

УДК 620.172.2

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-98

Л.И. Гарипова¹, А.С. Батраков², М.А. Кальбах³

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ



¹Гарипова Ляйсан Ильдусовна,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ
Россия, Казань
E-mail: lyaysan_garipova@mail.ru



²Батраков Андрей Сергеевич,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ
Россия, Казань
E-mail: batrakov_a.c@mail.ru



³Кальбах Михаил Алексеевич,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ
Россия, Казань
E-mail: kalmbachmichael@mail.ru

Аннотация

В настоящей статье рассмотрено влияние высоты слоя h^* на прочностные характеристики изделия полученного методом FDM-печати. Прочностные характеристики определялись в ходе испытания на трехточечный изгиб. Показано, что предел прочности на изгиб существенно зависит от высоты слоя. Максимальные прочностные характеристики соответствуют печати с высотой слоя менее 65% от диаметра экструдера. При высоте слоя равной диаметру экструдера прочность снижается более чем в 2 раза. Дальнейшее увеличение высоты слоя печати приводит к резкому снижению прочности изделия вплоть до полной потери несущей способности.

Ключевые слова: прочность, 3D-печать, аддитивные технологии, трехточечный изгиб, FDM – метод.

Введение

В настоящее время активно развиваются и применяются аддитивные технологии в производстве [1]. Широкое распространение аддитивные технологии получают в таких сферах как строительство [2], медицина [3], авиация [4], автомобилестроение [5] и другие. Аддитивные технологии часто применяют в процессе прототипирования. Распространение аддитивных технологий связано с присущими им преимуществами: возможность создавать сложные геометрические объекты со сложной внутренней структурой, низкая стоимость, точность изготовления изделия и автоматизация процесса.

Существуют различные технологии трехмерной печати, такие как экструзионная печать, стереолитография, технология многоструйного моделирования, масочная стереолитография, ламинирование, электронно-лучевая плавка, лазерное спекание металлов и др. [6, 7]. В аддитивных технологиях применяются различные расходные материалы [8]: металлические порошки, смолы, различные виды пластика (ABS [9-12], PLA [12-14], PETG [12, 15, 16], Нейлон и другие).

В задачах прототипирования наиболее распространённой является метод послойного наплавления (FDM) тонкой нити из пластического материала (рис. 1). Основными преимуществами данного подхода является относительно высокая скорость, низкая стоимость и простота процесса.

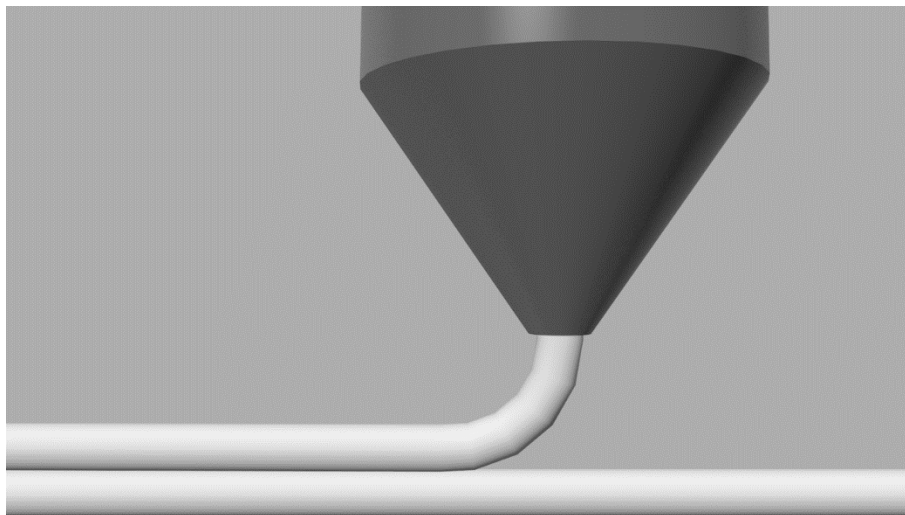


Рис. 1. Схема выхода пластика при FDM-печати

Важным вопросом при применении метода FDM печати является анализ прочностных характеристик готовых изделий. Анализ прочностных характеристик изделий выполняется экспериментальным методом. Наиболее распространенными видами испытаний являются растяжение [9, 10, 13-15, 17,] и трехточечный изгиб [16, 18, 19]. Обзор литературы

показал, что прочностные характеристики изделия зависят от множества параметров печати. Так, например, в работах [14, 16, 18,] исследовалось влияние плотности заполнения на характеристики материала. Наибольшие значения прочности на изгиб соответствуют 100% заполнению материала. Результаты испытаний различных авторов сходных образцов имеют некоторый разброс прочностных характеристик. Так для материала PETG максимальное напряжение при трехточечном изгибе находится в диапазоне 65-70 МПа [16, 18]. В работах [11, 15] рассматривалось влияние плотности заполнения, ориентации печати на прочность при растяжении. Для материала PETG предел прочности на растяжения варьируется в диапазоне от 49 до 77 МПа [15].

Одним из недостатков технологии FDM печати является анизотропная структура получаемых изделий. Структура материала после FDM печати рассматривалась с помощью микроскопов в работах [9, 10, 20]. Нити между слоями соединяются между собой за счет адгезии в расплавленном состоянии (процесс экструзии рассмотрено в работе [21]). Качество адгезии существенно зависит от настроек процесса печати. Некачественная адгезия приводит к снижению прочностных характеристик всего изделия, поэтому крайне актуальным является вопрос выбора рациональных параметров процесса печати. Целью настоящей работы является определение рационального параметра печати («высоты слоя») для обеспечения высоких прочностных характеристик изделия. Для достижения поставленной цели требуется выполнить экспериментальное исследование влияния «высоты» слоя на прочностные характеристики изделия.

Методы

Параметры процесса печати регулируются в специализированных программах (например, Repetier-Host V2.3.2). Одним из важных параметров является высота слоя («качество» печати), а, именно, расстояние между поверхностью и плоскостью сопла экструдера h^* (рис. 2).

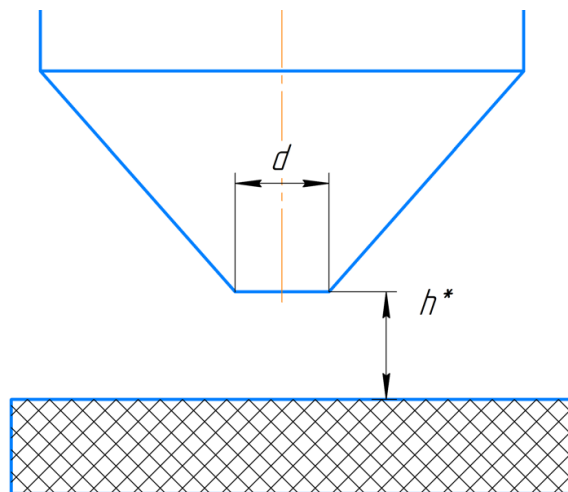


Рис. 2. Параметр высота слоя h^*

В настоящей работе анализ влияния параметра h^* на прочностные характеристики изделия проводится экспериментальным методом. Эксперимент подразумевает собой испытания напечатанного образца на трехточечный изгиб в соответствии с ГОСТ 56810-2015. Эксперименты были выполнены на разработанном испытательном стенде [22, 23]. В качестве объекта исследования рассматривались образцы в виде параллелепипеда с габаритными размерами 5*15*100 мм. Трехточечный изгиб выполнялся методом центрального нагружения образца, установленного на опорах на расстоянии 80 мм (Рис. 3).

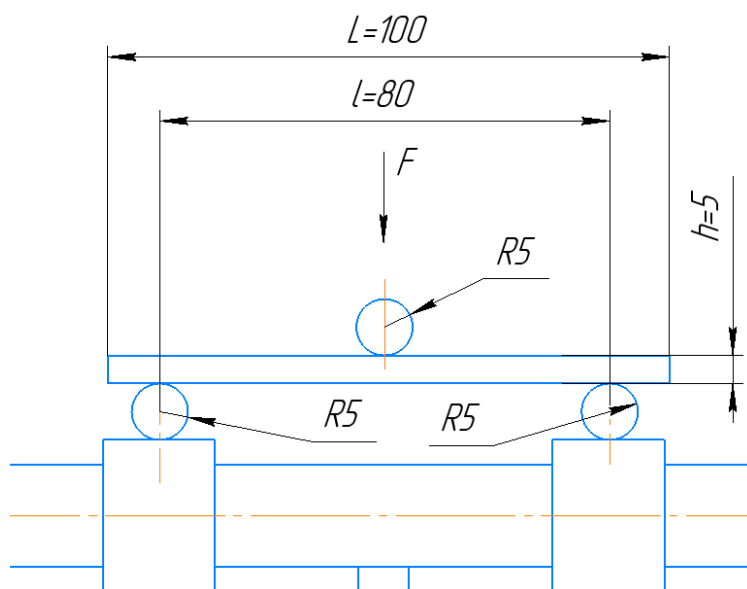


Рис. 3. Схема нагружения образца

Нагружение выполнялось до разрушения испытуемого образца, при этом фиксировалась максимальная нагрузка. Максимальное напряжение определялось по формуле:

$$\sigma = \frac{PLh}{8J},$$

где момент P – максимальная нагрузка, L – расстояние между опорами (80 мм), h – высота образца (5 мм), J – момент инерции. Момент инерции определяется следующим образом:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12},$$

здесь b – ширина образца (15 мм).

Результаты

Во время эксперимента испытывались образцы, отличающиеся параметром h^* в диапазоне от 0.1 до 0.4 мм. Печать выполнялась на принтере Zenit 3D с диаметром экструдера 0.3 мм. Результаты испытаний представлены на рисунках 4 и 5.

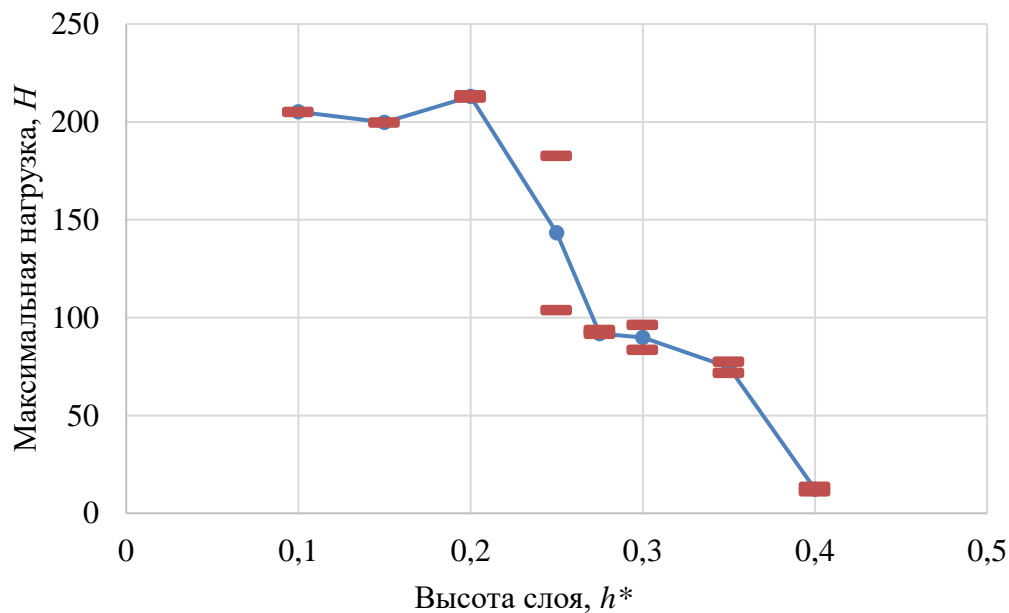


Рис. 4. Зависимость максимальной нагрузки от высоты слоя

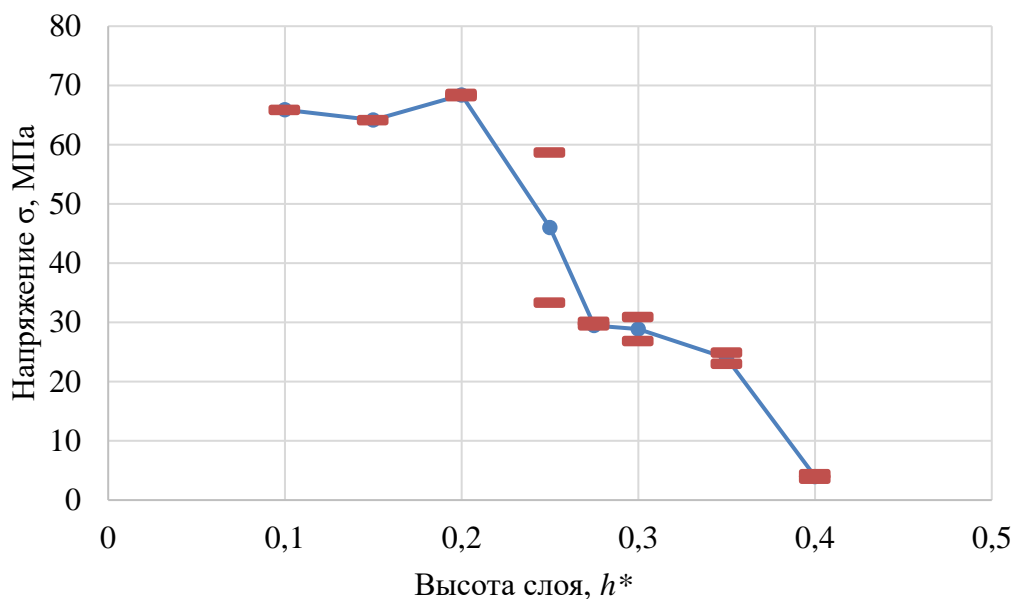


Рис. 5. Зависимость напряжения от высоты слоя

Обсуждение

Из представленных на рисунках 4 и 5 данных следует, что прочность образца существенно зависит от выбранного параметра h^* . При малых значениях высоты слоя h^* от 0,1 мм до 0,2 мм максимально допустимое напряжение находится в диапазоне 64-69 МПа, что соответствует результатам экспериментальных исследований других авторов [16, 18]. Согласование данных свидетельствует о достоверности полученных результатов настоящей работы. При увеличении высоты слоя h^* до диаметра экструдера, допустимое максимальное напряжение снижается практически в 2 раза и составляет порядка 30 МПа. Последующее увеличение высоты слоя h^* приводит к дальнейшему снижению прочностных характеристик изделия до полной потери несущей способности ($h^* > 0.4$ мм)

Полученная зависимость объясняется тем, что при высоте слоя h^* меньше диаметра сопла происходит принудительное растекание нити под давлением экструзии, что приводит к увеличению эффективной площади контакта между слоями. При значениях параметра h^* больше диаметра сопла, экструдированная нить свободно ложится на нижние слои, при этом эффективная площадь контакта и адгезия существенно снижаются.

Заключение

Таким образом, экспериментально доказано, что для обеспечения высоких прочностных характеристик изделий высоту слоя h^*

рекомендуется выбирать менее чем диаметр сопла. Значительное уменьшение параметра h^* не приводит к увеличению прочности на изгиб, но приводит к увеличению потребного времени печати. В качестве рациональной высоты слоя h^* можно рекомендовать значение равное 65% от диаметра сопла ($h^* = 0.65d$). Дальнейшее уменьшение параметра h^* возможно только в том случае, если есть необходимость правильного воспроизведения геометрии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01110, <https://rscf.ru/project/23-79-01110/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Касимов Р. М. Определение параметров FDM принтера с учётом геометрических размеров моделей. Наука без границ. 2021. № 5 (57). С. 39-45.
- [2] Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати. Известия КГАСУ. 2022. № 1(59). С 64-79. doi: 10.52409/20731523_2022_1_64.
- [3] Takayoshi Nakano, Koji Nagihara. Additive manufacturing of medical devices. ASM Handbook, Volume 23A, Additive Manufacturing in Biomedical Applications. 20 p. doi 10.31399/asm.hb.v23A.a0006905.
- [4] Ушакова Е.С., Арефьев К.Ю., Полянский А.Р. Моделирование теплопрочностных характеристик элементов конструкции ракетного двигателя твердого топлива, изготовленных методом прототипирования. Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение. Авиационная и ракетно-космическая техника. #4 [697]. 2018. С. 58-67.
- [5] Нефёлов И.С, Баурова Н.И. Исследование прочностных характеристик соединений пластмассовых изделий, напечатанных при помощи аддитивных технологий. Техника и технология транспорта. 2019. № S13. С. 37. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-37PIR.19.pdf>
- [6] Mohammed Raffic N., Ganesh Babu K., Rajasekaran Saminathan, Haitham Nadidi. Flexural modulus enhancement and minimization of printing time and part weight for PET-G, using Taguchi-GRA-TOPSIS techniques. Mater. Plast., 59 (3), 2022, 109-127. <https://doi.org/10.37358/Mat.Plust.1964>.
- [7] Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. 98 с.
- [8] Дожделев А.М., Лаврентьев А.Ю. Обзор расходных материалов для 3D печати методом послойного наплавления. International Journal of Humanities and Natural Sciences. Vol.8-2, 2019. С.16-18.

- [9] 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. # 4·2021. С. 1-15. doi:10.18698/2308-6033-2021-4-2070.
- [10] Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Идентификация параметров модели ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления. Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. № 1 (25). С. 130–140.
- [11] Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Сорокин А.Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор). Труды ВИАМ. №10 (82) 2019. С. 34-49.
- [12] Vikneswaran S.K., Nagarajan P., Dinesh S.K., Senthil Kumar K.L., A. Megalingam. Investigation of the tensile behaviour of PolyLactic Acid, Acrylonitrile Butadiene Styrene, and Polyethylene Terephthalate Glycol materials. Materials Today: Proceedings 66 (2022) 1093–1098. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.897>.
- [13] Ермакова В. А., Гасперович Е. В., Ермаков А. И., Литвяк В. В. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA. Наука и техника. Т. 21, № 2. 2022. С. 107-113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>.
- [14] Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765–776. doi: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.
- [15] Петров П. А., Агзамова Д. Р., Шмакова Н. С., Пустовалов В. А., Сапрыкин Б. Ю., Чмутин И. А., Жихарева Е. Д. Свойства пластика PETG после 3D-печати по технологии FFF. Часть 2. Станкоинструмент. № 2. (027) 2022. doi:10.22184/2499-9407.2022.27.2.58.64. С. 58-64.
- [16] Durgashyam K., Indra Reddy M., Balakrishna A., Satyanarayana K. Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method. Materials Today: Proceedings 18 (2019) 2052–2059. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.082>.
- [17] Низина Т. А., Низин Д. Р., Миронов Е. Б., Мартыанова А. В. Влияние технологических режимов на упруго-прочностные характеристики FDM-печатных образцов. Огарёв-Online. 2022. № 3 (172). С. 1-7.

- [18] Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Ананьин С.В., Белопловтов С.В. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати. Ползуновский Вестник № 2, 2016. С. 61-64.
- [19] Mohammed Raffic N., Ganesh Babu K., Rajasekaran Saminathan, Haitham Nadidi. Flexural modulus enhancement and minimization of printing time and part weight for PET-G, using Taguchi-GRA-TOPSIS techniques. Mater. Plast., 59 (3), 2022, 109-127. <https://doi.org/10.37358/Mat.Plast.1964>.
- [20] Балашов А. В., Маркова М. И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью. Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». №1 (2019). 15 с.
- [21] Kudryashova O.V., Toropkov N.E., Lerner M.I., Vorozhtsov A.V. Mathematical model of extrusion in FDM 3D printing technology. Materials Physics and Mechanics. 2022. 50(3). 388-400. Publisher: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University http://dx.doi.org/10.18149/MPM.5032022_3.
- [22] Гарипова Л.И., Батраков А.С., Хабибуллин Ф.Ф. Механические характеристики деталей, изготавливаемых методом FDM-печати. Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1.
- [23] Арсланов М. А. Гарипова Л.И. Разработка испытательного стенда для определения механических свойств деталей при трехточечном изгибе. XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований». – Альметьевский филиал ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». 16 апреля, 2024.

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupoleva-
KAI.

Abstract

This article examines the layer height h^* on the strength characteristics of products manufactured by FDM printing. Strength characteristics are ensured during three-point bending tests. It is shown that the flexural strength depends on the layer height. Maximum flexural strength corresponds to a layer height of less than 65% of the extruder diameter. When the layer height is equal to the extruder diameter, the flexural strength drops by more than 2 times. An increase in the height of the printing layer leads to a sharp decrease in the flexural strength of materials up to a complete loss of strength capacity.

Key words: strength, 3D printing, additive technologies, three-point bending, FDM method

REFERENCES

- [1] Kasimov R. M. Determination of FDM printer parameters taking into account the geometric dimensions of the models. *Science without borders*. 2021. № 5 (57). Pp. 39-45.
- [2] Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina L.V. Technology and quality control of construction 3D printing. *News of Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022. № 1(59). Pp. 64-79. doi: 10.52409/20731523_2022_1_64.
- [3] Takayoshi Nakano, Koji Hagihara. Additive manufacturing of medical devices. *ASM Handbook, Volume 23A, Additive Manufacturing in Biomedical Applications*. 20 p. doi 10.31399/asm.hb.v23A.a0006905.
- [4] Ushakova E.S., Arefiev K.Yu., Polyansky A.R. Modeling of thermal strength characteristics of solid fuel rocket engine structural elements manufactured by prototyping. *News of Higher Educational Institutions. Mechanical engineering. Aviation, rocket and space technology*. #4 [697]. 2018. C. 58-67.
- [5] Nefelov I.S., Baurova N.I. Study of the strength characteristics of joints of plastic products printed using additive technologies. *Transport engineering and technology*. 2019. № S13. C. 37. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-37PIR.19.pdf>

- [6] Mohammed Raffic N., Ganesh Babu K., Rajasekaran Saminathan, Haitham Hadidi. Flexural modulus enhancement and minimization of printing time and part weight for PET-G, using Taguchi-GRA-TOPSIS techniques. *Mater. Plast.*, 59 (3), 2022, 109-127. <https://doi.org/10.37358/Mat.Plast.1964>.
- [7] Shkuro A.E., Krivonogov P.S. Technologies and materials of 3D printing [Electronic resource]: textbook. allowance. Ekaterinburg: Ural. state forestry engineering univ., 2017. 98 p.
- [8] Dozhdelev A.M., Lavrentiev A.Yu. Review of consumables for 3D printing using layer-by-layer deposition. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. Vol.8-2, 2019. Pp.16-18.
- [9] Shmelev A.V., Ivchenko V.I., Talaluev A.V. Experimental and computational determination of the mechanical characteristics of ABS plastic samples under tension, manufactured by 3D printing. *Engineering Journal: Science and Innovation*. # 4·2021. Pp. 1-15. doi:10.18698/2308-6033-2021-4-2070.
- [10] Kartashova E. D., Muizemnek A. Yu. Identification of model parameters of ABS plastic produced by layer-by-layer deposition. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2018. № 1 (25). Pp. 130-140.
- [11] Kondrashov S.V., Pykhtin A.A., Larionov S.A. Sorokin A.E. 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 all-Russian scientific research institute of aviation materials*. №10 (82) 2019. Pp. 34-49.
- [12] Vikneswaran S.K., Nagarajan P., Dinesh S.K., Senthil Kumar K.L., A. Megalingam. Investigation of the tensile behaviour of PolyLactic Acid, Acrylonitrile Butadiene Styrene, and Polyethylene Terephthalate Glycol materials. *Materials Today: Proceedings* 66 (2022) 1093–1098. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.897>.
- [13] Ermakova V. A., Gasperovich E. V., Ermakov A. I., Litvyak V. V. Study of the strength characteristics of products produced by 3D printing from PLA. *Science and technology*. T. 21, No. 2. 2022. Pp. 107-113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>.
- [14] Petrov V. M., Bezpalkhuk S. N., Yakovlev S. P. On the influence of structure on the strength of plastic products produced by 3D printing. *Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 765–776. doi: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.
- [15] Petrov P. A., Agzamova D. R., Shmakova N. S., Pustovalov V. A., Saprykin B. Yu., Chmutin I. A., Zhikhareva E. D. Properties of PETG

- plastic after 3D printing using FFF technology. Part 2. Machine tools. No. 2. (027) 2022. doi:10.22184/2499-9407.2022.27.2.58.64. Pp. 58-64.
- [16] Durgashyam K., Indra Reddy M., Balakrishna A., Satyanarayana K. Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method. *Materials Today: Proceedings* 18 (2019) 2052–2059. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.082>.
- [17] Nizina T. A., Nizin D. R., Mironov E. B., Martyanova A. V. Influence of technological modes on the elastic-strength characteristics of FDM-printed samples. *Ogarev-Online*. 2022. No. 3 (172). Pp. 1-7.
- [18] Balashov A.V., Cherdantsev A.O., Novikovskiy E.A., Ananyin S.V., Beloplotov S.V. Study of the strength of products produced by 3D printing. *Polzunovsky Bulletin* No. 2, 2016. Pp. 61-64.
- [19] Mohammed Raffic N., Ganesh Babu K., Rajasekaran Saminathan, Haitham Hadidi. Flexural modulus enhancement and minimization of printing time and part weight for PET-G, using Taguchi-GRA-TOPSIS techniques. *Mater. Plast.*, 59 (3), 2022, 109-127. <https://doi.org/10.37358/Mat.Plast.1964>.
- [20] Balashov A.V., Markova M.I. Study of the structure and properties of products produced by 3D printing. *Electronic scientific journal. «Engineering Bulletin of the Don»*. №1 (2019). 15 p.
- [21] Kudryashova O.B., Toropkov N.E., Lerner M.I., Vorozhtsov A.B. Mathematical model of extrusion in FDM 3D printing technology. *Materials Physics and Mechanics*. 2022. 50(3). 388-400. Publisher: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University http://dx.doi.org/10.18149/MPM.5032022_3.
- [22] Garipova L.I., Batrakov A.S., Khabibullin F.F. Mechanical characteristics of parts manufactured using FDM printing. *Russian Aeronautics*. 2024. No. 1.
- [23] Arslanov M.A. Garipova L.I. Development of a test bench for determining the mechanical properties of parts under three-point bending. XIII All-Russian Scientific and Practical Conference «Professional communications in the scientific environment – a factor in ensuring the quality of research». – Almetyevsk branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev-KAI». April 16, 2024.