

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.172

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-46-51



Исследование прочности 3D-печатных изделий при варьировании технологических параметров в процессе печати

*Максим Витальевич Турченко, студент*¹

turchenko.maksim.v@mail.ru

Юлия Александровна Гончарова[✉], научный сотрудник²goncharova@vimlab.ru[✉]*Руслан Михайлович Касимов, инженер*²

ruslankm@mail.ru

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, корп. 1²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Технология аддитивного производства деталей позволяет существенно сократить затраты на ремонт техники, однако закономерности формирования свойств таких деталей недостаточно изучены. Проведены исследования зависимости предела прочности 3D-печатных образцов от количества слоев стенки и плотности заполнения. Образцы, изготовленные согласно ГОСТ 11262-2017 с помощью 3D-печати по технологии FDM из пластика ABS, испытывались на статическое растяжение. Было изготовлено две группы образцов, которые отличались технологическими параметрами 3D-печати. В первой группе стенка образцов формировалась в 4 слоя, плотность заполнения образцов варьировалась в диапазоне 20...100%. Во второй группе количество слоев стенки варьировалось от 2 до 10, плотность заполнения образцов соответствовала 33%. При изготовлении образцов температура экструдера составляла 230°C, температура стола – 110°C, высота слоя – 0,15 мм, скорость печати – 60 мм/с. Анализ условного предела текучести образцов показал рост их прочности с увеличением количества слоев стенки. Существенное различие показателей прочности наблюдалось в образцах с шестью слоями и более. Значительный разброс значений условного предела текучести объясняется наличием дефектов в образцах после печати. При плотности заполнения более 40% наблюдается значительный прирост прочности за счет уплотнения связей молекул полимера между собой. В интервале 20...40% показатель прочности не изменялся, поскольку в данном диапазоне происходили одинаковые структурные изменения. Установлено, что для изготовления полимерных деталей сельскохозяйственных машин с помощью 3D-печати по технологии FDM с максимальными прочностными характеристиками необходимо, чтобы количество слоев стенки не превышало количества слоев внутреннего периметра, а плотность заполнения деталей составляла 100%.

Ключевые слова: технология аддитивного производства, 3D-печать, плотность заполнения образцов, количество слоев стенки, статическое растяжение, условный предел текучести, прочность полимерных деталей

Формат цитирования: Турченко М.В., Гончарова Ю.А., Касимов Р.М. Исследование прочности 3D-печатных изделий при варьировании технологических параметров в процессе печати // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 2. С. 46-51. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-46-51>

© Турченко М.В., Гончарова Ю.А., Касимов Р.М., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Study of the strength of 3D-printed products with varying technological parameters in the printing process

*Maksim V. Turchenko, Student*¹

turchenko.maksim.v@mail.ru

Yulia A. Goncharova[✉], Research Engineer²goncharova@vimlab.ru[✉]*Ruslan M. Kasimov, Engineer*²

ruslankm@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University (National Research University); 2nd Baumanskaya Str., 5, Moscow, 105005, Russian Federation²Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The technology of additive manufacturing of parts makes it possible to significantly reduce the cost of machinery repair. However, the property formation laws of such parts have not been sufficiently studied. The authors have studied

the relationship between the ultimate strength of 3D-printed samples and the number of wall layers and infill density. Samples produced according to GOST 11262-2017 by 3D printing using FDM technology from ABS plastic were tested for static stretching. Two groups of samples, different in technological parameters of 3D-printing, were made. In the first group the wall of the samples was formed in four layers, the density of the sample fill varied in the range of 20 to 100%. In the second group, the number of wall layers varied from 2 to 10, the infill density of the samples corresponded to 33%. When samples were made, extruder temperature was 230°C, table temperature – 110°C, layer height – 0.15 mm, and printing speed – 60 mm/s. An analysis of the yield strength of the samples showed an increase in strength with an increase in the number of wall layers. Significant difference of strength values was observed in samples with six layers and more. Significant variation of yield strength values can be explained by the presence of defects in the samples after printing. When infill density exceeded 40%, a significant increase in strength was observed due to the densification of polymer molecule bonds. In the range of 20 to 40%, the strength index did not change, because the same structural changes occurred in this range. It was found that the number of wall layers should not exceed the number of inner perimeter layers and the infill density of the parts should be 100% to produce polymeric parts of agricultural machinery by 3D printing using FDM technology with maximum strength characteristics.

Keywords: additive manufacturing technology, 3D printing, sample infill density, number of wall layers, static stretching, conditional yield strength, strength of polymer parts

For citation: Turchenko M.V., Goncharova Yu.A., Kasimov R.M. Study of the strength of 3D-printed products with varying technological parameters in the printing process. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(2):46-51. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-46-51>.

Введение. При разработке новой эффективной сельскохозяйственной техники перспективным является применение в ее конструкциях полимерных деталей, обладающих малой плотностью, высокими прочностными характеристиками и высокой технологичностью¹ [1-3]. Использование новых материалов влечет за собой внедрение новых технологий изготовления из них различных деталей, в том числе при ремонте техники. При изготовлении сельскохозяйственной техники применяют полимерные материалы и технологию 3D-печати (рис. 1) [4].

Технология аддитивного производства, или 3D-печать, на сегодняшний день является одной из наиболее перспективных технологий изготовления полимерных

деталей [5-9]. Технология позволяет изготавливать изделия любой сложности и существенно сокращать затраты временных и материальных ресурсов. В процессе изготовления детали сначала создается ее 3D-модель и производится подбор необходимых технологических параметров (скорость печати, количество слоев стенки, толщина и высота слоя и др.). После этого происходит разбиение 3D-модели на слои в специальном программном обеспечении, а затем производят печать. Выбранные параметры печати напрямую влияют на механические характеристики полученного изделия.

На сегодняшний день существует большое количество технологий 3D-печати (FDM, SLS, SLA, SLM и др.), но самой распространенной из них является FDM (fused



Рис. 1. Детали руки-манипулятора для автоматизированной платформы сбора плодовых культур, изготовленные 3D-печатью из полимерных материалов

Fig. 1. Parts of a manipulator arm for an automated platform for picking fruit crops, made by 3D printing from polymer materials

¹ Дорохов А.С. Инновационное технологическое обеспечение производства овощных культур / А.С. Дорохов, А.В. Сибирев, А.Г. Аксенов и др. М.: ООО «Цифровичок». 2022. 318 с.

deposition modeling – моделирование методом послойного наплавления), представляющая собой послойное наплавление термопластичного полимерного материала на печатную платформу по заранее подготовленной программе (рис. 2). Широкою распространенностью данная технология получила за счет большого спектра используемых термопластичных полимеров (PLA, ABS, PVA, Nylon, PC, HDPE, PP, PCL, PPSU, Acrylic, PET, HIPS), низкой стоимости оборудования и простоты его использования [10-13].

Цель исследований: исследование предела прочности FDM-печатных образцов в зависимости от количества слоев стенки при печати и плотности заполнения.

Материалы и методы. В качестве материала образцов был выбран пластик ABS, широко используемый в агропромышленном комплексе за счет высоких физико-механических свойств (прочность при растяжении – 35...50 МПа; относительное удлинение – 15...20%; модуль упругости при растяжении (при комнатной температуре) – 1700...2930 МПа; усадка – 0,4...0,7%). Данный материал может в течение длительного времени работать при температуре до 75...80°C. Помимо высоких физико-механических свойств, пластик ABS обладает хорошими технологическими свойствами с точки зрения 3D-печати по технологии FDM [14].

Образцы изготавливались согласно ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). На первом этапе создавалась 3D-модель в специальном программном обеспечении. После этого подготавливали ее к 3D-печати по технологии FDM по программе «Слайсер» и задавали параметры печати. Было изготовлено две группы образцов: в первой группе у образцов менялся процент заполнения (от 20 до 100%) с шагом 20% при равном количестве слоев стенки (4 слоя); для второй группы изменялось количество слоев стенки (с 2 до 10) с шагом 2 слоя при одинаковом проценте заполнения (33%) (рис. 3). На рисунке 4 представлен внешний вид полученных образцов.

Для изготовления образцов применялись следующие технологические параметры 3D-печати:

- температура экструдера – 230°C;
- температура стола – 110°C;
- высота слоя – 0,15 мм;
- количество слоев стенки – 4 слоя (для первой группы образцов) и 2...10 слоёв с шагом 2 слоя (для второй группы образцов);
- плотность заполнения образцов – 20...100% с шагом 20% (для первой группы образцов), 33% (для второй группы образцов);
- скорость печати – 60 мм/с.

Испытания на статическое растяжение проводились на испытательной машине ТОЧПРИБОР-КБ модели IP20. Принцип работы таких машин заключается в создании постепенно увеличивающейся нагрузки на образец и регистрации величины, действующей на образец силы

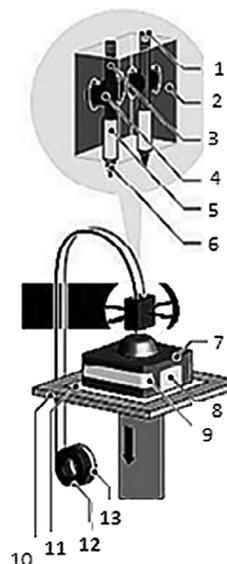


Рис. 2. Схема 3D-печати по технологии FDM:

- 1 – нить поддерживающего материала; 2 – рабочая головка;
- 3 – нить конструктивного материала; 4 – направляющие валики;
- 5 – камеры плавления; 6 – сопла; 7 – модель; 8, 9 – заполнение пустот поддерживающим материалом; 10 – рабочая платформа;
- 11 – подкладка из пеноматериала; 12, 13 – катушки с поддерживающими и конструктивными материалами

Fig. 2. 3D printing scheme using FDM technology:

- 1 – thread of supported material; 2 – working head;
- 3 – thread of structural material; 4 – guide rollers; 5 – melting chambers;
- 6 – nozzles; 7 – model; 8, 9 – filling cavities with supporting material;
- 10 – working platform; 11 – foam material lining;
- 12, 13 – coils with structural and supporting materials

Плотность заполнения, % Filling density, %	20	60	100
	40	80	
Слой стенки Wall Layers	2	6	10
	4	8	

Рис. 3. Параметры печати экспериментальных образцов

Fig. 3. Printing parameters of experimental samples



Рис. 4. Внешний вид полученных образцов

Fig. 4. External view of the obtained samples

и его деформации. В ходе этого процесса диаграммный аппарат вычерчивает в масштабе кривую, называемую диаграммой растяжения.

Результаты и их обсуждение. Прочность полимерных деталей при изменении количества слоев стенки приведена в таблице 1 и на рисунке 5.

Анализируя данные таблицы 1, можно отметить, что при увеличении количества слоев стенки прочность полимерных деталей возрастает, и это можно связать с уплотнением связей между слоями. Существенная разница в упрочнении за счет увеличения количества слоев стенки заметна в образцах с шестью и более слоями. Некоторые значения одного и того же испытания сильно отличаются, что объясняется дефектами, образовавшимися в процессе печати образцов – локальными разрывами и несплошностями, обусловленными малейшими отклонениями любого параметра печати (рис. 6). Однако рассматривая полученную зависимость от средних значений, можно сказать, что прирост прочности наблюдается.

При максимальном количестве слоев стенки (10) наблюдается уменьшение прочности полимерных деталей за счет низкой адгезии между слоями стенок и внутренней частью образца. В данном случае слоев стенок было гораздо больше, чем слоев образца, что привело к уменьшению уровня межслойной адгезии (отслаиванию) (рис. 7).

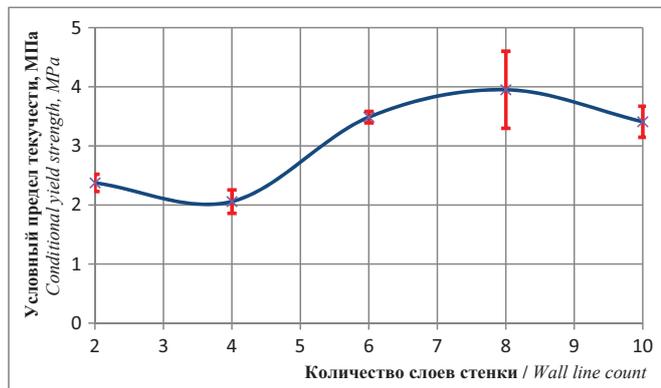


Рис. 5. Зависимость изменения прочности от количества слоев стенки

Fig. 5. Relationship between the strength change and the number of wall layers

Результаты измерения прочности образцов при варьировании плотности заполнения приведены в таблице 2 и на рисунке 8.

При плотности заполнения 20...40% прочность полимерных деталей не изменяется, поскольку в данном интервале происходят одинаковые структурные изменения. При плотности выше 40% наблюдается значительный прирост прочности за счет уплотнения связей молекул полимера между собой. С увеличением плотности заполнения образцов уменьшается количество пустот в структуре материала. При достижении 100% наблюдается максимальный прирост прочности, поскольку молекулы полимера плотно взаимодействуют друг с другом и практически не создают внутренних напряжений, приводящих к разупрочнению. Образование таких напряжений может произойти в процессе эксплуатации изделия за счет присутствия в структуре материала пустот, которые молекулы не смогут заполнить, что и будет способствовать разрушению.



Рис. 6. Дефекты печати образца
Fig. 6. Sample printing defects



Рис. 7. Отслаивание стенок образца
Fig. 7. Peeling of the sample walls

Результаты измерения прочности при изменении количества слоев стенки

Таблица 1

Results of strength measurement when changing the number of wall layers

Table 1

Количество слоев стенки Number of wall layers	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа Conditional yield strength $\sigma_{0,2}$, MPa			Среднее значение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, МПа Average value of the conditional yield strength $\sigma_{0,2}$, MPa
	Образец № 1 / Sample 1	Образец № 2 / Sample 2	Образец № 3 / Sample 3	
2	2,275	2,425	2,425	2,375 ± 0,146
4	1,923	2,116	2,136	2,058 ± 0,198
6	3,425	3,538	3,497	3,487 ± 0,096
8	4,198	3,504	4,147	3,733 ± 0,652
10	3,229	3,505	3,492	3,409 ± 0,262

Таблица 2

Прочность образцов при изменении плотности заполнения

Table 2

Results of strength measurement when changing filling density

Плотность заполнения образцов, % Infill Density, %	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа Conditional yield strength $\sigma_{0,2}$, MPa			Среднее значение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, МПа Average value of the conditional yield strength $\sigma_{0,2}$, MPa
	Образец № 1 / Sample 1	Образец № 2 / Sample 2	Образец № 3 / Sample 3	
20	1,149	1,916	2,214	1,760±0,029
40	2,558	1,333	1,434	1,775±1,146
60	2,6	1,312	2,875	2,262±1,407
80	1,575	3,525	3,481	2,860±1,877
100	2,058	4,675	3,72	3,484±2,233

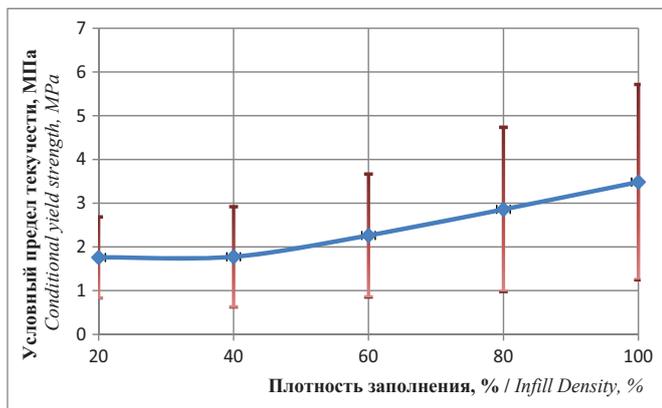


Рис. 8. Зависимость изменения прочности от плотности заполнения образцов

Fig. 8. Relationship between the strength change and the filling density

Список использованных источников

1. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Сазонов Н.В. Лабораторные исследования ударных воздействий роликовой сортировальной машины на клубни картофеля // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. Т. 22, № 1. С. 119-127. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.119-127>
2. Дорохов А.С., Свиридов А.С., Гончарова Ю.А., Алехина Р.А. Оценка химической стойкости полиуретановых компаундов, применяемых при изготовлении диафрагм мембранно-поршневых насосов // Техника и оборудование для села. 2021. № 8(290). С. 41-44. EDN: SJCVAL
3. Дорохов А.С., Зернов В.Н., Петухов С.Н. Обоснование конструктивных требований к автоматизированному посадочному агрегату мини-клубней картофеля // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 1. С. 9-15. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-9-15>
4. Казберов Р.Я. Применение полимерных материалов и аддитивных технологий в электрооборудовании агропромышленного комплекса // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, № 4(45). С. 51-55. EDN: UQGIB
5. Лопатина Ю.А., Денисов В.А. Исследование пористости композитных конструкций на основе 3D-печатных каркасов, пропитанных эпоксидной смолой // Технический сервис машин. 2021. № 1(142). С. 131-139. EDN: PIXREM
6. Славкина В.Э., Мирзаев М.А., Лопатина Ю.А. Применение технологии 3D-печати для оптимизации ремонта зубчатых передач // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 58-64. EDN: WPQPOE

Выводы

Для изготовления максимально прочных полимерных деталей сельскохозяйственных машин с помощью 3D-печати по технологии FDM необходимо, чтобы количество слоев стенки не превышало количества слоев внутреннего периметра (не более 6), а также необходима 100%-ная плотность заполнения.

References

1. Dorokhov A.S. Sibirev A.V., Aksenov A.G., Sazonov N.V. Laboratory studies of impact impacts of a roller sorting machine on potato tubers. *Agrarian science of the Euro-North-East*. 2021;22(1):119-127. (In Rus.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.119-127>
2. Dorokhov A.S., Sviridov A.S., Goncharova Yu.A., Alekhina R.A. Assessment of the chemical resistance of polyurethane compounds used in the manufacture of diaphragm piston pumps. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;8(290):41-44. (In Rus.)
3. Dorokhov A.S., Zernov V.N., Petukhov S.N. Design requirements for an automated planting unit for potato minitubers. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(1):9-15. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-9-15>
4. Kazberov R.Ya. Application of polymeric materials and additive technologies in electrical equipment of the agro-industrial sector. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021;4(45):51-55. (In Rus.)
5. Lopatina Yu.A., Denisov V.A. Study of the porosity of composite structures based on 3D-printed frames impregnated with epoxy resin. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2021;1(142):131-139. (In Rus.)
6. Slavkina V.E., Mirzaev M.A., Lopatina Yu.A. Application of 3D printing technology to optimize gear repair. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2020;1(138):58-64. (In Rus.)
7. Sviridov A.S., Lopatina Yu.A., Plokhikh A.I. The choice of materials and justification of technological parameters for the manufacture of sliding supports for the repair of garden equipment using additive

7. Свиридов А.С., Лопатина Ю.А., Плохих А.И. Выбор материалов и обоснование технологических параметров изготовления опор скольжения для ремонта садовой техники с помощью аддитивных технологий // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. № 11. С. 54-62. EDN: WPXHTJ

8. Лопатина Ю.А. Применение 3D-печати методом FDM при ремонте машин и оборудования // *Технический сервис машин*. 2019. № 3 (136). С. 40-45. EDN: RXQGXX

9. Свиридов А.С., Тузилин С.П., Лопатина Ю.А. Концепция цифровой 3D-фермы для использования в ремонтном производстве сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2019. № 2(135). С. 26-32. EDN: KYSSKQ

10. Киселева А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судостроения*. 2017. № 48-49. С. 84-88. EDN: ZULPOT

11. Смирнов М.А., Рыбкин Н.О., Ксенофонтowa О.Л. FDM-технология: особенности применения, преимущества, недостатки // *Проблемы экономики, финансов и управления производством: Сборник научных трудов вузов России 2021*. № 48. С. 115-122. EDN: RYVXEG

12. Холодиллов А.А., Пузынина М.В. Проблемы, возникающие при трехмерной печати объектов с использованием технологии FDM // *Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований*. 2017. № 1. С. 199-204. EDN: YFVQIZ

13. Дубинкин Д.М., Красавин А.Д., Сорокин В.Ю. Современное состояние FDM-технологий // *Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте»*. 2019. С. 171-173. EDN: АОАНОВ

14. Беседина К.С., Лавров Н.А., Панфилов Д.М., Барсков В.В. Свойства изделий из АБС-пластиков и полиамида, получаемых методом 3D-печати // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2018. № 45(71). С. 60-63. EDN: YOLCMP

Вклад авторов

Турченко М.В. – изготовление образцов, анализ данных и подготовка текста.
Гончарова Ю.А. – научное руководство, анализ и доработка текста.
Касимов Р.М. – изготовление образцов, подготовка рукописи к печати.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.06.2022; поступила после рецензирования и доработки 27.12.2022; принята к публикации 28.12.2022

technologies. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019;11:54-62. (In Rus.)

8. Lopatina Yu.A. Application of 3D printing by the FDM method in the repair of machinery and equipment. *Tekhnicheskiy servis mashin*. 2019;3:40-45. (In Rus.)

9. Sviridov A.S., Tuzhilin S.P., Lopatina Yu.A. The concept of a digital 3D farm for use in the repair production of agricultural machinery. *Tekhnicheskiy servis mashin*. 2019;2:26-32. (In Rus.)

10. Kiseleva A.E. Application of additive technologies in solving design problems in shipbuilding. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2017;48-49:84-88. (In Rus.)

11. Smirnov M.A., Rybkin N.O., Ksenofontova O.L. FDM-technology: application features, advantages, disadvantages. *Problemy ekonomiki, finansov i upravleniya proizvodstvom: Sbornik nauchnykh trudov vuzov Rossii*. 2021;48:115-122. (In Rus.)

12. Kholodilov A.A., Puzynina M.V. Problems arising during three-dimensional printing of objects using FDM technology. *Nauka, obrazovanie, innovatsii: aprobatziya rezultatov issledovaniy*. 2017;1:199-204. (In Rus.)

13. Dubinkin D.M., Krasavin A.D., Sorokin V.Yu. Current state of FDM technologies. *Sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsii v informatsionnykh tekhnologiyakh, mashinostroenii i avtotransporte"*. 2019:171-173. (In Rus.)

14. Besedina K.S., Lavrov N.A., Panfilov D.M., Barskov V.V. Properties of products made of ABS plastics and polyamide obtained by 3D printing. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2018;45(71):60-63. (In Rus.)

Contribution of the authors

M.V. Turchenko – sample production, data analysis and text preparation.
Yu.A. Goncharova – scientific guidance, analysis and revision of the text.
R.M. Kasimov – sample production, preparing the manuscript for printing.
All the authors have read and approved the final manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Received 16.06.2022; revised 27.12.2022; accepted 28.12.2022