effects of fused filament fabrication (FFF) process parameters on tensile and flexural properties of ABS/PLA multi-material. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024;46:628. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05189-y>.
11. Mathew A., Kishore S.R., Tomy A.T., Sugavaneswaran M., Scholz S.G., Elkaseer A., et al. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts. *Progress in Additive Manufacturing*. 2023;8:1161-1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>. EDN: ASYRUS.
12. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials. *Procedia CIRP*. 2022;107:15-20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.
13. Corapi D., Moretti G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity*. 2019;24:289-295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.
14. Faizaan M., Shenoy Baloor S., Nunna S., Mallya R., Rao Udupi S., Ramanath Kini Ch., et al. A study on the overall variance and void architecture on MEX-PLA tensile properties through printing parameter optimization. *Scientific Reports*. 2025;15(1):3103. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87348-2>. EDN: WINNDL.
15. Farid M.I., Wu Wenzheng, Li Guiwei, Zheng Aodu, Zhao Yu. Superior tensile properties of FDM 3D-printed TPU/E-TPU layered structure. *Journal of Materials Research*. 2024;39(14):2051-2066. <https://doi.org/10.1557/s43578-024-01365-x>. EDN: ULVSVV.
16. Nofar M., Mohammadi M., Carreau P.J. Effect of TPU hard segment content on the rheological and mechanical properties of PLA/TPU blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020;137(45):e49387. <https://doi.org/10.1002/app.49387>. EDN: PGQXAN.
17. Emami N. Additive manufacturing of TPU and hybrid TPU-PLA formwork for custom repetitive precast concrete. *Journal of Architectural Engineering*. 2024;30(3):1-16. <https://doi.org/10.1061/jaeied.aeeng-1764>. EDN: DBHKSP.
18. Murali A., Subhash N.N., Deepu D.R., Velayudhan S., Parameswaran R. Design of experiment to optimize the printing parameters on tensile properties of 3D printed ethylene vinyl acetate (EVA). *Progress in Additive Manufacturing*. 2024;10(8):5507-5523. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00921-5>.
19. Boldyrev A.A., Levin D.Yu., Riabinina O.A., Boldyrev A.I. On the question of reduced mass articles technological effectiveness in aviation and rocket-space equipment accessed with degenerative design. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2021;4(4):29-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-29-35>. EDN: ZFEYJS.
20. Aboeella M.G., Ebeid S.J., Sayed M.M. Layer combination of similar infill patterns on the tensile and compression behavior of 3D printed PLA. *Scientific Reports*. 2025;15(1):11759. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94446-8>.
21. Raspopina V.B., Martynova V.V., Stupina E.A. Effect of FDM printing direction on the mechanical properties of products. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):477-487. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Левин Дмитрий Юрьевич,
старший преподаватель,
кафедра графики, конструирования
и информационных технологий
в промышленном дизайне,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
levin_du@cst-eg.ru

Болдырев Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
машиностроения,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж,
Московский просп., 14, Россия
aiboldyrev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii Yu. Levin,
Senior Lecturer,
Department of Graphics, Design and
Information Technologies in Industrial Design,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt,
Voronezh 394026, Russia
levin_du@cst-eg.ru

Aleksandr I. Boldyrev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt,
Voronezh 394026, Russia
aiboldyrev@mail.ru

Подшибякин Максим Евгеньевич,
магистрант,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж,
Московский просп., 14, Россия
yashirosh.kun@gmail.com

Maksim E. Podshibyakin,
Master's Degree Student,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt,
Voronezh 394026, Russia
yashirosh.kun@gmail.com

Рябинина Ольга Алексеевна,
аспирант,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж,
Московский просп., 14, Россия
✉ ryabinina_olya@mail.ru

Olga A. Riabinina,
Postgraduate Student,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt,
Voronezh 394026, Russia
✉ ryabinina_olya@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Болдырев Александр Иванович является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

Aleksandr I. Boldyrev has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.10.2025 г.; одобрена после рецензирования 26.12.2025 г.; принята к публикации 12.01.2026 г.

Information about the article

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 26.12.2025; accepted for publication 12.01.2026.