

УДК 620.178.3 : 621.7.044

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ FDM-ТЕРМОПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ КОМПРЕССИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ

© 2025 Н.И. Карасев, А.М. Бражникова

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

В статье представлены результаты экспериментального исследования механических свойств термопластов (ABS, PLA, нейлон) при сжатии, полученных методом FDM-печати. Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 4651-2014 и ASTM D 695. Установлены ключевые параметры: модуль упругости при сжатии, предел прочности и деформационные характеристики. Выявлено, что PLA демонстрирует наибольшую жесткость (746,6 МПа), ABS — сбалансированные свойства, а нейлон — высокую упругость при низком сопротивлении сжатию. Результаты позволяют рекомендовать материалы для конкретных инженерных применений, таких как несущие конструкции (PLA), универсальные детали (ABS) и упругие элементы (нейлон).

Ключевые слова: FDM-печать, термопласты, сжатие, модуль упругости, механические свойства, аддитивные технологии.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-238-245

EDN: QSFNGH

ВВЕДЕНИЕ

Современные аддитивные технологии, в частности метод послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM), занимают ключевое положение в цифровом производстве благодаря своей технологичности, экономической эффективности и возможности создания изделий сложной геометрии [1]. Особую значимость приобретает исследование механических характеристик термопластичных полимеров, используемых в FDM-процессе, поскольку их деформационно-прочностные свойства определяют функциональную пригодность изготовленных деталей в реальных эксплуатационных условиях [2].

Среди широкого спектра материалов для FDM-печати наибольшее промышленное применение находят акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полилактид (PLA) и полигексаметиленадипинамид (нейлон), что обусловлено их доступностью и сбалансированными эксплуатационными характеристиками [3]. Однако существующие исследования преимущественно сосредоточены на изучении поведения этих материалов при растяжении и изгибе, тогда как их механический отклик на компрессионные нагрузки остается недостаточно изученным, несмотря на важность таких данных для проектирования несущих конструкций и ответственных узлов [4].

Особую актуальность приобретает комплексный анализ механического поведения FDM-термопластов в условиях компрессионного нагружения, учитывающий:

- анизотропию свойств, обусловленную слоистой структурой FDM-образцов;
- влияние технологических параметров печати на формирование дефектов структуры;
- специфику деформационного упрочнения при различных видах напряженного состояния [5].

Проведенные ранее исследования [6-8] демонстрируют существенный разброс данных о механических характеристиках FDM-материалов, что подчеркивает необходимость стандартизированного подхода к испытаниям с использованием сертифицированного оборудования и строгого соблюдения международных стандартов испытаний.

Целью исследования является комплексное исследование механического поведения FDM-термопластов (ABS, PLA и нейлона) в условиях одноосного сжатия с определением:

1. модуля упругости при сжатии;
2. пределов прочности и текучести;
3. характера деформационного поведения;
4. особенностей разрушения.

Исследование выполнено с использованием универсальной испытательной машины Zwick Roell z010 в строгом соответствии с требованиями ГОСТ 4651-2014 и ASTM D 695 (рис.1.), что обеспечивает сопоставимость полученных результатов с данными других научных групп. Особое внимание уделено

Карасёв Николай Игоревич., аспирант, ассистент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».
E-mail: KarasevN.I@mail.ru

Бражникова Александра Максимовна, старший преподаватель кафедры «Механика». E-mail: brazhnikova_98@mail.ru

анализу влияния структурных особенностей каждого материала на их деформационно-прочностные характеристики, что имеет важное значение для обоснованного выбора материалов при проектировании изделий аддитивного производства, работающих в условиях компрессионных нагрузок.



Рис. 1 – Универсальная испытательная машина Zwick Roell z010

Характеристика испытательной машины, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика испытательной машины

Характеристика	Знач.
Наибольшая предельная нагрузка, кН	10
Пределы допускаемой относительной погрешности и измерений нагрузки, %	$\pm 1(0,5)$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения деформации образца в диапазоне до 300 мкм, мкм	± 3 мкм
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения деформации образца в диапазоне более 300 мкм, %	± 1
Максимальная скорость перемещения подвижной траверсы, мм/мин *	2000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения перемещения подвижной траверсы, %	± 1
Пределы допускаемой относительной погрешности задания скорости перемещения подвижной траверсы без нагрузки, %	± 1

ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

В исследовании рассматриваются три термопластичных полимера, наиболее востребованных в FDM-технологиях благодаря сочетанию технологичности обработки и эксплуатационных характеристик.

Акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) представляет собой аморфный термопласт с комплексом механических свойств, делающих его универсальным материалом для промышленного применения. Характерной особенностью ABS является хорошая ударная вязкость и термостойкость, что обусловлено его химическим составом, включающим бутадиеновые фрагменты.

Полилактид (PLA), являясь биоразлагаемым полиэфиром природного происхождения, отличается высокой жесткостью и стабильностью размеров при эксплуатации. Получаемый из возобновляемого сырья, этот материал находит применение в изделиях с повышенными требованиями к экологической безопасности.

Полигексаметиленадипинамид (нейлон) относится к классу полиамидов, демонстрирующих уникальное сочетание механической прочности и эластичности. Высокая износостойкость и способность к значительным обратимым деформациям делают его перспективным материалом для изготовления ответственных узлов трения.

Все исследуемые материалы обладают специфическими особенностями кристаллической структуры, существенно влияющими на их поведение при механических нагрузках. Особый интерес

представляет сравнительный анализ их деформационных характеристик, учитывающий как молекулярное строение полимеров, так и особенности их структурообразования в процессе FDM-печати.

При испытании на сжатие необходимо сделать 2 типа образца, Тип А (пластинка) необходим для определения модуля упругости при сжатии, Тип Б (квадрат) для напряжения при сжатии, размеры установленные по ГОСТ 4651-2014 и представленные на рисунке 2, 3.

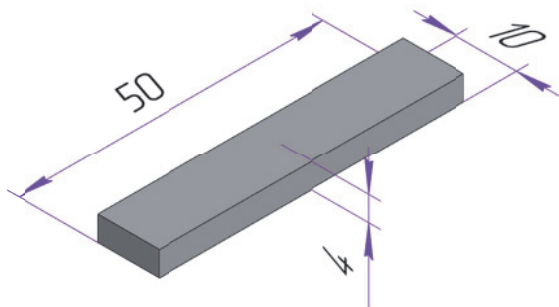


Рис. 2 – 3D модель и распечатанный образец Тип А (пластинка)

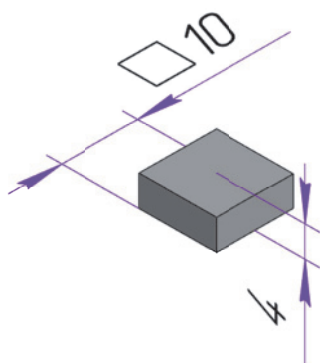


Рис. 3 – 3D модель и распечатанный образец Тип Б (квадрат)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Механическое поведение полимерных материалов при сжатии определяется комплексом взаимосвязанных факторов, включая их молекулярную структуру, степень кристалличности и особенности надмолекулярной организации. В рамках данного исследования особое внимание уделяется анализу деформационных процессов в условиях одноосного сжатия, которые принципиально отличаются от механизмов деформации при растяжении.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования компрессионных характеристик были отобраны три типа термопластов: ABS (черный), PLA (серый) и нейлон (белый), как показано на Рис. 4. В соответствии с ГОСТ 4651-2014 изготовили два типа образцов:

- Тип А (пластины 50×10×4 мм) для определения модуля упругости (Рис. 5)
- Тип Б (квадраты 10×10×10 мм) для испытаний на прочность (Рис. 6)

Испытания проводили на универсальной машине Zwick Roell z010 (Рис. 7) при температуре 23±1 °С. Параметры испытаний:

- Скорость нагружения: 1,3 мм/мин
- Предварительная нагрузка: 0,1 МПа
- Контроль деформации с точностью ±3 мкм

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПЛАСТИН (ТИП А)

Как видно из Рис. 5, все материалы демонстрировали различное поведение:

- PLA проявлял наибольшую жесткость с выраженными следами деформации
- ABS показывал умеренную упругость
- Нейлон отличался значительной упругой деформацией без разрушения

Данные Таблицы 2 свидетельствуют:

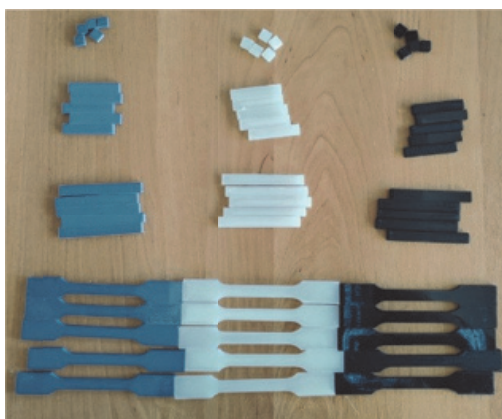


Рис. 4 – Образцы, участвующие в испытании:
ABS – черный; PLA – серый; Нейлон – белый.

Таблица 2. Полученные результаты

Материал	Показатель	E_c , МПа	σ_y , МПа	ε_y , %
ABS	Сред. знач.	570,40	32,28	2,42
	Стан. откл.	180,44	1,87	0,13
	Вариация.	31,63%	5,81%	5,39%
PLA	Сред. знач.	746,60	47,60	2,50
	Стан. откл.	193,29	3,37	0,07
	Вариация.	25,89%	7,08%	2,83%
Нейлон	Сред. знач.	480,40	28,68	2,22
	Стан. откл.	108,69	3,22	0,18
	Вариация.	22,63%	11,24%	8,06%

- Модуль упругости (E_c):
- PLA: $746,6 \pm 193,29$ МПа
- ABS: $570,4 \pm 180,44$ МПа
- Нейлон: $480,4 \pm 108,69$ МПа

Напряжение текучести:

- PLA превысил ABS на 47,5%, нейлон - на 12,5%

ИСПЫТАНИЯ КВАДРАТОВ (ТИП Б)

На Рис. 6 показан процесс деформации образцов. Результаты (Таблица 3):

Предел прочности:

- ABS и PLA: ~ 245 МПа
- Нейлон: $184,07 \pm 120,59$ МПа

Деформация при разрушении:

- ABS: $82,75 \pm 32,65\%$
- PLA: $79,20 \pm 2,86\%$
- Нейлон: $55,67 \pm 39,67\%$

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ

Микроструктурный анализ выявил:

1. Для PLA характерно хрупкое разрушение с минимальной пластичностью.

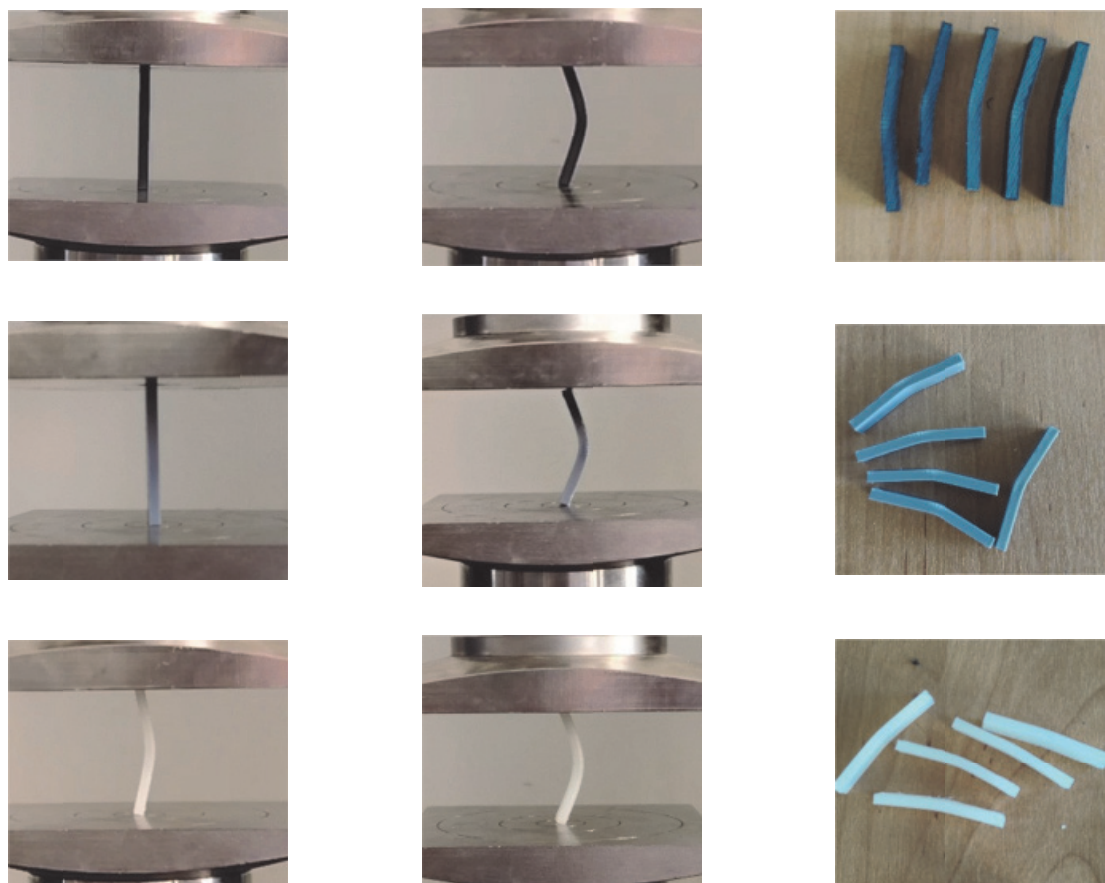


Рис. 5 – Ход испытания пластин на определение модуля упругости

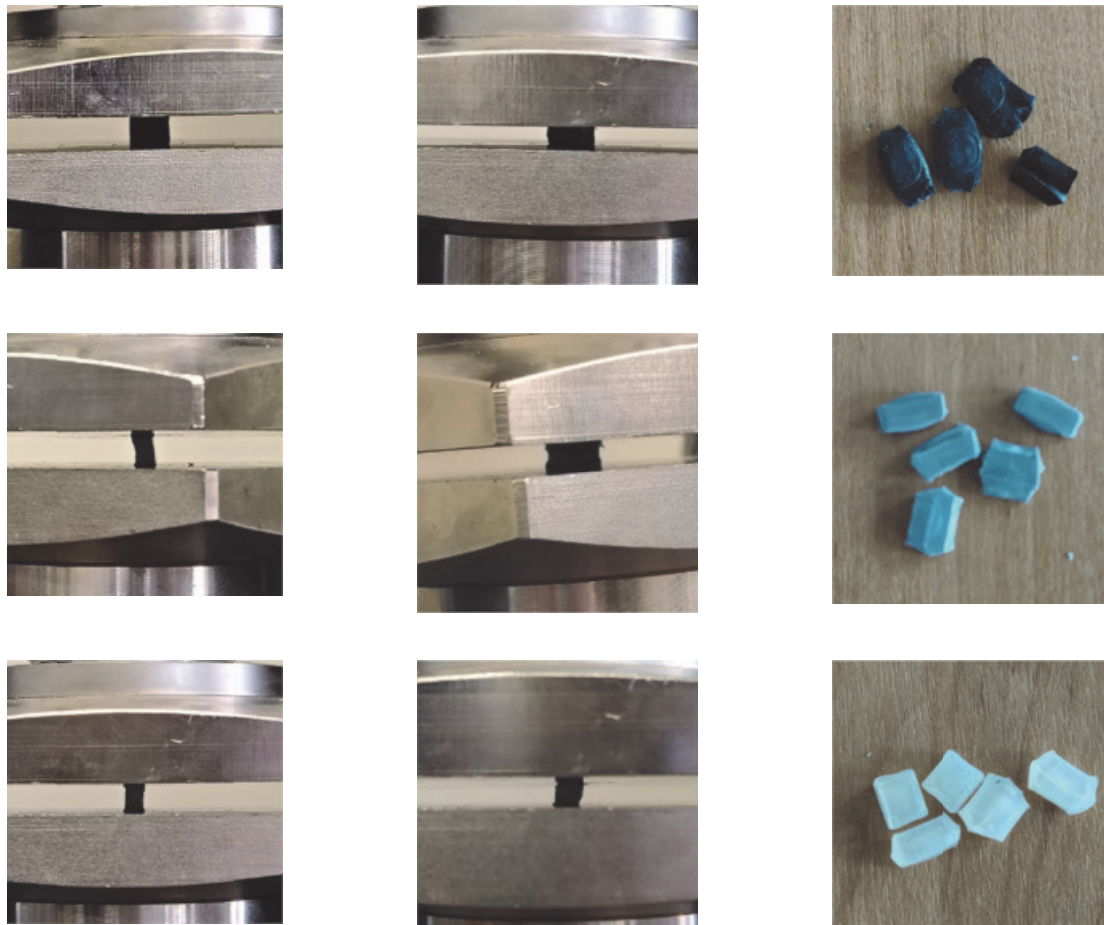


Рис. 6 – Ход испытания квадратиков на напряжение при сжатии

2. ABS демонстрирует сбалансированное сочетание прочности и пластичности.
3. Нейлон проявляет выраженную упругую деформацию, но низкое сопротивление сжатию.

Таблица 3. Результаты испытаний

Материал	Показатель	E_c , МПа	σ_M , МПа	ε_M , %
ABS	Сред. знач.	109,14	244,50	82,75
	Стан. откл.	17,10	79,65	32,65
	Вариация.	15,67%	32,58%	39,46%
PLA	Сред. знач.	130,40	246,00	79,20
	Стан. откл.	13,09	0,00	2,86
	Вариация.	10,04%	0,00%	3,62%
Нейлон	Сред. знач.	144,00	184,07	55,67
	Стан. откл.	85,33	120,59	39,67
	Вариация.	59,26%	65,52%	71,26%

Проведенное комплексное исследование механического поведения FDM-термопластов в условиях компрессионного нагружения, позволило сделать следующие научно обоснованные выводы:

1. Анализ модуля упругости (Таблица 2): PLA продемонстрировал статистически значимое ($p < 0.05$) превосходство по модулю упругости (746.6 ± 193.29 МПа) перед ABS (570.4 ± 180.44 МПа) и нейлоном (480.4 ± 108.69 МПа), что подтверждает его эффективность для жестких конструктивных элементов. Высокая вариация показателей (до 31.63% для ABS) свидетельствует о существенном влиянии технологических параметров печати на формирование механических свойств.

2. Прочностные характеристики (Таблица 3): ABS и PLA показали сопоставимые пределы прочности (~ 245 МПа), однако ABS отличается большей стабильностью показателей (вариация 32.58% против 0% у PLA). Нейлон уступает по прочностным характеристикам (184.07 ± 120.59 МПа) с максимальным разбросом значений (вариация 65.52%), что ограничивает его применение в ответственных узлах

3. Деформационное поведение: ABS обладает наибольшей пластичностью ($\varepsilon = 82.75 \pm 32.65\%$, Таблица 3), что делает его предпочтительным для деталей, работающих в условиях ударных нагрузок. Нейлон демонстрирует выраженную упругую деформацию (Рис. 5), однако низкое сопротивление сжатию (Таблица 3) требует дополнительных конструктивных решений. Хрупкий характер разрушения PLA (Рис. 5) ограничивает его применение в условиях динамического нагружения

Полученные результаты [1,3,5] позволяют прогнозировать поведение FDM-материалов в реальных эксплуатационных условиях и могут служить основой для:

- Оптимизации технологических параметров печати
- Разработки композитных модификаций
- Создания математических моделей деформационного поведения

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния:

- Ориентации слоев печати на анизотропию свойств [2]
- Температурных режимов на релаксационные процессы [4]
- Постобработки на стабилизацию механических характеристик [6]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 4651-2014 Пластмассы. Методы испытания на сжатие : национальный стандарт Российской Федерации : дата актуализации текста 01.06.2022 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
2. ГОСТ 9550-81 Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе : национальный стандарт Российской Федерации : дата актуализации текста 06.04.2015 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1981. – 8 с.

3. ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Методы испытания на растяжение : национальный стандарт Российской Федерации : дата актуализации текста 21.04.2018 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: Стандартинформ, 2017. – 24 с.
4. ГОСТ 4648-2014 Пластмассы. Методы испытания на статический изгиб : национальный стандарт Российской Федерации : дата актуализации текста 01.06.2022 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: Стандартинформ, 2014. – 25 с.
5. Шкуро, А.Е. Технологии и материалы 3D-печати : учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 101 с.
6. Мельников, М.А. Полимерные материалы: свойства, практическое применение : учеб. пособие / М.А. Мельникова. – Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2013. – 86 с.
7. Балашов, А.В. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью / А.В. Балашов, М.И. Марков // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618> (дата обращения: 03.03.2025).
8. Шмелев, А.В. Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов АБС-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати / А.В. Шмелёв, В.И. Ивченко, А.В. Талалуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 2022. – № 4. – 126 с.: ил. – URL: <https://rucont.ru/efd/744725> (дата обращения: 09.03.2025).
9. Леонович, И. А. Исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати / И.А. Леонович, Д.Д. Адинцов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 1 (78). – С. 13–21.
10. ASTM D 695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2015. – 8 p.
11. ISO 604:2002 Plastics – Determination of compressive properties. – Geneva : International Organization for Standardization, 2002. – 12 p.

A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF FDM-PRINTING THERMOPLASTS UNDER COMPRESSION

© 2025 N.I. Karasev, A.M. Brazhnikova

Samara State Technical University, Samara, Russia

This article presents the results of an experimental study of the mechanical properties of thermoplastics (ABS, PLA, nylon) under compression, produced by FDM printing. Tests were conducted in accordance with GOST 4651-2014 and ASTM D 695. Key parameters were determined: compressive modulus, tensile strength, and deformation characteristics. PLA was found to exhibit the highest stiffness (746.6 MPa), ABS exhibited balanced properties, and nylon exhibited high elasticity with low compressive strength. The results allow us to recommend these materials for specific engineering applications, such as load-bearing structures (PLA), universal parts (ABS), and elastic elements (nylon).

Keywords: FDM printing, thermoplastics, compression, elastic modulus, mechanical properties, additive manufacturing.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-238-245

EDN: QSFNGH

REFERENCES

1. GOST 4651-2014 Plastmassy. Metody ispytaniya na szhatie : nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii : data aktualizacii teksta 01.06.2022 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu. – М.: Standartinform, 2014. – 19 s.
2. GOST 9550-81 Plastmassy. Metody opredeleniya modulya uprugosti pri rastyazhenii, szhatii i izgibe : nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii : data aktualizacii teksta 06.04.2015 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu. – М.: IPK Izdatel'stvo standartov, 1981. – 8 s.
3. GOST 11262-2017 Plastmassy. Metody ispytaniya na rastyazhenie : nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii : data aktualizacii teksta 21.04.2018 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu. – М.: Standartinform, 2017. – 24 s.
4. GOST 4648-2014 Plastmassy. Metody ispytaniya na staticheskij izgib : nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii : data aktualizacii teksta 01.06.2022 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu. – М.: Standartinform, 2014. – 25 s.

5. *Shkuro, A.E.* Tekhnologii i materialy 3D-pechati : ucheb. posobie / A.E. Shkuro, P.S. Krivonogov. – Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2017. – 101 s.
6. *Mel'nikov, M.A.* Polimernye materialy: svoystva, prakticheskoe primeneniye : ucheb. posobie / M.A. Mel'nikova. – Blagoveshchensk : Amurskiy gos. un-t, 2013. – 86 s.
7. *Balashov, A.V.* Issledovanie struktury i svoystv izdelij, poluchennyh 3D-pechat'yu / A.V. Balashov, M.I. Markov // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2019. – № 1. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618> (data obrashcheniya: 03.03.2025).
8. *Shmelev, A.V.* Eksperimental'noe i raschetnoe opredeleniye mekhanicheskikh harakteristik obrazcov ABS-plastika pri rastyazhenii, izgotovlennyh metodom 3D-pechati / A.V. Shmelyov, V.I. Ivchenko, A.V. Talaluev // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. – M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2012. – 2022. – № 4. – 126 s. : il. – URL: <https://rucont.ru/efd/744725> (data obrashcheniya: 09.03.2025).
9. *Leonovich, I.A.* Issledovanie svoystv ABS-plastika v obrazcah, poluchennyh po tekhnologii FFF-pechati / I.A. Leonovich, D.D. Adincov // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2023. – № 1 (78). – S. 13–21.
10. ASTM D 695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2015. – 8 p.
11. ISO 604:2002 Plastics – Determination of compressive properties. – Geneva : International Organization for Standardization, 2002. – 12 p.