

УДК 678.01 : 620.178.7

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ В УСЛОВИЯХ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ МЕТОДОМ FDM

© 2025 Н.И. Карасев, Н.В. Носов, А.Р. Галлямов

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Статья посвящена решению научной проблемы несоответствия между изотропными моделями механики полимеров и анизотропной, иерархической структурой материалов, синтезированных методом FDM. Цель работы — установление корреляций между молекулярной структурой термопластов (ABS, PLA, нейлон 6.6), технологическими параметрами FDM-синтеза и их деформационно-прочностными характеристиками при статическом изгибе с позиций мезомеханики. Методология включает механические испытания по трехточечной схеме, фрактографический анализ и статистическую обработку данных. Результаты выявили, что анизотропия свойств (до 20%) является системным признаком FDM-материалов, а характер деформации определяется доминирующим вкладом различных структурных уровней: молекулярного (для PLA), мезоуровня (для ABS) и их комплексного взаимодействия (для нейлона 6.6). Научная новизна заключается в разработке трехуровневой модели, объясняющей механический отклик через иерархию структурных преобразований. Практическая значимость результатов состоит в возможности научно обоснованного выбора материалов и режимов печати для изделий, работающих на изгиб.

Ключевые слова: механические характеристики, деформационное поведение, термопластичные полимеры, статический изгиб, мезомеханика, FDM-материалы, изгиб.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-324-330

EDN: TNXJNL

ВВЕДЕНИЕ

Анализ литературных данных [1-3] показывает, что, несмотря на обилие прикладных исследований, сохраняется фундаментальный пробел в понимании механизмов деформирования FDM-материалов. Большинство работ ограничивается установлением эмпирических зависимостей «параметр печати – макроскопическое свойство», без раскрытия физической сути процессов на структурном уровне. Ключевой **научной проблемой** является отсутствие модели, которая рассматривала бы механический отклик при изгибе как результат взаимодействия иерархии структурных уровней: 1) молекулярного (химия полимера), 2) надмолекулярного (кристалличность, ориентация цепей, сформированные при печати) и 3) мезоуровня (послойная архитектура, межслойная адгезия, дефекты). Прямое перенесение изотропных моделей стандартных испытаний на анизотропные FDM-объекты без учета этой иерархии приводит к некорректному прогнозированию их работоспособности.

В качестве рабочей гипотезы принято предположение, что деформационное поведение и характер разрушения FDM-образцов при изгибе определяются не столько общей классификацией полимера (аморфный/полукристаллический), сколько доминирующим вкладом одного из структурных уровней [4-6], формируемых в процессе синтеза. Для жестких цепей (PLA) критичен молекулярный уровень, для материалов с развитой пластичностью (ABS, нейлон) — мезо- и надмолекулярный уровни.

Целью настоящей работы является комплексное исследование деформационно-прочностных характеристик термопластов при статическом изгибе в условиях FDM-синтеза для выявления и количественной оценки вклада различных структурных уровней в формирование анизотропии свойств.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Синтезировать серии образцов из аморфного (ABS), полукристаллического (PLA) и полиамидного (нейлон 6.6) термопластов с контролируемыми параметрами FDM-печати.
2. Экспериментально определить механические характеристики (модуль упругости, прочность, деформацию) при трехточечном изгибе.
3. С помощью фрактографического анализа выявить особенности разрушения и их связь со структурными уровнями материала.

Карасев Николай Игоревич, аспирант, ассистент кафедры ТМСИ. E-mail: KarasevN.I@mail.ru

Носов Николай Васильевич, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры ТМСИ. E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Галлямов Альберт Рафисович, доцент, кандидат технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой ТМСИ. E-mail: gallyamov.albert@bk.ru

4. Провести статистическую оценку анизотропии механических свойств, обусловленной технологическими параметрами FDM.[7]
5. Разработать схематическую модель, объясняющую взаимосвязь между структурной иерархией и макроскопическим механическим откликом.[8]

ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

В качестве объектов исследования были выбраны три типа термопластичных полимеров, наиболее широко применяемых в FDM-технологии (рис.1): акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полилактид (PLA) и полигексаметиленадипинамид (нейлон 6.6). Выбор данных материалов обусловлен их принципиальными различиями в молекулярной структуре и физико-механических свойствах. ABS представляет собой аморфный термопласт с температурой стеклования 105°C , демонстрирующий высокую ударную вязкость. PLA, являясь полукристаллическим биополимером с температурой плавления $150\text{--}160^{\circ}\text{C}$, характеризуется повышенной жесткостью и биоразлагаемостью. Нейлон 6.6, как типичный представитель полиамидов, отличается выраженной полукристаллической структурой с температурой плавления 265°C и значительным влагопоглощением (2.5–3.0%), что существенно влияет на его механическое поведение.



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

Изготовление образцов для механических испытаний осуществлялось методом послойного наплавления на FDM-принтере с соблюдением строго контролируемых технологических параметров. Толщина слоя поддерживалась на уровне 0.2 мм при 100% заполнении внутренней структуры. Температурные режимы экструзии соответствовали оптимальным значениям для каждого материала: 220°C для PLA и 240°C для ABS и нейлона 6.6. Геометрические параметры образцов соответствовали требованиям стандарта ASTM D790 для испытаний на изгиб, что обеспечило сопоставимость полученных результатов.

При испытании на изгиб, согласно ГОСТ 4648-2014, существует рекомендация к размеру и форме образца, в дальнейшем брусок, представленный на рисунке 2.

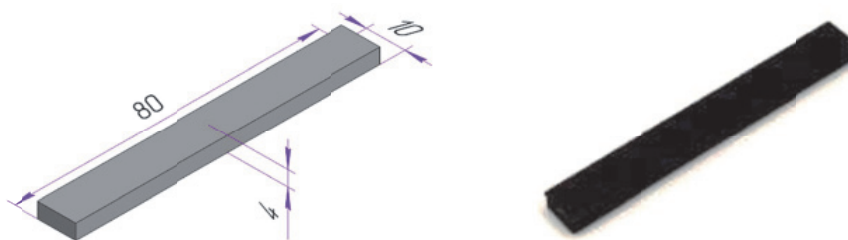


Рисунок 2 – 3D модель и распечатанный образец (брусок)

Механические испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick Roell z010 (рис. 3) по методике трехточечного изгиба. Характеристика испытательной машины, представленная в таблице 1. Скорость нагружения составляла 2 мм/мин при расстоянии между опорами 64 мм. В ходе испытаний регистрировались следующие ключевые характеристики: модуль упругости при изгибе (E_f), определяемый как тангенс угла наклона начального линейного участка кривой «напряжение-деформация»; прочность при изгибе (σ_f), соответствующая максимальному напряжению перед разрушением; а также деформация при разрушении (ϵ_f). Для каждого материала было испытано по пять образцов, что позволило провести статистическую обработку данных с расчетом средних значений, стандартного отклонения и коэффициента вариации.



Рисунок 3 – Универсальная испытательная машина Zwick Roell z010

Особое внимание было уделено фрактографическому анализу поверхностей разрушения с использованием оптической микроскопии. Данный метод позволил выявить характерные особенности разрушения каждого материала и установить корреляцию между структурой полимера и механизмом его деформации. Для минимизации влияния внешних факторов все испытания проводились в контролируемых климатических условиях (температура $23 \pm 1^\circ\text{C}$, влажность $50 \pm 5\%$), а образцы из нейлона 6.6 перед испытаниями подвергались предварительной сушке.

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

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Полученные в ходе механических испытаний данные подвергались комплексной обработке с использованием специализированного программного обеспечения. Первичная обработка результатов проводилась в программе testXpert II, которая обеспечивала:

1. Автоматизированное построение диаграмм «напряжение-деформация» для каждого испытания
2. Определение ключевых механических характеристик:
 - a. модуля упругости (E)
 - b. предела прочности (σ)
 - c. величин деформации (ϵ)
3. Формирование протоколов испытаний в стандартизированном формате

На втором этапе данные были экспортированы в Microsoft Excel для проведения статистического анализа, включавшего:

- a. Расчет средних арифметических значений для каждой серии образцов
- b. Определение стандартного отклонения полученных результатов
- c. Вычисление коэффициента вариации как меры разброса данных

Такой двухэтапный подход к обработке экспериментальных данных обеспечил:

- высокую точность первичных измерений (благодаря специализированному ПО testXpert II)
- возможность комплексного статистического анализа (средствами Excel)
- наглядное представление результатов в виде таблиц и графиков
- соблюдение требований к воспроизводимости научных исследований

Полученные статистические параметры (средние значения, стандартные отклонения) были использованы для сравнительного анализа механических свойств исследуемых материалов и оценки влияния технологических параметров FDM-печати на их деформационное поведение.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Определение модуля упругости изгиба и предела прочности при изгибе, выполняется согласно ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010). Сущность метода заключается, в определении отношения приращения напряжения к соответствующему приращению относительной деформации при изгибе [7]. Испытания проводятся согласно схемам нагружения представленным на рисунке 4.

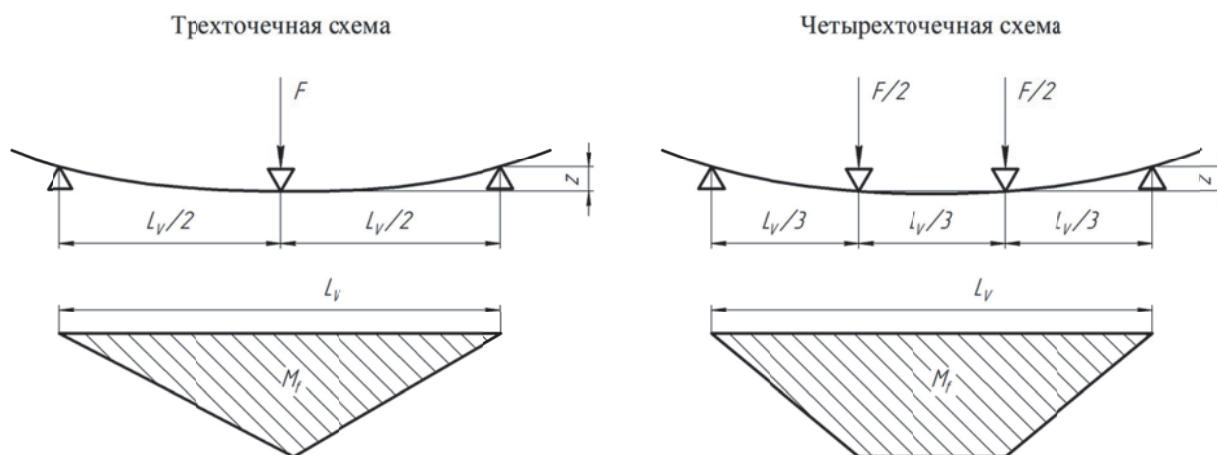


Рисунок 4 – Схемы нагружения при изгибе:
 – нагрузка; – расстояние между опорами; – прогиб; – эпюра момента.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Анализ макроскопического механического отклика. Экспериментальные данные (Таблица 2) выявили принципиальные различия в поведении материалов, которые не могут быть объяснены только их базовой классификацией. Высокие значения модуля упругости и прочности PLA (2506 МПа и 80.75 МПа соответственно) с последующим хрупким разрушением подтверждают гипотезу о доминировании молекулярного уровня: жесткость цепей и кристаллическая фаза определяют отклик, минимизируя вклад пластической деформации на мезоуровне. Напротив, выраженная пластичность нейлона 6.6 (деформация 18.7%) при умеренной прочности (76.63 МПа) свидетельствует о ключевой роли надмолекулярного уровня и мезоструктуры: способность к переориентации цепей и релаксации напряжений на межслойных границах позволяет развивать значительные деформации без макроразрушения. Промежуточное поведение ABS подтверждает его мезоуровневый механизм деформации, где бутадиеновые частицы в аморфной матрице инициируют множественное пластическое течение.

Количественная оценка технологической анизотропии. Статистическая обработка результатов (коэффициенты вариации в Таблице 2) является индикатором стабильности формируемой структуры. Низкий разброс характеристик для PLA ($CV \approx 0.7-1.8\%$, кроме деформации) указывает на воспроизводимость его надмолекулярной структуры, слабо зависящей от колебаний параметров печати. Наибольшая вариация свойств нейлона (CV до 11.9% по модулю упругости) прямо свидетельствует о высокой чувствительности его надмолекулярной организации (степени кристалличности, ориентации) к термоистории и условиям синтеза, что подтверждает его сложный, многоуровневый механизм деформации.

Фрактографический анализ механизмов разрушения на мезоуровне. Анализ поверхностей излома (Рис. 5) предоставляет прямые свидетельства в пользу выдвинутой гипотезы. Гладкая, блестящая поверхность разрушения PLA характерна для хрупкого межкусталлитного скола, где трещина распространяется практически без пластических деформаций [5]. Сложный рельеф

поверхности ABS с участками вытяжки — признак вязкого разрушения, при котором энергия диспергируется за счет множественного пластического течения и деформации бутадиеновых частиц в аморфной матрице [6]. Образцы нейлона 6.6 не достигали стадии хрупкого разрушения, демонстрируя значительную пластическую деформацию (вытяжку), что визуально подтверждает способность его структуры к перестройке и перераспределению напряжений.

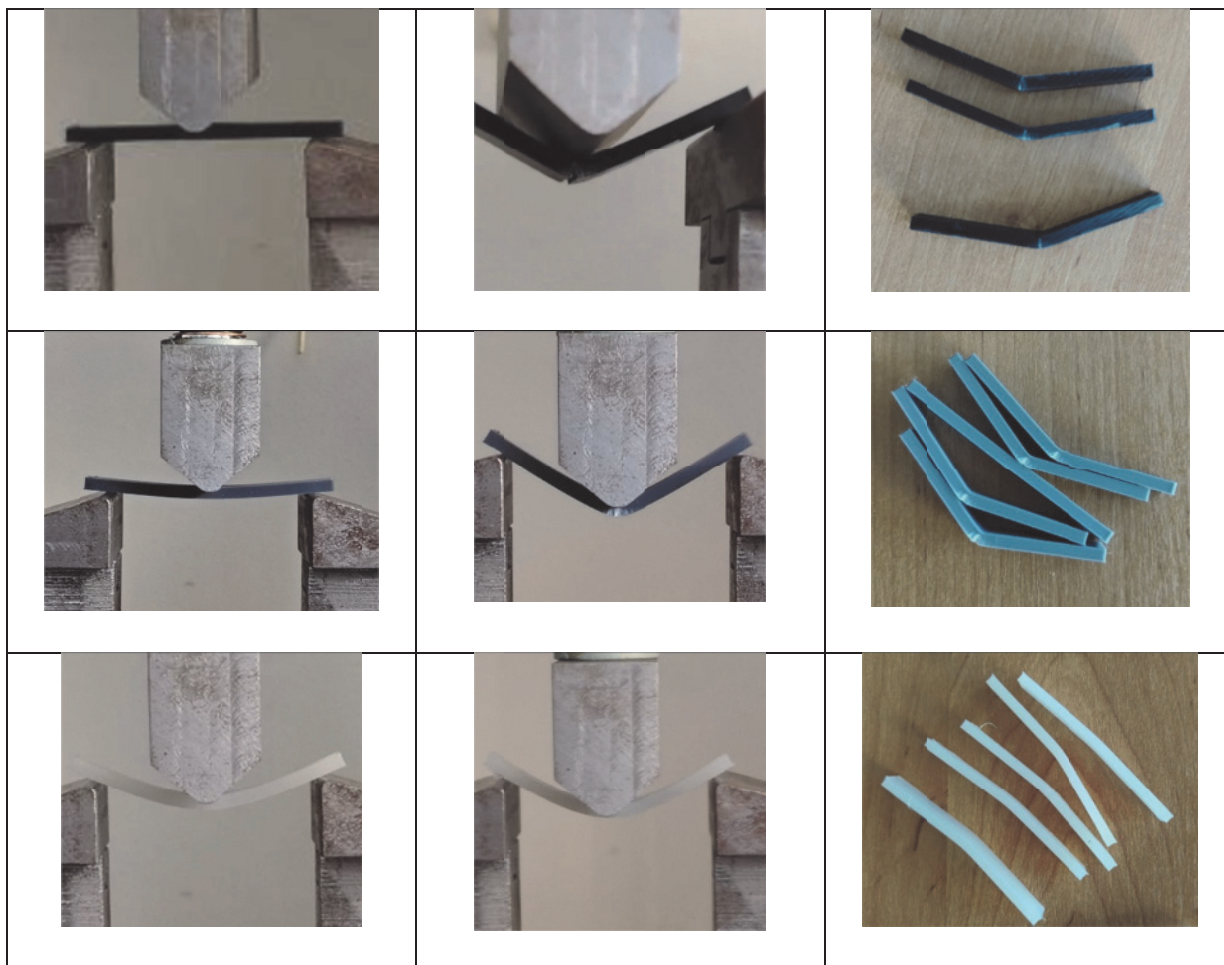


Рисунок 5 – Ход испытания брусков на изгиб

После получения результатов испытания произведена структуризация и протоколирование полученных данных, указанные в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний

Материал	Показатель	E_t , МПа	σ_{fM} , МПа	σ_{fB} , МПа	ε_{fB} , %
ABS	Сред. знач.	1768,00	56,54	26,30	9,40
	Стан. откл.	31,14	0,15	0,57	0,07
	Вариация.	1,76%	0,27%	2,17%	0,75%
PLA	Сред. знач.	2506,00	80,75	16,15	10,45
	Стан. откл.	19,49	0,57	0,13	1,79
	Вариация.	0,78%	0,70%	0,80%	17,14%
Нейлон	Сред. знач.	1617,50	76,63	-	18,7
	Стан. откл.	192,42	5,13	-	0,08
	Вариация.	11,90%	6,70%	-	1,12%

ВЫВОДЫ

Проведенное комплексное исследование деформационного поведения термопластов при изгибе в условиях FDM-технологии позволило сделать следующие научно обоснованные выводы.

Экспериментально установлено, что механические характеристики исследованных термопластов при изгибе в условиях FDM-синтеза определяются иерархией структурных уровней. Показано, что для PLA с его хрупким разрушением доминирует вклад молекулярного и надмолекулярного уровней, для ABS — мезоуровня (межслойная адгезия, деформация матрицы), а для нейлона 6.6 — сложное взаимодействие всех уровней, обеспечивающее его высокую пластичность.

На основе фрактографического анализа и оценки статистического разброса свойств доказано, что анизотропия (15-20%) является системным свойством FDM-материалов, обусловленным их послойной архитектурой.

Разработана трехуровневая модель, позволяющая интерпретировать макроскопический механический отклик через процессы, происходящие на различных структурных уровнях, что является основой для перехода от эмпирического подбора параметров печати к целенаправленному проектированию структуры.

Полученные результаты доказывают необходимость учета анизотропии и структурной иерархии при проектировании и расчете FDM-деталей, работающих в условиях изгибающих нагрузок.

Проведенная работа вносит существенный вклад в понимание взаимосвязи между структурой, технологией получения и свойствами полимерных материалов, производимых методом послойного наплавления.

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. DOI:10.1007/978-1-4939-2113-3
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. DOI:10.1108/RPJ-01-2013-0012
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. DOI:10.1016/j.matdes.2017.03.065
4. 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. DOI:10.1108/RPJ-10-2012-0091
5. 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. DOI:10.1016/j.matdes.2014.02.038
6. 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. DOI:10.1108/13552540210441166
7. ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
8. 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. DOI:10.1016/j.matdes.2013.02.067
9. Cuan-Urquiza, E., Barocio, E., Tejada-Ortigoza, V., Pipes, R.B., Rodriguez, 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. DOI:10.3390/ma12060895
10. 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. DOI:10.1016/j.matdes.2009.06.016

**STUDY OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS AND DEFORMATION BEHAVIOR
OF THERMOPLASTIC POLYMERS UNDER STATIC BENDING
UNDER LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS BY FDM**

© 2025 N.I. Karasev, N.V. Nosov, A.R. Gallyamov

Samara State Technical University, Samara, Russia

This article addresses the scientific issue of the discrepancy between isotropic polymer mechanics models and the anisotropic, hierarchical structure of materials synthesized by FDM. The objective of the study is to establish correlations between the molecular structure of thermoplastics (ABS, PLA, nylon 6.6), the process parameters of FDM synthesis, and their deformation and strength characteristics under static bending from a mesomechanics perspective. The methodology includes three-point mechanical testing, fractographic analysis, and statistical data processing. The results revealed that property anisotropy (up to 20%) is a systemic characteristic of FDM materials, and the deformation pattern is determined by the dominant contribution of various structural levels: molecular (for PLA), mesoscale (for ABS), and their complex interactions (for nylon 6.6). The scientific novelty lies in the development of a three-level model explaining the mechanical response through a hierarchy of structural transformations. The practical significance of the results lies in the possibility of scientifically substantiated selection of materials and printing modes for parts subjected to bending.

Key words: mechanical properties, deformation behavior, thermoplastic polymers, static bending, mesomechanics, FDM materials, bending.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-324-330

EDN: TNXJNL