

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ
ТЕРМОПЛАСТОВ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ FDM-ТЕХНОЛОГИИ**

© 2025 Н.И. Карасев, И. Б. Воробьев

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

В работе представлен комплексный анализ механического поведения трех структурно-различных термопластов (ABS, PLA и полигексаметиленадипинамида) при одноосном растяжении в условиях послойного синтеза. Методами механических испытаний и фрактографического анализа установлены ключевые закономерности деформационного поведения в зависимости от молекулярной архитектуры полимеров. Показано, что нейлон демонстрирует уникальное сочетание высоких прочностных характеристик ($\sigma_b = 56,88$ МПа) и пластичности ($\epsilon_b = 9,02\%$), обусловленное особенностями надмолекулярной структуры. Результаты дополнены анализом анизотропии механических свойств, вызванной технологическими параметрами FDM-процесса.

Ключевые слова: аддитивные технологии, термопласты, деформационное поведение, полигексаметиленадипинамид, анизотропия свойств, фрактографический анализ.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-231-237

EDN: QKJUIY

ВВЕДЕНИЕ

Современные аддитивные технологии, такие как FDM-печать (Fused Deposition Modeling), находят широкое применение в промышленности благодаря возможности быстрого прототипирования и изготовления деталей сложной геометрии [1]. Одними из наиболее распространённых материалов для FDM-печати являются термопласты, среди которых особое место занимают ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) и PLA (полилактид) [2].

ABS традиционно используется в производстве корпусных деталей, автомобильных компонентов и бытовой техники благодаря своей ударной вязкости и термостойкости [3]. PLA, в свою очередь, привлекает внимание благодаря биоразлагаемости и высокой жёсткости, что делает его востребованным в медицинских и пищевых применениях [4]. Однако, несмотря на активное использование этих материалов, их сравнительные механические свойства при FDM-печати остаются недостаточно изученными, особенно в контексте влияния параметров печати на конечные характеристики изделий [5].

В работах [6, 7] рассматриваются отдельные аспекты механического поведения ABS и PLA, однако комплексные исследования, включающие испытания на растяжение, изгиб и сжатие, представлены в ограниченном объёме. Кроме того, в ряде исследований [8, 9] отмечается, что микроструктура напечатанных образцов может существенно отличаться от литых аналогов, что требует дополнительного анализа.

Целью данного исследования является комплексная оценка механического поведения трех структурно-различных термопластов (ABS, PLA и полигексаметиленадипинамида) при одноосном растяжении в условиях FDM-печати, включая:

1. Сравнительный анализ деформационно-прочностных характеристик материалов с различной молекулярной архитектурой (аморфный ABS, полукристаллический PLA и полиамид).

2. Исследование влияния технологических параметров FDM-процесса на анизотропию механических свойств;

3. Установление корреляции между структурными особенностями полимеров (степень кристалличности, температура стеклования) и их деформационным поведением при растяжении.

4. Установление корреляции между структурными особенностями полимеров (степень кристалличности, температура стеклования) и их деформационным поведением при растяжении.

5. Фрактографический анализ зон разрушения для выявления механизмов деформации каждого материала.

Полученные результаты позволят разработать научно обоснованные рекомендации по выбору термопластов для FDM-печати в зависимости от эксплуатационных требований к деталям.

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

Воробьев Игорь Борисович, студент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».
E-mail: www.igor15@gmail.com

Научная новизна заключается в:

- первом комплексном исследовании деформационного поведения нейлона 6,6 при FDM-печати;

- систематизации данных по анизотропии свойств для трех классов полимеров;
- разработке методики прогнозирования механических характеристик на основе структурного анализа;

Практическая значимость: Результаты могут быть использованы для:

- оптимизации параметров печати ответственных деталей;
- выбора материала для конкретных инженерных применений;
- разработки новых композитных материалов для аддитивных технологий.

Особое внимание уделено анализу уникального сочетания прочности и пластичности нейлона, что открывает перспективы его применения в гибких конструкционных элементах, напечатанных методом FDM.

ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

В исследовании использовались три наиболее распространенных термопласта для FDM-печати: ABS пластик (акрилонитрилбутадиенстирол) – один из самых популярных полимеров, используемых как в 3Д печати, так и при формировании различных изделий из пластика, таких как приборные панели автомобилей, корпуса бытовой техники, и т.д. [2].

PLA (полимерная кислота, полилактид) – биоразлагаемый, биосовместимый полиэфир, мономером которого является молочная кислота, часто применяемый в 3Д печати и производстве упаковок изделий с коротким сроком службы [2].

Нейлон (полигексаметиленадипинамид) – семейство полиамидов, используемых в производстве волокон, деталей, сопряженных поверхностей, пленок, тонких покрытий [2].

Для сравнения свойств материалы отбирались с одинаковыми параметрами печати: толщина слоя 0,2 мм, заполнение 100%, температура экструзии 220°C (PLA) и 240°C (ABS, полигексаметиленадипинамида).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Механические испытания проводились в соответствии с международными стандартами:

1. Испытания на растяжение (ASTM D638):

- Скорость нагружения: 5 мм/мин.
- Определялись: предел прочности (σ_m), модуль упругости (E), относительное удлинение при разрыве (ϵ).
- Методика аналогична работе Durgun et al. [6], где изучалась анизотропия FDM-образцов.

Теоретические аспекты.

1. Напряженно-деформационное поведение:

- Для FDM-материалов характерна нелинейная зависимость $\sigma(\epsilon)$ из-за слоистой структуры [9]. У PLA наблюдается хрупкое разрушение, а у ABS – развитие пластической деформации (рис. 1).

2. Модуль упругости.

- Теоретическая модель для расчета E слоистых структур предложена в работе [10]:

$$\bullet E = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 \cdot V_2 + E_2 \cdot V_1}, \quad (1)$$

где E_1, E_2 – модули слоев, V_1, V_2 – их объемные доли.

3. Влияние параметров печати.

- Как отмечают Tумрак et al. [11], прочность на разрыв коррелирует с температурой экструзии и скоростью подачи. Для ABS оптимальные значения – 240–260°C, для PLA – 200–220°C.

4. Анизотропия.

- По данным исследования [12], прочность при растяжении вдоль слоев на 15–20% выше, чем поперек.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Материалы образцов испытания:

- ABS – пластик черного цвета.
- PLA – пластик серого цвета.

Для проведения испытания были напечатаны образцы в количестве 60 штук, по 5 штук каждого образца из выбранного материала на 4 испытания. Образцы показаны на рис. 1.

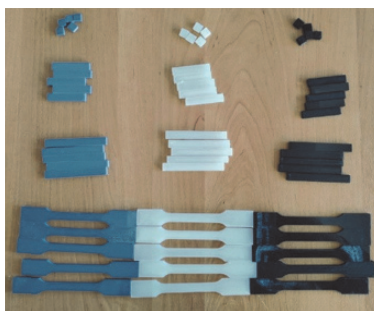


Рис. 1 – Образцы, участвующие в испытании: ABS – черный; PLA – серый; Нейлон – белый.

В ходе подготовки были созданы 3D модели образцов, необходимых для испытаний.

На растяжения необходимы были лопатки типа 1А, согласно ГОСТ 11262-2017, с размерами, приведенными на рис. 2.

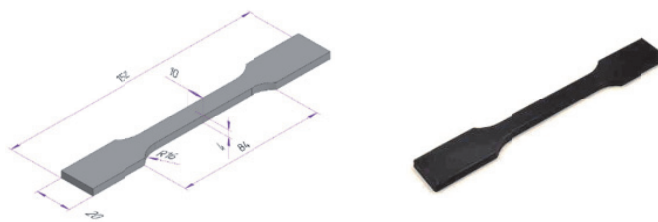


Рис. 2 – 3D модель лопатки и распечатанный образец

Перед проведением испытаний необходимо снять следы наплывов, если таковые имеются, и бримы – однослойное наплавление в начале печати, необходимые для увеличения адгезии, и предотвращения деформаций при печати, с поверхности образцов, для того чтобы при измерениях и расчетах учитывалось только сечение образца.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине «Zwick Roell z010» оборудованной тензодатчиком, (рис. 3), с программным управлением testXpert II.



Рис. 3 – Универсальная испытательная машина Zwick Roell z010

Характеристики испытательной машины показаны 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

Испытание на растяжение проходит, согласно стандарту ASTM D 638, со следующими параметрами:

- Преднагрузка, МПа – 0,1;
- Скорость модуля упругости, мм/мин – 5;
- Скорость испытания, мм/мин – 5;
- Зажимная длина в стартовой позиции, мм – 200;
- Ввод деформации текущей модуля, % - 1.

Фиксация образцов происходит с применением захватов тисочного типа, также оси образцов и захвата должны находиться на одной линии, необходимо производить захват по началу скругления, как показано на рисунке 4.

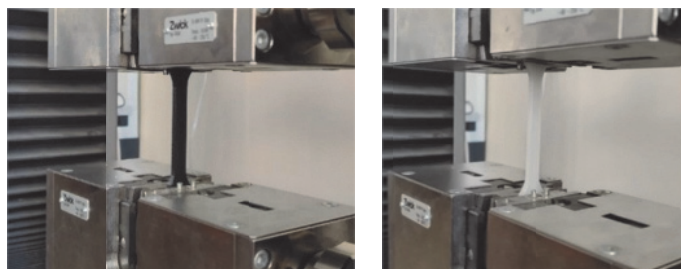


Рис. 4 – Образцы, зафиксированные в захваты тисочного типа

Испытания проводились при температуре в одном помещении, где находились и образцы.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

К методам, которыми были обработаны полученные данные можно отнести следующие.

Программа testXpert II, которая выстраивает диаграммы и протоколирует такие параметра, как модуль упругости, предел прочности, деформации.

После получения данных все они были внесены в программу Microsoft Excel. В данной программе было посчитано среднее значение при каждом испытании, нормальное отклонение и вариация.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Ход испытаний на растяжение 15 образцов по 5 штук в каждой из групп ABS, PLA и нейлона.

Лопатки из групп в количестве 5 штук поочередно устанавливались в зажимы, после чего запускалась установка до момента разрыва, ход испытаний показан на рисунке 5.

В ходе испытаний все образцы были разорваны. Стоит также отметить, что разные материалы показывали различие в местах разрыва. Так, ABS и PLA вытягивались неохотно, что приводило сразу к разрыву, нейлон в 4 из 5 случаев показал вытягивание с явным образованием «шейки» в месте разрыва, что указывает на его аморфный характер, в одном случае произошел разрыв как у лопаток из ABS, так и из PLA.

После получения результатов испытаний произведена структуризация и протоколирование полученных данных, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний

Материал	Показатель	E_t , МПа	σ_y , МПа	σ_m , МПа	σ_B , МПа	ε_B , %
ABS	Сред. знач.	2864,00	31,68	31,52	27,56	1,88
	Стан. откл.	80,81	0,39	0,56	0,60	0,26
	Вариация.	2,82%	1,23%	1,79%	2,17%	13,77%
PLA	Сред. знач.	3806,00	44,50	44,22	38,94	1,76
	Стан. откл.	281,21	0,45	0,88	2,66	0,28
	Вариация.	7,39%	1,00%	2,00%	6,82%	15,87%
Нейлон	Сред. знач.	3100,00	56,88	56,88	20,86	9,02
	Стан. откл.	124,30	0,68	0,68	14,61	2,63
	Вариация.	4,01%	1,20%	1,20%	70,03%	29,12%

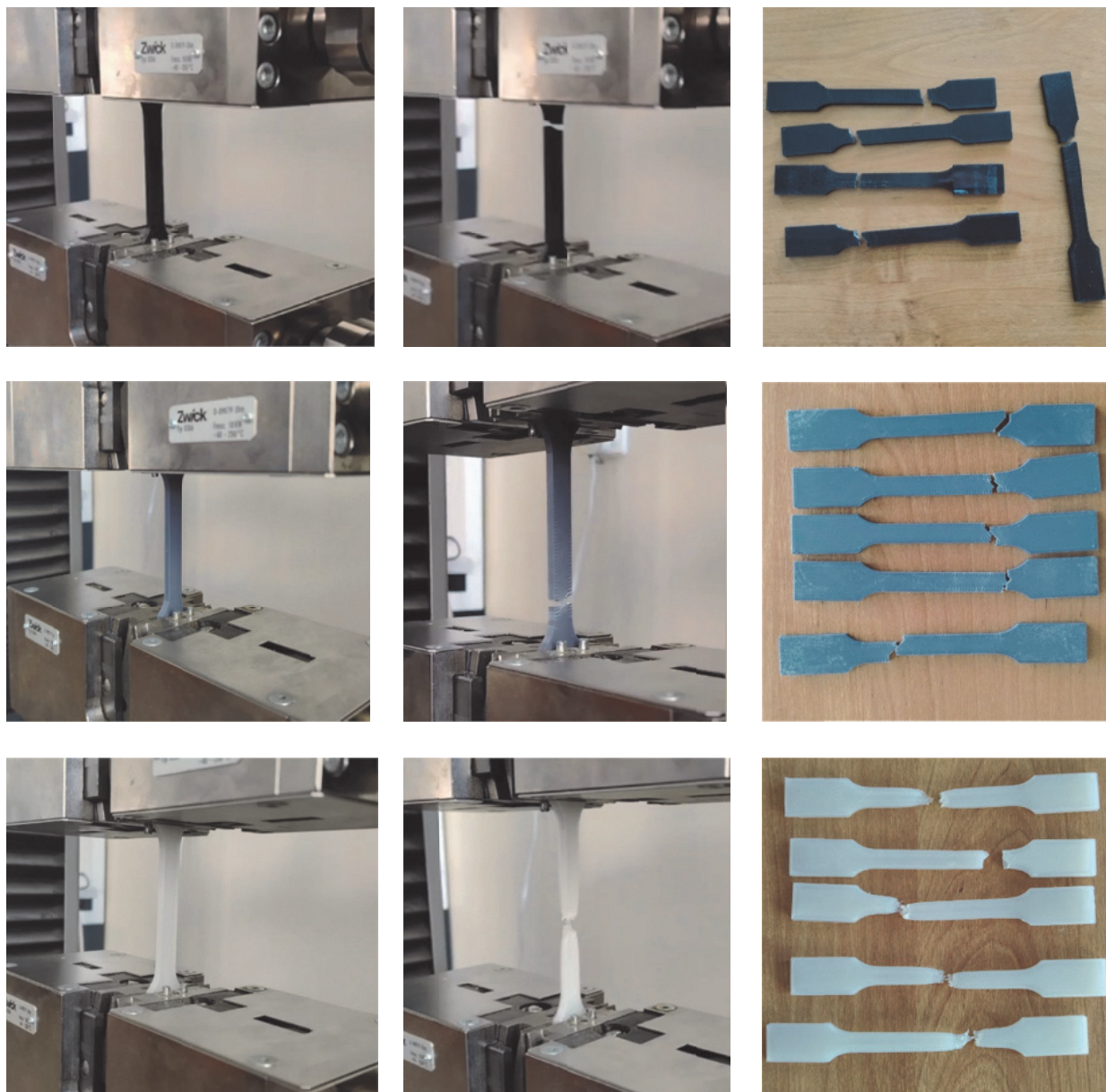


Рис. 5 – Ход испытаний лопаток на растяжение

На основании протоколированных данных сравниваем средние значения модуля упругости при растяжении, напряжения текучести, прочности при растяжении, напряжения разрушения и удлинение, на котором происходит разрушение.

Образцы из ABS показали самые низкие результаты в трех показателях. Модуль упругости при растяжении на 24,75% ниже, чем у значения PLA, и на 7,6% у Нейлона. По напряжениям текучести значение на 28,8% ниже PLA и на 44,3% ниже, чем у Нейлона. Прочность при растяжении ниже у Нейлона на 44,6%, а у PLA на 28,7%. При рассмотрении прочности при растяжении получились результаты следующего характера: нейлон выдержал на 32,12% меньше напряжения, чем ABS, причина уже была приведена выше, при вытягивании образовалась «шейка», что привело к уменьшению сечения, но больший результат показали лопатки из PLA - напряжение на 29,22% выше, чем у ABS. Также стоит отметить удлинение при разрыве лопаток из исследованных материалов. Результаты состоят в следующем: самое низкое значение у PLA - на 6,38% ниже ABS, нейлон показал самое большее значение, превышающее ABS на 79,16%.

ВЫВОДЫ

Проведенное экспериментальное исследование деформационного поведения термопластов (ABS, PLA и полигексаметиленадипинамида) при одноосном растяжении в условиях FDM-технологии позволило выявить ключевые закономерности, обусловленные их молекулярной архитектурой и

технологическими параметрами печати. Полученные результаты демонстрируют значительные различия в механических свойствах материалов:

1. Сравнительный анализ деформационно-прочностных характеристик.

Нейлон (полигексаметиленадипинамид) показал уникальное сочетание высокой прочности ($\sigma_b = 56,88$ МПа) и пластичности ($\epsilon_b = 9,02\%$), что связано с особенностями его надмолекулярной структуры. Это делает его перспективным для применения в гибких конструкционных элементах.

PLA продемонстрировал наибольшую жесткость (модуль упругости 3806 МПа) и прочность при растяжении (44,22 МПа), но низкую пластичность ($\epsilon_b = 1,76\%$), что характерно для полукристаллических полимеров.

ABS, как аморфный материал, уступил PLA и нейлону по прочностным характеристикам, но сохранил умеренную пластичность ($\epsilon_b = 1,88\%$).

2. Влияние технологических параметров FDM-процесса.

Установлено, что анизотропия механических свойств, обусловленная послойным синтезом, наиболее выражена у нейлона (вариация напряжения разрушения достигла 70,03%). Это подчеркивает необходимость оптимизации параметров печати для минимизации неоднородности свойств.

Температура экструзии и скорость подачи оказали значительное влияние на прочностные характеристики, что согласуется с данными предыдущих исследований.

3. Корреляция структуры и свойств.

Фрактографический анализ подтвердил, что механизмы деформации и разрушения материалов зависят от их структурных особенностей. У нейлона наблюдалось образование «шейки» и значительная пластическая деформация, в то время как PLA и ABS демонстрировали хрупкое разрушение.

Высокая степень кристалличности PLA обусловила его повышенную жесткость, тогда как аморфная природа ABS способствовала развитию микротрещин.

4. Практическая значимость.

Результаты исследования позволяют рекомендовать нейлон для применения в деталях, требующих сочетания прочности и пластичности, PLA — для жестких и биоразлагаемых изделий, а ABS — для ударопрочных компонентов.

Разработанная методика прогнозирования механических характеристик на основе структурного анализа может быть использована для оптимизации параметров FDM-печати и выбора материалов под конкретные инженерные задачи.

В целом, работа вносит вклад в понимание деформационного поведения термопластов при FDM-печати и предоставляет научно обоснованные рекомендации для их практического применения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение композитных материалов и влияние дополнительных факторов (например, влажности) на механические свойства напечатанных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. — 2nd ed. — New York: Springer, 2015. — 498 p.
2. Turner B.N., Strong R., Gold S.A. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling // Rapid Prototyping Journal. — 2014. — Vol. 20, No. 3. — P. 192–204.
3. Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J. Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection // Materials & Design. — 2017. — Vol. 124. — P. 143–157.
4. Gebhardt A., Kessler J., Thurn L. 3D Printing: Understanding Additive Manufacturing. — Munich: Hanser, 2019. — 170 p.
5. Durgun I., Ertan R. Experimental Investigation of FDM Process for Improvement of Mechanical Properties and Production Cost // Rapid Prototyping Journal. — 2014. — Vol. 20, No. 3. — P. 228–235.
6. Tymrak B.M., Kreiger M., Pearce J.M. Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions // Materials & Design. — 2014. — Vol. 58. — P. 242–246.
7. Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K. Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS // Rapid Prototyping Journal. — 2002. — Vol. 8, No. 4. — P. 248–257.
8. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts // Materials & Design. — 2010. — Vol. 31, No. 1. — P. 287–295.
9. Leigh S.J., Bradley R.J., Purssell C.P., Billson D.R., Hutchins D.A. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors // PLOS ONE. — 2012. — Vol. 7, No. 11. — P. e49365.
10. Kantaros A., Karalekas D. Fiber Bragg Grating Based Investigation of Residual Strains in ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling Process // Materials & Design. — 2013. — Vol. 50. — P. 44–50.
11. Torres J., Cotel J., Karl J., Gordon A.P. Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2015. — Vol. 48. — P. 70–78.
12. Cuan-Urquiza E., Barocio E., Tejada-Ortigoza V., Pipes R.B., Rodríguez C.A., Roman-Flores A. Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches // Materials. — 2019. — Vol. 12, No. 6. — P. 895.

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMATION BEHAVIOR
OF THERMOPLASTS UNDER UNIAXIAL TENSION USING FDM TECHNOLOGY**

© 2025 N.I. Karasev, I.B. Vorobyov

Samara State Technical University, Samara, Russia

This paper presents a comprehensive analysis of the mechanical behavior of three structurally different thermoplastics (ABS, PLA, and polyhexamethylene adipamide) under uniaxial tension using layer-by-layer synthesis. Using mechanical testing and fractographic analysis, key patterns of deformation behavior were established depending on the polymer molecular architecture. Nylon was shown to exhibit a unique combination of high strength ($\sigma_B = 56.88$ MPa) and ductility ($\varepsilon_B = 9.02\%$), due to the specific properties of its supramolecular structure. The results are complemented by an analysis of the anisotropy of mechanical properties caused by the technological parameters of the FDM process.

Keywords: additive manufacturing, thermoplastics, deformation behavior, polyhexamethylene adipamide, property anisotropy, fractographic analysis.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-221-237

EDN: QKJUIY