



Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия

В.Б. Распопина^{1✉}, В.В. Мартынова², Е.А. Ступина³

¹⁻³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель работы – изучение влияния направления печати в FDM-технологии (от англ. Fused Deposition Modelling – моделирование методом послойного наплавления) на механические свойства изделия. Лабораторные испытания образцов типа В проводились в соответствии с ГОСТ 11262-2017 на разрывной машине для статических испытаний Shimadzu AGS-10kNXD со скоростью нагружения 2 мм/мин. Образцы были изготовлены из термопластика ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол). При прочих равных условиях изменялось направление печати образцов. В качестве параметра, отображающего этот фактор, был принят угол наклона нитей печати в заполнении внутреннего объема образца α к продольной оси образца. Результаты испытаний FDM-образцов показали, что при разных углах наклона α данные экспериментов закономерно меняются. Образец состоит из двух составляющих: первая – это заполнение внутреннего объема образца; вторая – внешняя оболочка образца. По результатам анализа (на 3D-моделях образцов в слайсере) траектории укладки нитей печати в слоях и строения каждого слоя было выявлено, что на изменение механических характеристик испытываемых образцов оказывают влияние обе составляющие их конструкции. Во внешней оболочке образца оказывают влияние верхняя и нижняя грани оболочки. Детальный анализ модели каждого слоя образцов позволил объяснить изменение реакции образцов с разными α на действие одинаковой растягивающей нагрузки в части величины разрушающей нагрузки. В частности, особенности структуры заполнения таковы, что ее влияние на величину разрушающей нагрузки будет ограничено ростом угла α от 0 до 45°. Дальнейшее увеличение α приводит к зеркальной повторяемости картины. При этом влияние на величину разрушающей нагрузки со стороны внешней оболочки соответствует диапазону $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Таким образом, в результате проведенных исследований были получены знания, дающие предпосылки для формирования теории, обуславливающей создание методики изготовления деталей с помощью FDM-технологии с заданными механическими характеристиками.

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM-печать, слайсер, образец, испытание на растяжение, механические характеристики, направление печати

Для цитирования: 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.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Effect of FDM printing direction on the mechanical properties of products

Vera B. Raspopina^{1✉}, Valentina V. Martynova², Elizaveta A. Stupina³

¹⁻³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The study aims to examine the effect of printing direction in the FDM-technology (Fused Deposition Modeling) on the mechanical properties of products. Laboratory tests of type B specimens were conducted in accordance with GOST 11262-2017 using a Shimadzu AGS-10kNXD tensile tester with a loading rate of 2 mm/min. The specimens were made of ABS (acrylonitrile butadiene styrene) thermoplastic. Under otherwise equal conditions, the printing direction of the specimens was changed. As a parameter representing this factor, the study adopted the inclination angle of printing filaments in the infill of the specimen α to its longitudinal axis. The test results of FDM specimens showed that at different inclination angles α , a consistent variation in experimental data is observed. The specimen comprises two components: the first is the infill of the specimen; the second is the shell of the specimen. An analysis (based on 3D models of specimens in the slicer) of the filament path in the

layers and the structure of each layer revealed that the mechanical properties of test specimens are affected by both components. In the shell of the specimen, this effect is produced by its upper and lower edges. A detailed analysis of models representing each layer of the specimens helped explain the variation in the response of specimens with different α to the action of the same tensile load in terms of the magnitude of the failure load. In particular, the features of the infill structure are such that its effect on the magnitude of failure load is limited by an increase in the angle α from 0 to 45°. A further increase in α leads to a mirror repeat pattern. In this case, the effect of the shell on the magnitude of the failure load corresponds to the range of $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Thus, the conducted research provided insights that can help lay the theoretical groundwork for a procedure for producing FDM parts with specified mechanical properties.

Keywords: additive technologies, FDM printing, slicer, sample, tensile testing, mechanical behavior, printing direction

For citation: 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.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день аддитивные технологии имеют широкое применение при производстве различного оборудования, деталей машин и приборов авиа- и автомобилестроения [1–4]. Все больше предприятий переходят к промышленному использованию данных технологий, поскольку их применение позволяет снизить себестоимость изделия, сократить сроки его производства без потери качества.

В основе аддитивных технологических процессов лежит принцип послойного «выращивания» детали. Данные процессы обеспечиваются благодаря использованию специального оборудования, именуемому 3D-принтер. По сути, это станок с числовым программным управлением (ЧПУ), поскольку печать изделия производится в соответствии с управляющей программой. Программа формируется в соответствии с 3D-моделью изделия.

Одним из наиболее доступных и распространенных методов 3D-печати является FDM-печать (Fused Deposition Modelling – моделирование методом послойного наплавления). В ее основе лежит метод экструзии материала, адаптированный к принципам 3D-печати. Данная печать обеспечивается непрерывной подачей на стол 3D-принтера разогретого материала через движущееся сопло экструдера по запрограммированной траектории. Поскольку диаметр сопла незначительный, выдавливаемый материал образует упорядоченную нитевидную структуру, которая укладывается послойно. Результатом этого процесса является изготавливаемое изделие.

Расходным материалом для FDM-печати являются термопластичные материалы.

Они обладают способностью при нагревании обратимо переходить в вязкотекучее состояние. В настоящее время существует большое разнообразие термопластиков, предназначенных для FDM-печати в промышленных условиях [5–7]. Причем механические свойства ряда из них сопоставимы со свойствами некоторых металлов. Например, предел прочности на растяжение ULTEM 9085 составляет порядка 70 МПа, PEEK – порядка 100 МПа. Применение таких материалов для FDM-печати позволяет заменить часть металлических деталей на детали из термопластиков без потери их механических свойств, позволив существенно оптимизировать производственные циклы. Однако на этом пути присутствуют некоторые трудности.

Качество напечатанного FDM-изделия во многом зависит от сочетания свойств термопластика и настроек печати [8–10]. В данном случае под настройками печати понимаются температурный режим, скорость и объем подачи материала, толщина слоя, расстояние между укладываемыми нитями и прочее. Обладая соответствующими знаниями о свойствах материала и технических характеристиках оборудования, оператор принтера способен обеспечить требуемый от него уровень качества изделия. Для производства несущих деталей этого достаточно.

Изготовление деталей, которые в процессе эксплуатации должны воспринимать нагрузку, требует тщательной проработки изделия на этапе проектно-конструкторских работ [11–13]. Значимую часть таких работ занимает анализ прочности проектируемого изделия [14]. В случае FDM-изделия знаний физико-механических свойств материала недостаточно.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Внешняя геометрия объемного изделия, выполненного методом FDM-печати, определяется оболочкой (рис. 1). Внутренний объем изделия заполняется нитевидной структурой. При одинаковой геометрической форме изделия и заданном шаблоне печати могут отличаться процент внутреннего заполнения и направление заполняющей нити (рис. 2). Безусловно, при прочих равных параметрах печати эти факторы будут влиять на прочность и жесткость изделия.

Методики анализа прочности, применяемые для деталей, изготавливаемых по традиционным технологиям (субтрактивные технологии, формообразующие технологии), неприменимы в данном случае. Причиной этому является то, что в их основе лежит гипотеза сплошности материала. Структура FDM-изделия абсолютно несплошная (см. рис. 2). Гипотеза сплошности материала действует только в пределах нити печати. В настоящий момент исследователи проводят активную работу по

поиску решений проблемы анализа прочности FDM-изделий [15–19]. Одной из ее составляющих являются экспериментальные исследования [20–22]. Они позволяют получить оценку зависимости механических характеристик FDM-структуры от параметров их печати. Поскольку нормативная база для такого рода экспериментов в настоящий момент отсутствует, исследователи в основном руководствуются стандартами для испытаний пластмасс.

Целью данной работы является экспериментальное определение зависимости параметров прочности и жесткости FDM-структуры от направления действия растягивающей силы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Руководством для проведения исследования принят ГОСТ 11262-2017⁴, регламентирующий метод испытания на растяжение пластмасс.

Для испытаний был принят стандартный образец типа В (рис. 3).

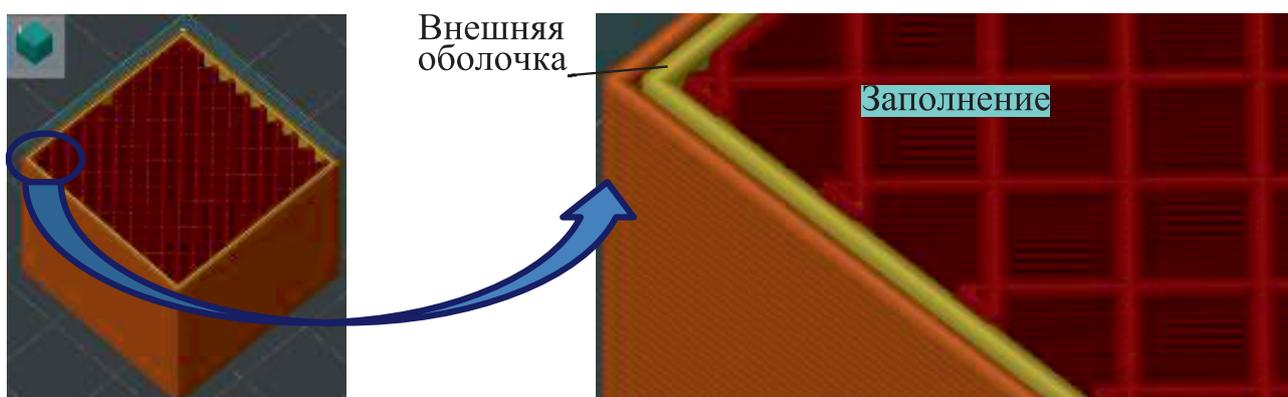


Рис. 1. Внутреннее строение FDM-куба с 45-процентным заполнением по шаблону «сетка»
Fig. 1. Internal structure of the FDM cube with 45 percent filling according to “grid” pattern

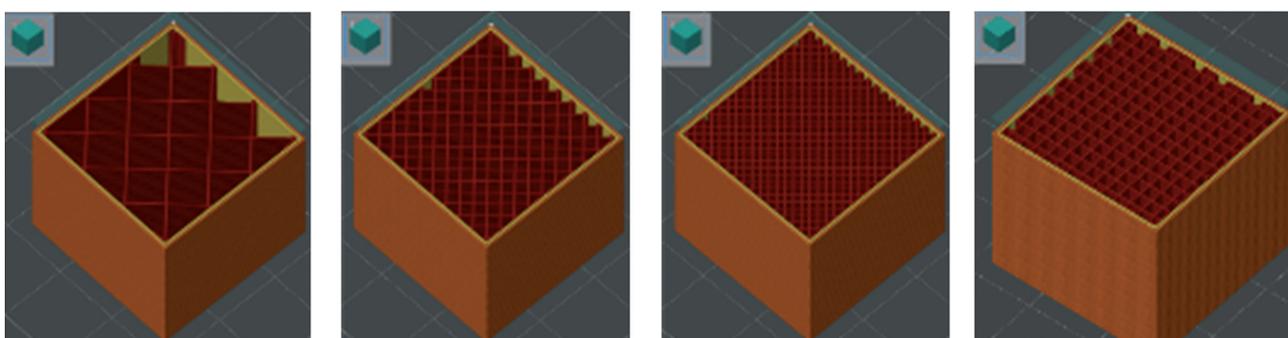


Рис. 2. 3D-модели куба в слайсере OrcaSlicer с различными процентами заполнения и направлениями нити печати
Fig. 2. Cube 3D models in OrcaSlicer with different filling percentages and printing thread directions

⁴ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Введ. 01.10.2018. М.: Стандартинформ, 2018.

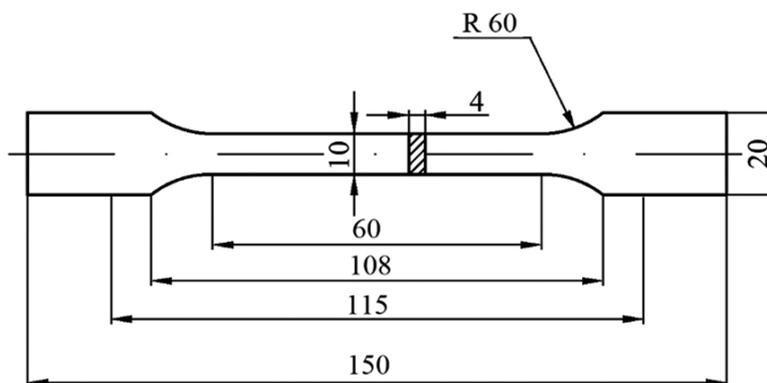


Рис. 3. Образец типа В, согласно ГОСТу 11262-2017

Fig. 3. Type B sample according to GOST 11262-2017

Испытания проводились на разрывной машине для статических испытаний Shimadzu AGS-10kNXD (Shimadzu, Япония) со скоростью нагружения 2 мм/мин.

Образцы были изготовлены из термопластика ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол). Печать образцов осуществлялась на принтере Bambu Lab P1S (Bambu Lab, Китай), диаметр сопла 0,4 мм. При печати образцы расположены плашмя. Параметры печати для всех образцов следующие: скорость печати – 160 мм/с; температура рабочего стола – 90 °С; температура сопла для 1 слоя – 260 °С; для последующих слоев – 270 °С; ширина экструзии 0,4 мм; толщина слоя 0,2 мм. Внутреннее заполнение образцов было выполнено по шаблону заполнения «сетка» с плотностью 25%. Определялся угол наклона

нитей печати α как угол между нитью и продольной осью образца (рис. 4). Угол изменялся в диапазоне от 0 до 90 ° с шагом 10 °. Структура каждого слоя представляет равномерную сетку с прямоугольными ячейками. Положение каждого прямоугольника от слоя к слою не меняется. Следовательно, слои «прикрепляются» друг к другу не точно, а по всей траектории нити печати слоя.

Логично предположить, что поведение внешне одинаковых образцов под действием одинаковой схемы нагружения при разном наклоне нитей печати будет отличаться.

Направление укладки нитей привязано к одной из двух взаимно перпендикулярных нитей печати заполнения (рис. 5). Предварительный анализ возможного отклика заполнения при разных направлениях нитей пе-

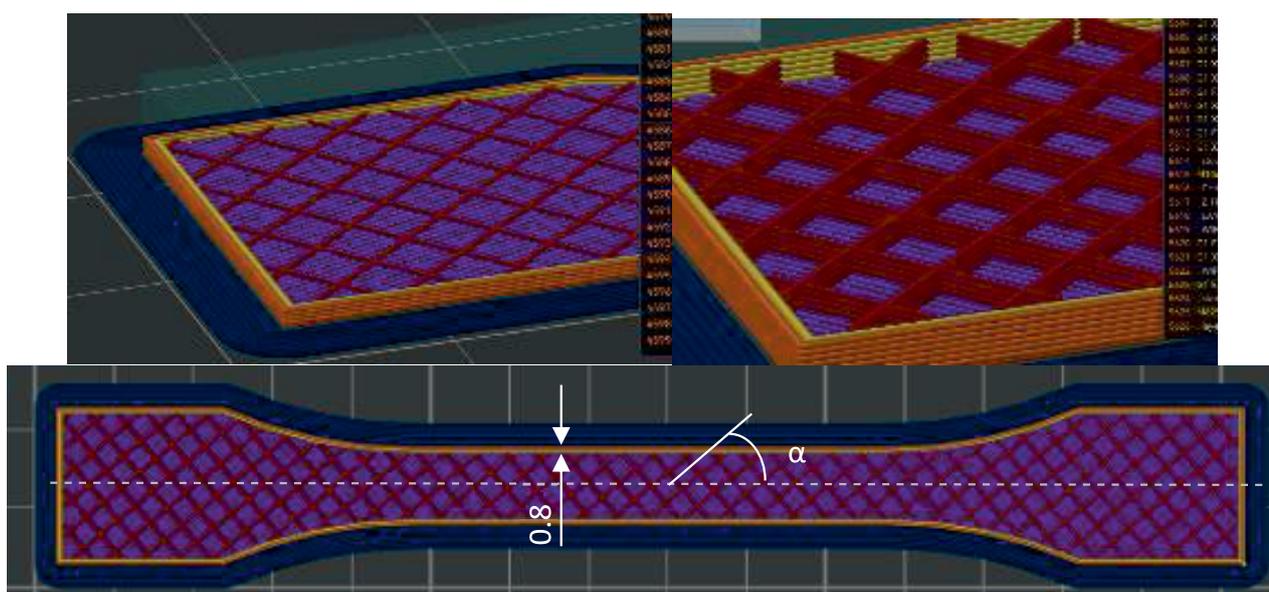


Рис. 4. 3D-модель образца в слайсере OrcaSlicer

Fig. 4. Sample 3D model in OrcaSlicer

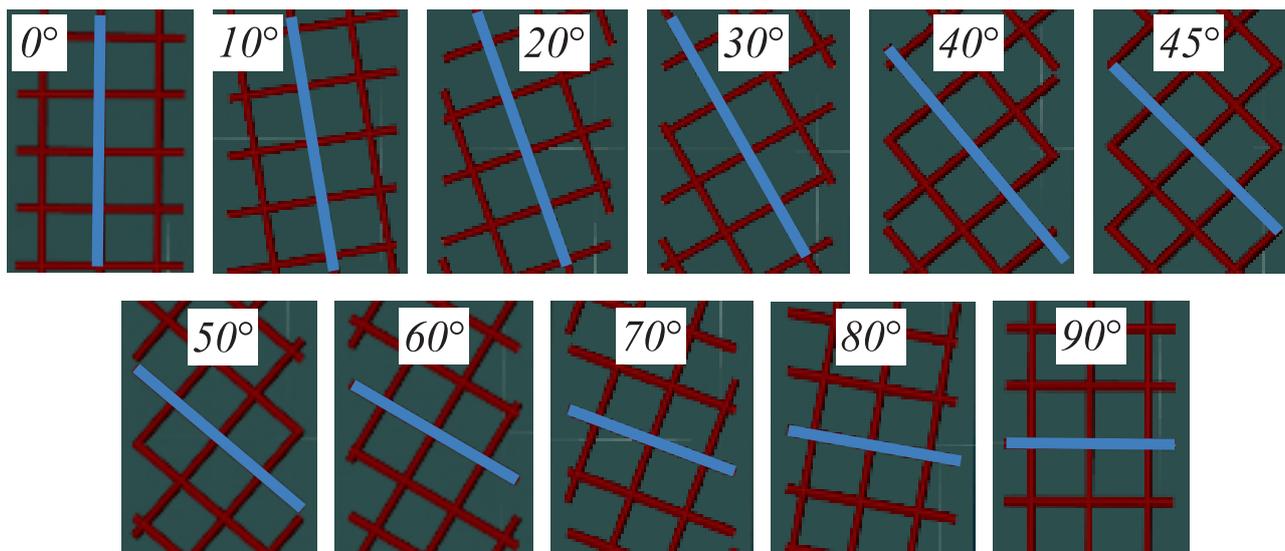


Рис. 5. Углы наклона нитей печати заполнения
 Fig. 5. Printing thread inclination angles

чати на растягивающую нагрузку позволил предположить, что отличие в отклике должно наблюдаться только в диапазоне углов от 0 до 45°. Когда значение угла наклона переступит порог в 45°, картина должна полностью повториться. Это очевидно, поскольку рассматриваемая нить и перпендикулярная ей нить заменят друг друга в восприятии силового потока.

Чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение, было проведено одинад-

цать серий испытаний напечатанных образцов. Каждая серия включает в себя пять образцов с определенным углом наклона нитевидной структуры заполнения (см. рис. 5). В остальных образцы всех серий идентичны.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты испытаний представлены в табл. 1, построен график зависимости максимальной нагрузки F_{max} от угла наклона нити α (рис. 6).

Таблица 1. Значения максимальной нагрузки и соответствующих углов наклона нити печати
 Table 1. Values of maximum load and corresponding inclination angles of the printing thread

α , град	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90
F_{max} , Н	791,953	789,378	763,141	734,192	692,101	691,223	696,627	699,715	729,140	749,628	806,047

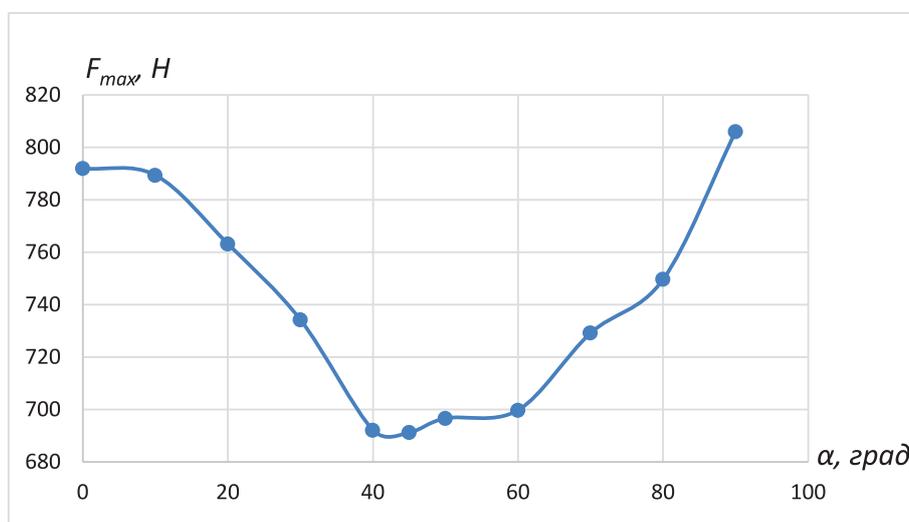


Рис. 6. График зависимости величины максимальной нагрузки от угла наклона нити печати
 Fig. 6. Maximum load value vs printing thread inclination angle graph

Результаты испытаний показали, что предполагаемой симметричной картины распределения параметров прочности и жесткости не получилось. Поскольку угол $\alpha = 45^\circ$ является предполагаемым центром симметрии, то за базу для сопоставления результатов испытаний приняты данные этой серии образцов.

Для сопоставления результатов испытаний образцов с углами наклона 0, 45, 90° проведено сравнение (табл. 2): представлены следующие данные об абсолютной и относительной разнице между значениями максимальной нагрузки для образцов с углами наклона нитей печати 0 и 45°, 90 и 45°, 90 и 0° соответственно, Δ_{Fmax} .

Таблица 2. Разница между значениями максимальной нагрузки для образцов с углами наклона нитей печати 0 и 45°, 90 и 45°, 90 и 0°

Table 2. Difference between the maximum load values for the samples with printing thread inclination angles of 0 and 45°, 90 and 45°, 90 and 0°

Δ	Δ_{Fmax} , Н (%)
Δ_{0-45°	100,730 (14,57)
Δ_{90-45°	114,824 (16,61)
Δ_{90-0°	14,094 (1,78)

Из табличных данных следует, что с образцы с углом $\alpha = 0^\circ$ менее прочные и жесткие по сравнению с образцами с $\alpha = 90^\circ$.

Логично предположить, что в промежуточных точках качественная картина должна повториться. Однако график на рис. 6 показывает, что это не так. В табл. 3 представлены аналогичные табл. 2 данные для промежуточных точек.

Таблица 3. Разница между значениями максимальной нагрузки для образцов с углами наклона нитей печати в диапазоне от 0 до 90°

Table 3. Difference between the maximum load values for the samples with printing thread inclination angles in the range from 0 to 90°

Δ	Δ_{Fmax} , Н (%)
Δ_{10-45°	98,155 (14,2)
Δ_{20-45°	71,918 (10,40)
Δ_{30-45°	42,969 (6,216)
Δ_{40-45°	0,878 (0,127)
Δ_{50-45°	5,404 (0,782)
Δ_{60-45°	8,492 (1,229)
Δ_{70-45°	37,917 (5,48)
Δ_{80-45°	58,405 (8,450)
Δ_{80-10°	-39,750 (5,344)
Δ_{70-20°	-34,001 (4,455)
Δ_{60-30°	-34,441 (4,920)
Δ_{50-40°	4,526 (0,007)

Превышение максимальной нагрузки для образцов с α , равным 10, 20, 30°, значений максимальной нагрузки для соответствующих образцов с α , равным 80, 70, 60°, составляет порядка 5%. При этом жесткостные характеристики имеют обратную зависимость.

Чтобы понять причину этого, следует проанализировать внутреннее строение образцов. Кроме структуры заполнения образца, на его способность сопротивляться нагрузке влияет внешняя оболочка (рис. 7), которая состоит из стенок или периметра, верхней и нижней оболочек. В данном случае стенки образца внутреннюю картину симметрии не нарушают (см. рис. 7 а). Ее нарушают верхняя и нижняя оболочки образца (см. рис. 7 б). Верхняя оболочка образована пятью слоями, нижняя – четырьмя. Образец в целом образован двадцатью слоями. Сопоставив занимаемый оболочкой объем (4234 мм³) и объем всего образца (8092 мм³), получаем, что объем оболочки составляет почти половину объема всего образца. Следовательно, в данном случае влияние оболочки на несущую способность образца должно быть значительным.

Следует обратить внимание на слой 16 (см. рис. 7 б). Он является пограничным слоем между заполнением и верхней оболочкой. В терминах FDM-печати его называют внутренним мостом (internal bridge). В OrcaSlicer предусмотрена специальная опция для настройки этого параметра. Функция внутреннего моста – это переход при формировании нитевидной структуры от ее разряженной части в заполнении к верхней оболочке. Как верхняя, так и нижняя оболочки всегда со стопроцентным заполнением. Чтобы обеспечить этот переход, высота внутреннего моста практически в два раза больше высот остальных слоев (см. рис. 7 б). При этом соседний с внутренним мостом слой заполнения (слой 15) практически вплавлен в него (рис. 8).

Траектория укладки нити на внутреннем мосту образует непрерывную ломаную линию с циклически повторяющимся направлением «укладки» звеньев. В пределах одного цикла ломаная состоит из четырех звеньев (рис. 9). Два звена прикрепляются к стенкам образца (звенья 1 и 3). Два других звена (2 и 4) – это две параллельные ли-

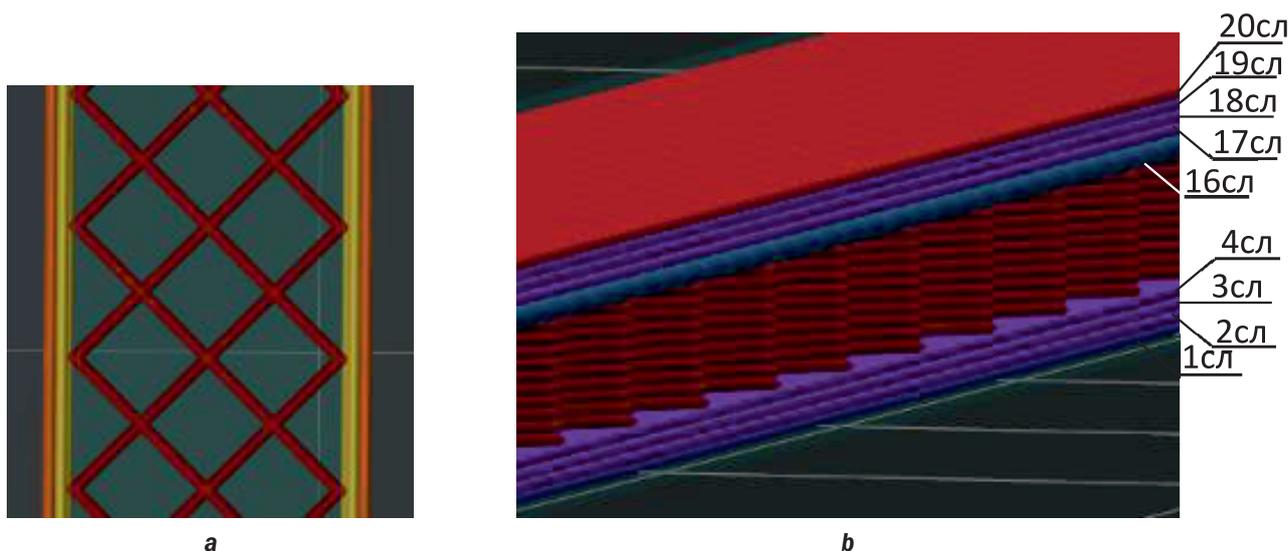


Рис. 7. Внутреннее строение образца в рабочей части: а – периметр (стенки) и заполнение; б – верхняя и нижняя оболочки, заполнение

Fig. 7. Internal structure of the sample working part: a – perimeter (walls) and filling; b – upper and lower shells, filling

нии, направленные в соответствии с углом α (см. рис. 5). А именно: если $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$, то звенья направлены по α ; если $50^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, то звенья направлены по углу $\alpha + 90^\circ$. Между нитями, образующими эти звенья, есть небольшой зазор. То есть на нарушение прочностной симметрии (см. рис. 6) этот слой влияния не оказывает.

Нарушение в эту симметрию вносит слой 20 (см. рис. 7). Этот слой качественно отличается от прочих. Он образован скре-

пленными между собой по боковым поверхностям отдельными нитями, направленными под углом $\alpha + 90^\circ$ (рис. 10). Концы каждой нити «стыкуются» с соответствующими нитями периметра. Прочие слои верхней и нижней оболочек формируются по непрерывной траектории также, как внутренний мост (см. рис. 9), с той единственной разницей, что боковые поверхности звеньев 2 и 3 плотно прилегают друг к другу (см. рис. 10). Длина нитей этого слоя изме-

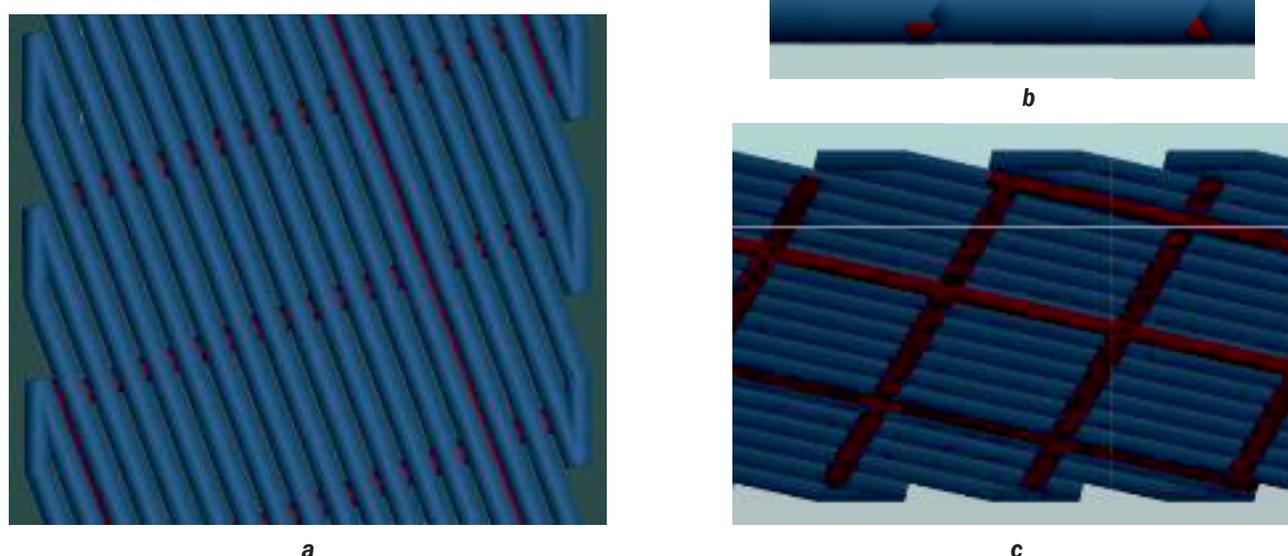


Рис. 8. Модель внутреннего моста в OrcaSlicer с примыкающим к нему слоем заполнения в 25%, $\alpha = 20^\circ$: а – вид сверху; б – вид сбоку; с – вид со стороны слоя заполнения

Fig. 8. Internal bridge model in OrcaSlicer with an adjacent layer of 25% filling, $\alpha = 20^\circ$: a – top view; b – side view; c – view from the filling layer

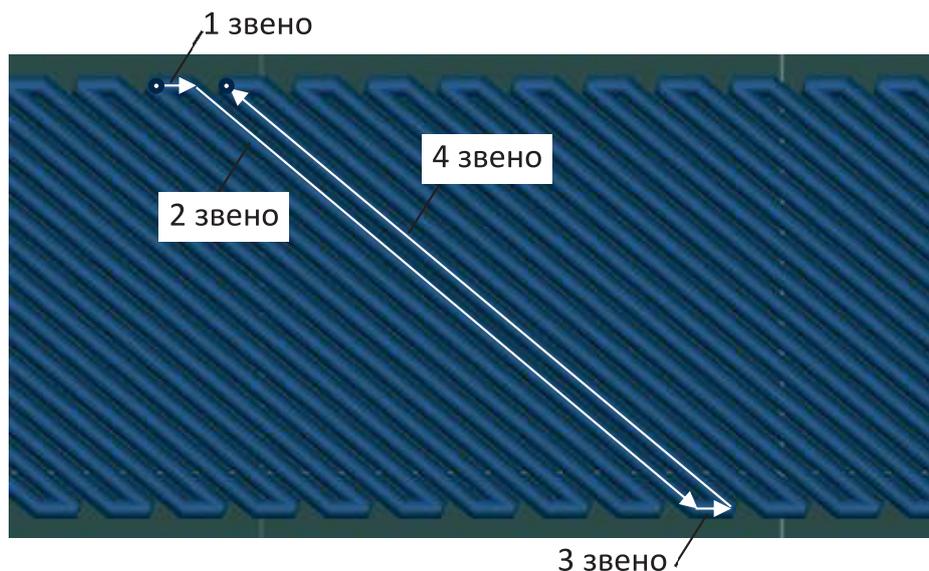


Рис. 9. Циклическая нитевидная структура внутреннего моста
Fig. 9. Cyclic thread-like structure of the internal bridge

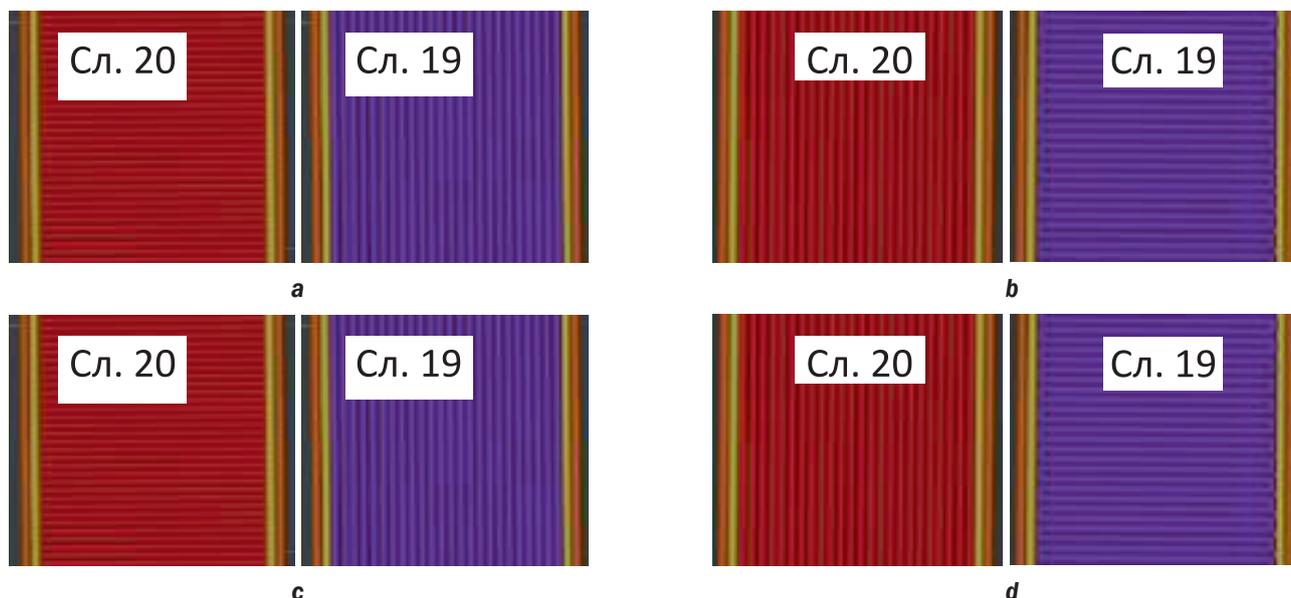


Рис. 10. Модели 19 и 20 слоев образцов с разными углами направления укладки нити: а - $\alpha = 0^\circ$; б - $\alpha = 90^\circ$; в - $\alpha = 20^\circ$; г - $\alpha = 70^\circ$

Fig. 10. Models of 19 and 20 layers of samples with different angles of thread laying directions: а - $\alpha = 0^\circ$; б - $\alpha = 90^\circ$; в - $\alpha = 20^\circ$; г - $\alpha = 70^\circ$

няется в зависимости от значения угла α . Очевидно, что способность сопротивляться растягивающей нагрузке у этого слоя образца будет изменяться по всей линейке значений угла α .

В отличие от 20 слоя, отклик части образца, образованной остальными 19 слоями, изменяется при линейке значений α только от 0 до 45° . Далее от 45° до 90° реакция этой части образца зеркально повторится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проделанной работы можно сделать вывод о том, что на параметры прочности образцов при прочих равных условиях влияют два фактора:

- направление укладки нити печати в заполнении;
- направление укладки нити печати в верхней и нижней оболочках образцов.

Причем зависимость между этими факторами не прямая. В заполнении образцов из-

менение значений угла наклона нити печати к продольной оси образца α от 0 до 90° приводит к некой параболической тенденции в кривой зависимости между значениями максимальной нагрузки, выдерживаемой образцами, и значениями угла α . Вершина этой параболы находится в точке, у которой $\alpha = 45^\circ$ (см. рис. 6). Влияние верхней и нижней оболочек образцов вносит возмущение

в эту картину зависимости, нарушает симметрию графика. Для выявления зависимостей, обуславливающих качественные и количественные параметры этого возмущения необходимы дальнейшие исследования.

Данные знания дают предпосылку для возможности получить методику изготовления деталей с заданными механическими характеристиками.

Список источников

1. Joch R., Šajgalík M., Drbůl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for the application of additive composites technologies for // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 10. P. 3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.
2. Tyrer A. The 3d printing market reaches \$24.8 billion, more from the new proto labs report on 3d printing trends. Режим доступа: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-market-reaches-24-8-billion-more-insights-from-protolabs-new-3d-printing-trend-report-230753/> (дата обращения: 07.04.2024).
3. Tyrer A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components. Режим доступа: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> (дата обращения: 07.04.2024).
4. Petch M. The additive manufacturing advantage: INTERVIEW Tobias Petzinger. Режим доступа: <https://3dprintingindustry.com/news/the-additive-manufacturing-advantage-interview-tobias-petzinger-231081/> (дата обращения: 07.04.2024).
5. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 884–892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.
6. Khosravani M.R., Reinicke T. Mechanical strength of 3D-printed open hole polymer plates // *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 41. P. 664–669. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.075>.
7. Озеров А. Высокоэффективные пластики – реальная альтернатива металлам // *iQB technologies* Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/high-performance-polymers/> (дата обращения: 07.04.2024).
8. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling // *Sensors International*. 2022. Vol. 3. P. 100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.
9. Tajik A.R., Khan T.I., Parezanović V. Raster angle impact on FDM-based additive manufactured fluidic oscillator // *International Journal of Thermofluids*. 2022. Vol. 16. P. 100230. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100230>.
10. Bayas E., Kumar P., Harne M. Impact of process parameters on mechanical properties of FDM 3d-printed parts: a comprehensive review // *European Chemical Bulletin*. 2023. Vol. 12. Iss. 5. P. 708–725. <https://doi.org/10.48047/ecb/2023.12.si5.073>.
11. Vidakis N., David C., Petousis M., Sagris D., Mountakis N., Moutsopoulou A. The effect of six key process control parameters on the surface roughness, dimensional accuracy, and porosity in material extrusion 3D printing of polylactic acid: Prediction models and optimization supported by robust design analysis // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 5. P. 100104. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>.
12. D'Addona D.M., Raykar S.J., Singh D., Kramar D. Multi objective optimization of fused deposition modeling process parameters with desirability function // *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 99. P. 707–710. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.117>.
13. Сметанников О.Ю., Бекмансуров М.Р., Ильиных Г.В., Донгаузер К.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе лазерной порошковой наплавки с целью определения конечного коробления изделий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2023. № 6. С. 124–134. <https://doi.org/10.15593/pern.mech/2023.6.12>.
14. Raja S., Agrawal A.P., Patil P.P., Thimothy P., Capangpangan R.Y., Singhal P., Wotango M.T. Optimization of 3D printing process parameters of polylactic acid filament based on the mechanical test // *International Journal of Chemical Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5830869>.
15. 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>.
16. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads // *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 34. P. 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.
17. 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>.

18. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties // *Polymer Testing*. 2022. Vol. 113. P. 107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>.
19. Денискина Г.Ю. CAD/CAM/CAE-система для изготовления конструкций из волокнистых композиционных материалов методом 3D-печати // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. 2022. № 126. <https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-21>. EDN: LBGNMV.
20. Ракишев А., Доненбаев Б., Джамалудин Х.Р. Исследование механических характеристик FDM деталей (3D-печати): эмпирические и компьютерные методы // *Наука и техника Казахстана*. 2023. № 3. С. 113–121. <https://doi.org/10.48081/MFBQ8991>.
21. Распопина В.Б., Шеметов Л.И., Стуров А.А. Определение модуля продольной упругости анизотропной FDM-структуры в CAE-среде и с помощью натурального эксперимента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2024. Т. 20. № 1. С. 8–13. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2024-20-1-8-13>. EDN: ATVTIK.
22. Bechný V., Matuš M., Joch R., Drbúl M., Czán A., Šajgalík M., et al. Influence of the orientation of parts produced by additive manufacturing on mechanical properties // *Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 24. No. 1. P. 2–8. <https://doi.org/10.21062/mft.2024.021>.

References

1. Joch R., Šajgalík M., Drbúl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for the application of additive composites technologies for. *Materials*. 2023;16(10):3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.
2. Tyrer A. The 3d printing market reaches \$24.8 billion, more from the new proto labs report on 3d printing trends. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-market-reaches-24-8-billion-more-insights-from-protolabs-new-3d-printing-trend-report-230753/> [Accessed 7th April 2024].
3. Tyrer A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> [Accessed 7th April 2024].
4. Petch M. The additive manufacturing advantage: INTERVIEW Tobias Petzinger. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/the-additive-manufacturing-advantage-interview-tobias-petzinger-231081/> [Accessed 7th April 2024].
5. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;21:884-892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.
6. Khosravani M.R., Reinicke T. Mechanical strength of 3D-printed open hole polymer plates. *Procedia Structural Integrity*. 2022;41:664-669. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.075>.
7. Ozerov A. High-performance plastics - a real alternative to metals. *iQB technologies*. Available from: <https://blog.iqb.ru/high-performance-polymers/> [Accessed 7th April 2024]. (In Russ.).
8. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling. *Sensors International*. 2022;3:100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.
9. Tajik A.R., Khan T.I., Parezanović V. Raster angle impact on FDM-based additive manufactured fluidic oscillator. *International Journal of Thermofluids*. 2022;16:100230. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100230>.
10. Bayas E., Kumar P., Harne M. Impact of process parameters on mechanical properties of FDM 3d-printed parts: a comprehensive review. *European Chemical Bulletin*. 2023;12(5):708-725. <https://doi.org/10.48047/ecb/2023.12.si5.073>.
11. Vidakis N., David C., Petousis M., Sagris D., Mountakis N., Moutsopoulou A. The effect of six key process control parameters on the surface roughness, dimensional accuracy, and porosity in material extrusion 3D printing of polylactic acid: Prediction models and optimization supported by robust design analysis. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022;5:100104. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>.
12. D'Addona D.M., Raykar S.J., Singh D., Kramar D. Multi objective optimization of fused deposition modeling process parameters with desirability function. *Procedia CIRP*. 2021;99:707-710. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.117>.
13. Smetannikov O.Yu., Bekmansurov M.R., Il'inyh G.V., Dongauzer K.A. Modeling tress-strain state under laser powder cladding to determine product final warpage. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mechanics*. 2023;6:124-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.6.12>.
14. Raja S., Agrawal A.P., Patil P.P., Thimothy P., Capangpangan R.Y., Singhal P., Wotango M.T. Optimization of 3D printing process parameters of polylactic acid filament based on the mechanical test. *International Journal of Chemical Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5830869>.
15. 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;24:289-295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.
16. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads. *Procedia Structural Integrity*. 2021;34:59-64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.

17. 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>.
18. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*. 2022;113:107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>.
19. Deniskina G.Yu. CAD/CAM/CAE system for manufacturing structures from fibrous composite materials using 3D-printing. *Elektronnyj zhurnal "Trudy MAI"*. 2022;126. (In Russ.). <https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-21>. EDN: LBGNMV.
20. Rakishev A., Donenbayev B., Jamaludin K.R. Study of the mechanical characteristics of FDM (3d printed) parts: empirical and computational methods. *Nauka i tekhnika Kazahstana*. 2023;3:113-121. (In Russ.). <https://doi.org/10.48081/MFBQ8991>.
21. Raspopina V.B., Shemetov L.I., Sturov A.A. Determination of the longitudinal elastic modulus of anisotropic FDM structure in CAE environment and using a full-scale experiment. *Strengthening Technologies and coatings*. 2024;20(1):8-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2024-20-1-8-13>. EDN: ATVTIK.
22. Bechný V., Matuš M., Joch R., Drbůl M., Czán A., Šajgalík M., et al. Influence of the orientation of parts produced by additive manufacturing on mechanical properties. *Manufacturing Technology*. 2024;24(1):2-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.21062/mft.2024.021>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Распопина Вера Борисовна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации
авиационной техники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ vbr2604@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

Vera B. Raspopina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Aircraft
Engineering and Operation of Aviation Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ vbr2604@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

Мартынова Валентина Владимировна,

студент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
martinovavalentina1202@mail.ru

Valentina V. Martynova,

Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
martinovavalentina1202@mail.ru

Ступина Елизавета Антоновна,

студент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
liza_stupina03@mail.ru

Elizaveta A. Stupina,

Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
liza_stupina03@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Authors' contribution

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 14.10.2024 г.; принята к публикации 25.10.2024 г.

The article was submitted 05.09.2024; approved after reviewing 14.10.2024; accepted for publication 25.10.2024.