

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №12 (174). С.13-19.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №12 (174). P.13-19.

Научная статья
УДК 620.17
doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-13-19

Влияние температуры среды при изготовлении методом послойного наложения на механические характеристики деталей из акрилонитрил-бутадиен-стирола

Юрий Сергеевич Багайсков¹, д.т.н.
Александр Сергеевич Чернов², аспирант

^{1,2} Волжский политехнический институт ВолеГТУ, Волжский, Россия

¹ bagaiskov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2255-6064>

² chernov_ac@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5273-7693>

Аннотация. В работе исследовано влияние температуры окружающей среды на прочностные характеристики изделий, изготовленных методом послойного синтеза (FDM) из акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС). Основной проблемой, ограничивающей применение изделий, полученных данным методом, является недостаточная степень межслойной адгезии, что приводит к снижению общей механической прочности и нагрузочной способности. Следовало оценить влияние температуры окружающей среды на прочностные свойства полимерных изделий. В качестве решения предложено использование 3D-принтеров с нагреваемой камерой, что позволяет обеспечить равномерное нагревание и охлаждение материала во время производства, тем самым улучшить физико-механические свойства готовых изделий. Для оценки прочностных свойств проводились испытания двух типов образцов, изготовленных по ГОСТ 59929-2021 с различной ориентацией слоёв относительно направления прикладываемой нагрузки. Это позволило оценить прочность как самого полимера, так и межслойного соединения. Результаты испытаний образцов показали, что при печати в нагреваемой камере при температуре значительно повышаются значения прочности на растяжение и на изгиб. Анализ термограмм подтвердил более равномерное распределение температуры по слоям при использовании нагреваемой камеры, что способствует снижению внутренних напряжений и улучшению адгезии между слоями. Таким образом, применение активной термокамеры в FDM-печати позволяет существенно повысить качество и прочность изделий из акрилонитрил-бутадиен-стирола, приближая их свойства к литым аналогам, значительно расширяя область их применения в конструкциях, требующих высокой надёжности и нагрузочной способности. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации технологических режимов 3D-печати с целью повышения эксплуатационных характеристик изделий из термопластов.

Ключевые слова: FDM, аддитивные технологии, прочность, технологические параметры, 3D-печать, термограмма, послойное наложение, термокамера

Для цитирования: Багайсков Ю.С., Чернов А.С. Влияние температуры среды при изготовлении методом послойного наложения на механические характеристики деталей из акрилонитрил-бутадиен-стирола // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 12 (174). С. 13–19. doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-13-19

Influence of ambient temperature on the mechanical characteristics of parts made of acrylonitrile butadiene styrene when manufacturing by the fuse deposition modelling

Yuri S. Bagaiskov¹, D. Eng.

Alexander S. Chernov², PhD student

^{1,2} Volzhsky Polytechnic Institute of VolgSTU, Volzhsky, Russia

¹ bagaiskov@bk.ru

² chernov_ac@mail.ru

Abstract. The effect of ambient temperature on the strength characteristics of products manufactured by the fuse deposition modelling (FDM), made from acrylonitrile butadiene styrene (ABS) is investigated. The main problem limiting the use of products obtained by this method is the insufficient degree of interlayer adhesion, which leads to a decrease in overall mechanical strength and load capacity. It was necessary to evaluate the influence of ambient temperature on the strength properties of polymer products. As a solution, the use of 3D printers with a heated panel is proposed, which makes it possible to ensure uniform heating and cooling of the material during production, thereby it contributes to the improvement of the physical and mechanical properties of the finished products. To assess the strength properties, two types of samples were tested, manufactured according to the State Standard (GOST) 59929-2021 with different layer orientations relative to the direction of the applied load. This made it possible to evaluate the strength of both the polymer itself and the interlayer joint. The test results of the samples showed that when printing in a heated panel at some temperature, the values of tensile and flexing strength significantly increase. The analysis of thermal images confirmed a more uniform temperature distribution across the layers when using a heated panel, which helps to reduce internal stresses and improve adhesion between the layers. Thus, the use of an active thermal panel in FDM printing can significantly improve the quality and strength of acrylonitrile butadiene styrene products, bringing their properties closer to their cast clones, significantly expanding their scope of application in structures requiring high reliability and load capacity. The results of the study can be used to optimize the technological modes of 3D printing for the performance characteristics improvement in thermo-plastic products.

Keywords: FDM, additive technologies, strength, technological parameters, 3D-printing, thermal pattern, layering technique, thermal panel

For citation: Bagaiskov Yu.S., Chernov A.S. Influence of ambient temperature on the mechanical characteristics of parts made of acrylonitrile butadiene styrene when manufacturing by the fuse deposition modelling / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 12 (174). P. 13–19. doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-13-19

Введение

Широкое применение в настоящее время для изготовления как массовых, так и оригинальных деталей, получили аддитивные технологии с использованием 3D-принтеров. При этом применение деталей, изготовленных методом послойного наложения, часто ограничивается низкой прочностью изделий. Происходит это прежде всего в связи с недостаточной адгезией накладываемых слоев, наличием при этом определенного количества неплотностей и пор. Например, в работе [1] выявили повышение усталостной прочности при увеличении процента заполнения внутренней части изделия полимером. При этом полученные детали смогли работать без разрушения достаточно продолжительное время. Наполнители, такие как древесная мука, льняные волокна также положительно влияют на прочность повышая жесткость изделий, прочность и модуль упругости при наполнение конопляными волокнами [2]. Повышение температуры фильеры при экструзии полиэфиримида (ПЕИ, PEI) и полиэфирэфиркетона (ПЭЭК, PEEK) уменьшает количество пор в изделии и повышает прочность до 80 % от литевых аналогов этих полимеров [3]. Подобные проблемы

характерны и для достаточно распространенного для послойного наложения полимерного материала акрилонитрил-бутадиен-стирола.

Исследование влияния температуры среды в процессе наложения слоев из акрилонитрил-бутадиен-стирола представляет научный и практический интерес. При этом предлагается использовать устройства оснащенные активной термокамерой. В этом случае деталь изготавливается при непосредственном нагреве воздушной среды. Для некоторых полимеров наличие нагреваемой среды обязательно, так как при более низких температурах абсолютно отсутствует адгезия как к платформе построения, что приводит к невозможности изготовления чего-либо из данного полимера, так и между слоями, отсутствует спекание [4].

Принцип построения детали методом послойного наложения

Метод послойного наложения (Fused Deposition Modeling – FDM) представляет собой вид аддитивного производства, при котором трехмерные объекты создаются на основе полимерных материалов (филамент – filament – «нить»). В FDM нить подвергается нагреванию до плавления с последующим выдавливанием через сопло. Образовавшийся расплав служит

материалом для создания объекта на платформе печати. Послойное наложение расплавленного материала позволяет формировать трехмерные структуры, которые охлаждаются и застывают, образуя окончательное изделие [5].

Различают устройства, работающие в воздушной среде и в теплоизолированной среде, имеются устройства, поддерживающие

не более 40 °С, а также поддерживающие до 250 °С камере. Устройства с активной термокамерой отличаются наличием теплоизолированной среды от внешней, а также имеют нагреватели, которые и поддерживают заданную температуру. На данный момент в России такие устройства производят Total Z, 3DLife, Volgobot и др. [6]

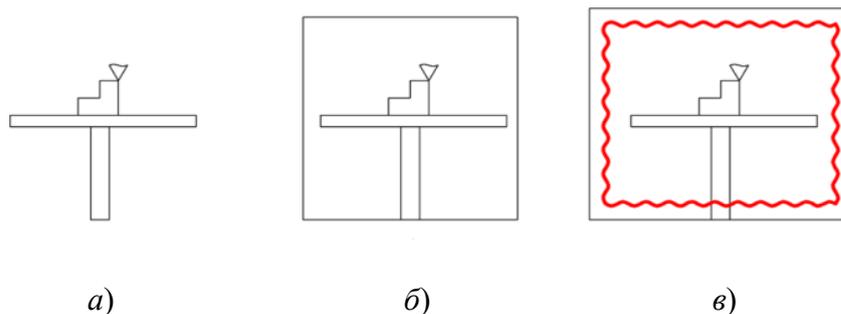


Рис. 1. Схематическая разница в устройствах, работающих по методу FDM:

a – печать в воздушной среде; *б* – печать в закрытой среде; *в* – печать в теплоизолированной среде с подогревом

Fig. 1. Schematic difference in devices operating using FDM:

a – printing in an ambient air; *b* – printing in a closed environment; *c* – printing in a heat-seal environment

Активная термокамера позволяет поддерживать заданную температуру во время всего процесса построения изделия методом послойного наложения. При этом температура, чаще всего, задается близкой к температуре стеклования материала, которым происходит печать. Находясь на нижней границе диапазона температуры стеклования, деталь не теряет геометрическую точность, коробление детали не происходит. Процесс печати в данном случае проходит с контролируемым охлаждением материала, происходит равномерный переход от аморфной структуры к полукристаллической [7], снижаются внутренние напряжения между слоями, пропадает потребность к последующей термообработке [8], увеличивается сила связи между молекулами [9, 10, 11]. Однако было показано, что при повышении температуры среды выше 65...70 °С может нарушаться геометрия детали, так как полимер при этой температуре довольно текуч. Хотя для акрилонитрил-бутадиен-стирола не используется охлаждение при печати [12], проблема описанная выше решается использованием обдува модели на минимальных-средних значениях.

Методика исследований

Исследование влияния применения термокамеры проводилось с применением образцов изготовленных по ГОСТ 59929 [13] из акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС, ABS). Образцы распечатаны с разной ориентацией на печатной платформе (рис. 2), от этого должна зависеть прочность изделий [14].

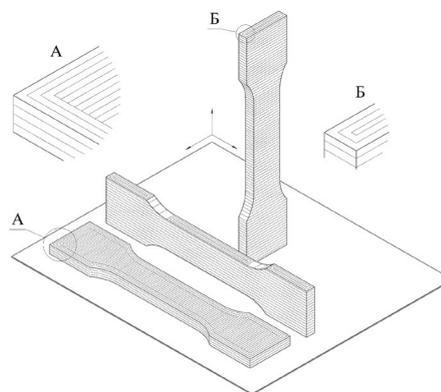


Рис. 2. Направление слоев, растра и контура детали в зависимости от ориентации детали при печати

Fig. 2. The direction of the layers, raster and contour of the part depending on the orientation of the part when printing

В работе применены образцы с перпендикулярным (ZX) и параллельным (XY) расположением слоев относительно прилагаемой нагрузки при растяжении, соответственно, образцы должны обладать наибольшей и наименьшей прочностью [15]. Ориентация образца ZX , при которой предполагаемая прочность минимальна, теоретически, наиболее показательна в ходе эксперимента, так как образцы рвутся поперёк слоев, а изламываются вдоль, и значит прочность самого образца сильно зависит от межслойной адгезии детали. При ориентации детали с направлением укладки контура детали вдоль прилагаемой

нагрузки (XY) при растяжении и поперёк при изгибе, нагрузку в основном будет испытывать сама нить полимера, соответственно прочность такого образца незначительно зависит от спекаемости слоев.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине Biss UT-02-0025. Теплографические исследования проводились с помощью тепловизора Testo 875-1, профилограммы получали на профилометре Mitutoyo SurfTest SJ-411 178-580-01D. Технологические параметры исследованных образцов указаны в табл. 1

1. Технологические параметры изготовления образцов

1. Technological parameters of sample production

Группа образцов	Температура фильеры, °C	Температура платформы, °C	Диаметр фильеры, мм	Высота слоя, мм	Температура среды построения, °C
При комнатной температуре	260	110	0,6	0,2	24
В камере	260	110	0.6	0,2	55

Результаты исследований

Результаты испытания на разрыв представлены на рисунке (рис. 3). Установлено, что при печати изделий в термоактивной камере повышается прочность изделий на разрыв и изгиб.

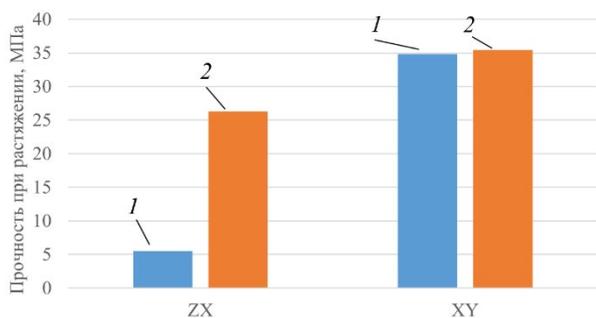


Рис. 3. Зависимости прочности при растяжении образцов, изготовленных без и с термокамерой, при различной схеме нагружения относительно слоев: 1 – без нагрева; 2 – нагрев камеры до 55 °C

Fig. 3. Dependences of the tensile strength of samples made without and with a thermal panel, with different loading patterns relative to the layers: 1 – without heating; 2 – heating of the panel up to 55 °C.

Так, прочность на разрыв образцов, на которых приложена нагрузка поперёк слоев (ZX) в среднем увеличилась в 4,7 раза (5,5 и 26,3 МПа соответственно), что составило 82 % от прочности образца, полученного методом литья на термопласт автомате – 32 МПа.

Прочность образцов, которым нагрузка приложена вдоль слоев (XY) варьируются в пределах 5 % при погрешности $\pm 0,5$ % (34,5 и 35,4 МПа соответственно) – 50 % от прочности литьевого образца (72 МПа). При испытании на изгиб, с приложением нагрузки вдоль слоев (ZX) прочность на изгиб у образца, изготовленного в термоактивной камере, выросла на 89 % (42,3 МПа) относительно образца, изготовленного при комнатной температуре (22,6 МПа), но составила 52 % от прочности литого образца (72 МПа). При нагружении поперек слоев (XY) прочность составила 63 МПа для образца, изготовленного при температуре камеры 24 °C и 67,5 МПа, для образца, изготовленного при температуре 55 °C.

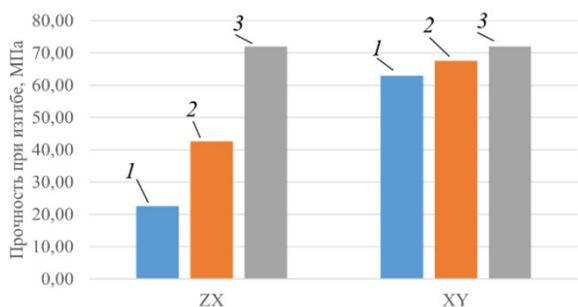


Рис. 4. Зависимости прочности при изгибе образцов, изготовленных без и с термокамерой, при различной схеме нагружения относительно слоев:

1 – без нагрева; 2 – нагрев камеры до 55 °С; 3 – образец, полученный литьем под давлением

Fig. 4. Bending strength dependences of samples made without and with a thermal panel, with different loading patterns relative to the layers:

1 – without heating; 2 – heating of the panel up to 55 °C.; 3 – is a sample obtained by injection molding

Анализ профилограмм показал, что уровень шероховатости поверхности слоистой части обоих видов образцов не имеет существенных различий.

С помощью термограммы (рис. 5) возможно изучить распределение температуры по слоям построения детали. Анализу подвергались значения вдоль линий, образца, изготавливаемого при комнатной температуре и в термокамере соответственно. Средняя температура вдоль линии P2 составила 54 °С при минимальной в 47 °С, вдоль линии P1 – 64 °С, с минимальной в 58 °С. Распределение температуры отображено в гистограмме распределения температур для P2 слева и P1 справа (рис. 6).

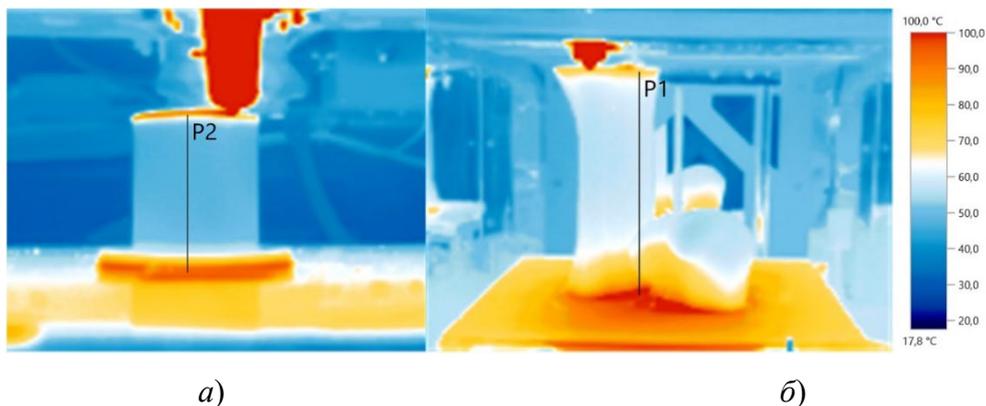


Рис. 5. Термограмма изделия в процессе печати:

a – при комнатной температуре; б – с активным нагревом

Fig. 5. Thermal diagram of the product during the printing process:

a – at room temperature; b – through active heating

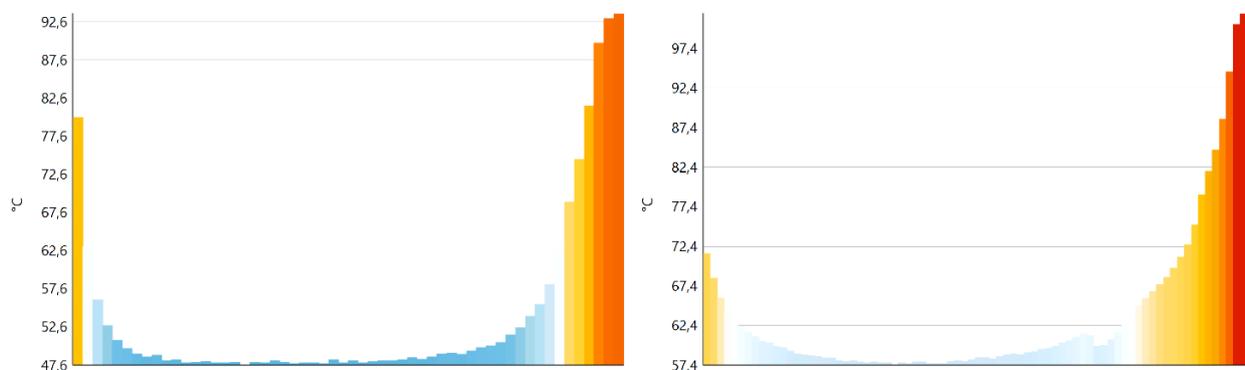


Рис. 6. Гистограмма распределения температур вдоль линии P2 и P1 соответственно

Fig. 6. Histogram of temperature distribution along the P2 and P1 lines, respectively

Выводы

В ходе исследования было установлено, что использование нагреваемой камеры при FDM-печати из АБС-пластика значительно улучшает механические свойства готовых изделий. Экспериментально доказано увеличение прочности на разрыв и изгиб на 370 % и 89 %, соответственно. Анализ термограмм подтвердил более равномерное распределение температуры по слоям при использовании нагреваемой камеры, что способствует снижению внутренних напряжений и улучшению межслойной адгезии.

Таким образом показано, что применение термокамеры при изготовлении методом послойного наложения изделий из полимерного материала является эффективным способом повышения прочности и качества продукции, особенно в условиях, где требуется высокая механическая стойкость.

Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации технологических режимов 3D-печати с целью повышения эксплуатационных характеристик изделий из термопластов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Muminović A.J.** Experimental failure analysis of polylactic acid gears made by additive manufacturing // *Procedia Structural Integrity*. 2023. Т. 46. С. 125–130.
2. **Mazzanti V., Malagutti L., Mollica F.** FDM 3D-printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties // *Polymers*. 2019. Т. 11. №. 7. С. 1094.
3. **Ding S.** Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM // *Polymer Testing*. 2019. Т. 78. С. 105948.
4. **Wickramasinghe S., Do T., Tran P.** FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments // *Polymers*. 2020. Т. 12. №. 7. С. 1529.
5. **Трубашевский Д.С.** Аддитивные зарисовки или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги. Воронеж: Умное Производство, 2021. 203 с.
6. **Трубашевский Д.С., Смокота Е.Г., Фадеев Д.С.** Рынок технологий аддитивного производства РФ. Отчет маркетингового исследования. М.: Клуб аддитивных технологий, 2024. 404 с.

7. **Zisopol D.G.** A Comparative Analysis of the Mechanical Properties of Annealed PLA // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2022. Т. 12. №. 4. P. 8978–8981.

8. **Boytsov E.** Why we Need a Heated Chamber for 3D-Printing with «High Performance» // *Materials Research Proceedings*, Temryuk, 06–10 сентября 2021 года. Temryuk, 2022. P. 237–246. DOI 10.21741/9781644901755-42. EDN UVJJDF.

9. **Влияние** технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 10 (82). С. 34–49. DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. EDN RARUXZ.

10. **Чернов А.С.** Исследование способов повышения прочностных характеристик изделий, полученных методом послойного наложения // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: Сборник материалов конференции, Волгоград, 16 сентября 2024 года. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2024. С. 58–59. EDN XBLIRK.

11. **Kuznetsov V.E.** Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process // *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Т. 26. №. 1. С. 107–121.

12. **Faes M., Ferraris E., Moens D.** Influence of inter-layer cooling time on the quasi-static properties of ABS components produced via fused deposition modelling // *Procedia Cirp*. 2016. Т. 42. С. 748–753.

13. **ГОСТ 59929-2021 (ASTM F2971-13)** Аддитивные технологии. Данные об образцах для испытаний, изготовленных с применением аддитивных технологических процессов. Общие требования. С. 6.

14. **Kristiawan R.B.** A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D-printing: Filament processing, materials, and printing parameters // *Open Engineering*. 2021. Т. 11. №. 1. С. 639–649.

15. **Шмелёв А.В., Ивченко В.И., Талалуев А.В.** Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов абс-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2021. № 4 (112).

REFERENCES

1. Muminović A.J. Experimental failure analysis of polylactic acid gears made by additive manufacturing // *Procedia Structural Integrity*. 2023. vol. 46. pp. 125–130.
2. Mazzanti V., Malagutti L., Mollica F. FDM 3D-printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties // *Polymers*. 2019. vol. 11. no. 7. pp. 1094.
3. Ding S. Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM // *Polymer Testing*. 2019. vol. 78. pp. 105948

4. Wickramasinghe S., Do T., Tran P. FDM-based 3D-printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments // *Polymers*. 2020. vol. 12. no. 7. pp. 1529.
5. Trubashevsky D.S. Additive sketches, or solutions for those who don't want to keep losing money. Voronezh: Smart Manufacturing, 2021. 203 p.
6. Trubashevsky D.S., Smokota E.G., Fadeev D.S. Russian market of additive manufacturing. Marketing research report. Moscow: Club of Additive Technologies, 2024. 404 p.
7. Zisopol D.G. A Comparative Analysis of the Mechanical Properties of Annealed PLA // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2022. vol. 12. no. 4. pp. 8978–8981.
8. Boytsov E. Why we Need a Heated Chamber for 3D Printing with «High Performance» // *Materials Research Proceedings*, Temryuk, 06–10 September, 2021. Temryuk, 2022, pp. 237–246. DOI 10.21741/9781644901755-42. EDN UVJJDF.
9. The influence of technological modes of FDM printing and the composition of the materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM-models (review) // *Proceedings of VIAM*. 2019. no. 10 (82). pp. 34–49. DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. EDN RARUXZ.
10. Chernov A.S. A study of ways to increase the strength characteristics of products obtained by layering // XXIX-th Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd region: Conference proceedings, Volgograd, September 16, 2024. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2024. pp. 58–59. EDN XBLIRK.
11. Kuznetsov V.E. Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process // *Rapid Prototyping Journal*. 2020. vol. 26. no. 1. pp. 107–121.
12. Faes M., Ferraris E., Moens D. Influence of inter-layer cooling time on the quasi-static properties of ABS components produced via fused deposition modelling // *Procedia Cirp*. 2016. vol. 42. pp. 748–753.
13. State Standard 59929-2021 (ASTM F2971-13) Additive technologies. Data on test samples manufactured using additive manufacturing processes. General requirements. P. 6.
14. Kristiawan R.B. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters // *Open Engineering*. 2021. vol. 11. no. 1. pp. 639–649.
15. Shmelev A.V., Ivchenko V.I., Talaluev A.V. Experimental and computational determination of mechanical properties of ABS plastic samples produced by 3D-printing // *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2021. no. 4 (112).

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.07.2025; одобрена после рецензирования 27.07.2025; принята к публикации 30.07.2025.

The article was submitted 05.07.2025; approved after reviewing 27.07.2025; assepted for publication 30.07.2025.