

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>

УДК 662.668

Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA

Магистранты В. А. Ермакова¹⁾, Е. В. Гасперович¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А. И. Ермаков¹⁾,
докт. техн. наук, доц. В. В. Литвяк²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и крахмалосодержащего сырья – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха» (Московская область, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В современном машиностроении, наряду со снижением металлоемкости конструкций, главной задачей является повышение надежности и долговечности деталей, узлов механизмов. Эта проблема никогда не утрачивает своей актуальности в связи с постоянно возрастающими требованиями к изготовлению изделий, с необходимостью экономии дефицитных дорогостоящих металлов и сплавов и, как следствие, замены их на экономически более выгодные варианты. Один из самых перспективных, с точки зрения экологии, способов замены металлов – использование в конструкциях узлов пластиков, в частности полимолочной кислоты (PLA). PLA – это биоразлагаемый термопластик, применяемый в 3D-печати. В статье представлены результаты экспериментального исследования на разрыв образцов, полученных методом 3D-печати из PLA при различных технологических режимах работы 3D-принтера. В качестве варьируемых параметров были выбраны: форма заполнения образцов (треугольник, шестигранник (соты), линия, ребро), температура сопла (190–205 °С), коэффициент заполнения образца (от 10 до 40 %). Испытания образцов на разрыв проводили на гидравлической разрывной машине с измерительным программным комплексом в комплекте Kason WDW-5. При выполнении испытаний основным выходным показателем считали условный предел текучести. Анализ экспериментальных данных показал существенное влияние изучаемых технологических параметров на условный предел текучести, который изменялся от 16,50 до 22,42 МПа. В процессе исследований определены наиболее рациональные формы и коэффициент заполнения образцов, а также температура сопла при печати PLA.

Ключевые слова: 3D-печать, PLA, технологические режимы, механические характеристики, условный предел текучести, форма заполнения, коэффициент заполнения, температура печати

Для цитирования: Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA / В. А. Ермакова [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 107–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>

Study of Strength Characteristics of Products Produced by 3D-Printing from PLA

V. A. Ermakova¹⁾, E. V. Gasperovich¹⁾, A. I. Ermakov¹⁾, V. V. Litvyak²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing – Branch of Russian Potato Research Centre (Moscow Region, Russian Federation)

Abstract. In modern mechanical engineering, along with reducing the metal consumption of structures, the main task is to increase the reliability and durability of parts, assemblies of mechanisms. This problem never loses its relevance due

Адрес для переписки

Ермаков Алексей Игоревич
Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-05
ermakov@bntu.by

Address for correspondence

Ermakov Aleksey I.
Belarusian National Technical University
67, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-05
ermakov@bntu.by

to the ever-increasing requirements for manufacture of products, with the need to save scarce expensive metals and alloys and, as a result, replace them with economically more profitable options. One of the most promising, from the point of view of ecology, ways to replace metals, is to use in the construction of plastic assemblies, in particular polylactic acid (PLA). PLA is a biodegradable thermoplastic used in 3D-printing. The paper presents results of an experimental study on the rupture of samples obtained by 3D-printing from PLA under various technological operating modes of 3D-printer. The following parameters have been chosen as variable parameters: the form of filling samples (triangle, hexagon (honeycomb), line, edge), nozzle temperature (190–205 °C), sample filling factor (from 10 up to 40 %). Tensile testing of the samples have been carried out on a hydraulic tensile machine with a measuring software package in the Kason WDW-5 set. When performing tests, the conditional yield strength was considered the main output indicator. The analysis of experimental data has shown a significant effect of the investigated technological parameters on the conventional yield point, which varied from 16.5 to 22.42 MPa. The most rational forms and sample filling factor, as well as the temperature of nozzle when printing with PLA, have been determined.

Keywords: 3D-printing, PLA, technological modes, mechanical characteristics, conditional yield stress, filling form, filling factor, printing temperature

For citation: Ermakova V. A., Gasperovich E. V., Ermakov A. I., Litvyak V. V. (2022) Study of Strength Characteristics of Products Produced by 3D-Printing from PLA. *Science and Technique*. 21 (2), 107–113. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113> (in Russian)

Введение

Основная задача современного машиностроения – повышение надежности и долговечности деталей и узлов механизмов наряду со снижением металлоемкости конструкций. Актуальность проблемы постоянно возрастает в связи с повышением требований к изготовлению изделий, необходимостью экономии дефицитных дорогостоящих металлов и сплавов и, как следствие, замены их на экономически более выгодные варианты [1, 2]. Одним из перспективных, с точки зрения экологии, способов замены металлов является использование в конструкциях узлов пластиков, в частности полимолочной кислоты (PLA) [3, 4]. PLA – биоразлагаемый термопластик, применяемый в 3D-печати [5].

Однако, несмотря на широкое распространение 3D-печати пластиком, в открытой печати недостаточно полно представлены данные об исследованиях механических характеристик изготавливаемых изделий, о влиянии комплекса режимных параметров печати на эти характеристики. В связи с чем невозможно спрогнозировать физические свойства конечной продукции [6–10]. Поэтому экспериментальные исследования влияния режимных параметров 3D-печати пластиком на механические характеристики изделий актуальны и представляют научный и практический интерес [11].

Материалы и методы исследований

В ходе экспериментов использовали общие методы научного познания:

1) теоретические – анализ и синтез информации по теме исследования; методы матема-

тического моделирования при анализе результатов эксперимента;

2) эмпирические – планирование эксперимента; 3D-моделирование образцов и их изготовление на 3D-принтере с поддержанием требуемых технологических параметров; проведение испытаний полученных образцов на разрывной машине.

На основе анализа литературных источников по теме исследования [1–3, 6–11] выделены основные факторы, влияющие на механические характеристики изделий, изготавливаемых методом 3D-печати: форма заполнения и коэффициент заполнения образцов, температура сопла. На первом этапе изучали влияние формы заполнения образцов на их механические характеристики. В качестве форм заполнения выбраны треугольник, шестигранник (соты), линия, ребро. Формы варьирования определяли на основе изучения возможных вариантов печати 3D-принтера Flashforge Guider II. Остальные параметры печати на первом этапе поддерживались постоянными и имели следующие значения: температура сопла 205 °C, коэффициент заполнения образца 20 %, температура нагревательного столика 55 °C, скорость печати 60 мм/с.

3D-моделирование образцов проводили в программе SolidWorks. Размеры образца указаны на рис. 1 (толщина образца 4 мм).

3D-модели образцов обрабатывали в программе-слайсере FlashPrint, позволяющей задать требуемые параметры изготовления. Модели создания образцов с различными формами заполнения в программе FlashPrint представлены на рис. 2.

Соотношение времени печати к количеству затрачиваемого на образцы пластика на первом этапе экспериментальных исследований представлено в табл. 1.

Образцы для проведения исследований изготавливали в трех экземплярах. На рис. 3 показан процесс печати образцов на 3D-принтере Flashforge Guider II.

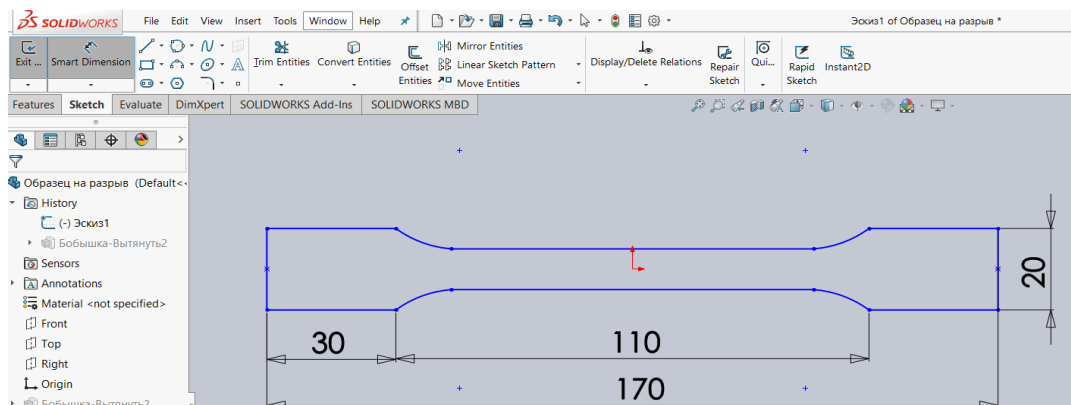


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на разрыв

Fig. 1. Tensile test sample sketch

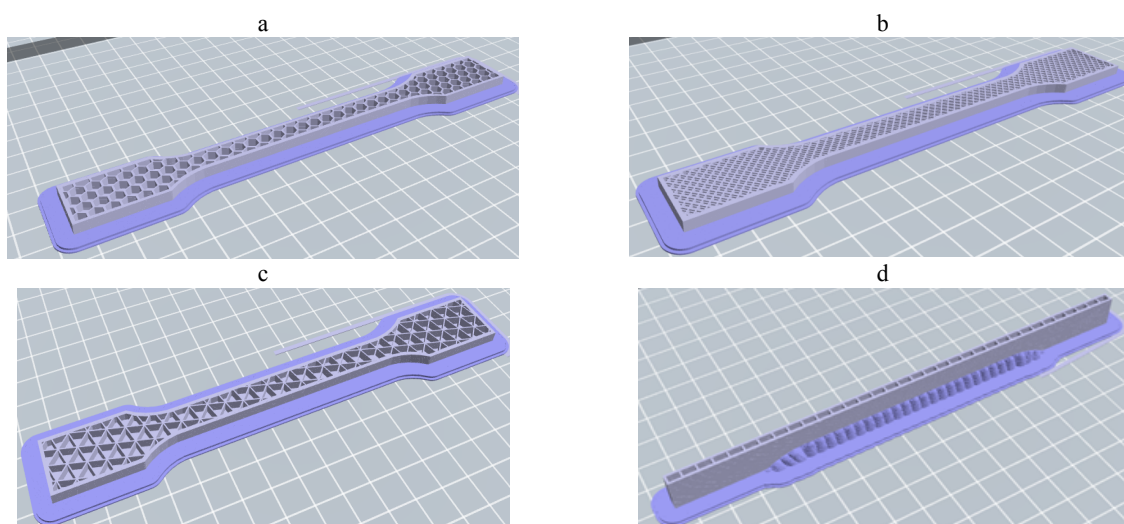


Рис. 2. Модели создания образцов с различными формами заполнения: а – шестигранниками (сотами); б – линиями; с – треугольниками; д – печатью линий на ребре

Fig. 2. Models for creating samples with various filling forms: a – hexagon (honeycomb); b – lines; c – triangles; d – printing of lines on edge

Таблица 1

Соотношение времени печати к количеству затрачиваемого на образцы пластика
Ratio of printing time to amount of plastic spent on samples

Форма заполнения образца	С подложкой		Без подложки	
	Время печати, мин	Расход пластика, м	Время печати, мин	Расход пластика, м
Треугольник	41,00	3,89	29	2,37
Шестигранник (соты)	41,00	3,84	29	2,32
Линия	39,00	3,82	28	2,30
Ребро	1,16	4,89	39	2,71

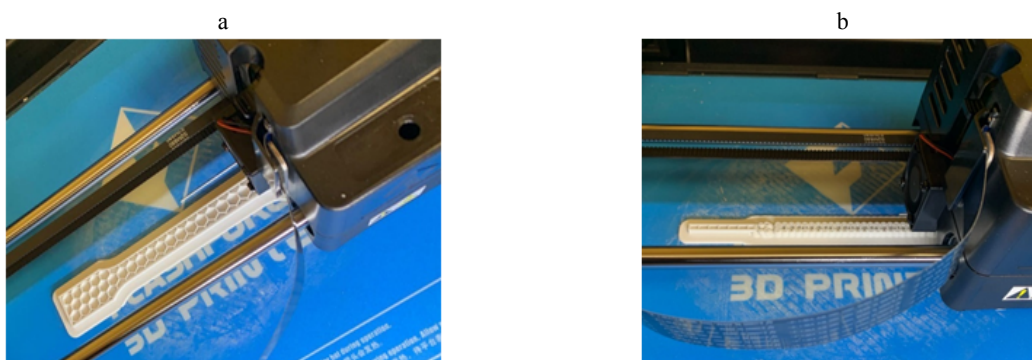


Рис. 3. Процесс печати образцов на 3D-принтере Flashforge Guider II:
а – с шестигранниками; б – с линиями на ребре

Fig. 3. Process of printing samples on 3D printer Flashforge Guider II:
a – with hexagon; b – with lines on edge

Анализ результатов исследований первого этапа экспериментов позволил определить наиболее рациональную форму заполнения образцов с точки зрения их прочности на разрыв, времени печати и расхода материала.

На втором этапе изучали влияние температуры сопла (190; 195; 200; 205 °С) и коэффициента заполнения образцов (10; 20; 30; 40 %) на их механические характеристики. Остальные параметры печати на втором этапе поддерживались постоянными: форма заполнения образца – шестигранник, температура нагревательного столика 55 °С, скорость печати 60 мм/с. Интервал варьирования температуры был обусловлен рекомендациями производителя Bestfilament для данного вида пластика. Коэффициент заполнения образца также существенно влияет на прочность изделий. Но печать образцов с коэффициентом заполнения 50 % и более ведет к значительному увеличению стоимости и времени их изготовления.

Для изготовления образцов на всех этапах экспериментальных исследований использовали филамент для 3D-печати Bestfilament, материал – PLA, диаметр филамента 1,75 мм, цвет белый.

Испытания образцов на разрыв проводили на гидравлической разрывной машине с измерительным программным комплексом в комплекте Kason WDW-5, где образцы подвергались растягивающим усилиям до разрушения.

Прочность образцов при растяжении определяли согласно ГОСТ 11262–80 [12]. Перед испытаниями измеряли ширину и толщину образцов в рабочей части в трех местах (с точностью до 0,01 мм) и вычисляли площадь поперечного сечения: в расчет принимали наименьшее ее

значение. Перед испытаниями на образцы (без их повреждения) наносили необходимые метки, ограничивающие их базу и положение кромок захватов. Образцы закрепляли в зажимах испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов, таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и с направлением движения подвижного зажима. Зажимы затягивали равномерно, чтобы не было проскальзывания образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления. Затем образцы нагружали возрастающей нагрузкой, скорость раздвижения зажимов составила 5 мм/мин при определении прочности и относительного остаточного удлинения. В момент разрушения фиксировали усилие. Испытания проводили при температуре (23 ± 2) °С. Выходные характеристики определяли по графику «нагрузка – удлинение» [12]; при испытаниях основным показателем был условный предел текучести $\sigma_{рту}$.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований при проведении испытания на разрыв образцы, напечатанные на ребре, показали самый высокий результат, что отражено в табл. 2.

Однако при печати на ребре пластика было затрачено на 15–20 % больше, а время печати увеличилось на 25–30 % по сравнению с остальными формами заполнения (табл. 1). Наименьшее значение условного предела текучести оказалось у образцов с формой заполне-

ния линия $\Sigma\sigma_{\text{рты}} = 16,50$ МПа, т. е. применение данной формы заполнения при печати изделий нежелательно.

Таблица 2

Прочностные характеристики исследуемых образцов при испытании на разрыв

Strength characteristics of studied samples in tensile test

Образец		Условный предел текучести $\sigma_{\text{рты}}$, МПа	Среднее значение $\Sigma\sigma_{\text{рты}}$
Форма заполнения	№ п/п		
Треугольник	1	17,75	18,42
	2	18,50	
	3	19,00	
Шестигранник	1	19,00	18,25
	2	17,75	
	3	18,00	
Линия	1	16,75	16,50
	2	17,50	
	3	15,25	
Ребро	1	24,00	22,42
	2	19,25	
	3	24,00	

Для образцов с формой заполнения треугольник и шестигранник показатели по среднему значению условного предела текучести оказались схожими – отклонение не превышало 1,5 %. При этом время печати и количество затраченного пластика (табл. 1) также одинаковы. Таким образом, из анализа данных табл. 1 и 2 можно сделать вывод, что наиболее рациональными формами заполнения образцов при 3D-печати, с точки зрения их прочности на разрыв, времени печати и расхода материала, являются треугольник и шестигранник.

Результаты второго этапа экспериментальных исследований представлены в табл. 3.

Графические зависимости изменения условного предела текучести от коэффициента заполнения образца и температуры сопла представлены на рис. 4, 5.

Из рис. 4 видно, что с ростом коэффициента заполнения образца условный предел текучести $\sigma_{\text{рты}}$ увеличивается, причем линейно: при росте коэффициента заполнения на 30 % (с 10 до 40 %) $\sigma_{\text{рты}}$ увеличивается на 9,6 %, или на 1,92 МПа. В то же время зависимость $\sigma_{\text{рты}}$ от температуры сопла (рис. 5) имеет явно выраженный экстремум, что может быть обусловлено ухудшением адгезии при выходе за пределы оптимальных параметров печати [13–16].

Результаты второго этапа экспериментальных исследований
Results of the second stage of experimental research

Температура сопла, °C	Среднее значение $\sigma_{\text{рты}}$, МПа, при коэффициенте заполнения, %			
	10	20	30	40
190	16,77	18,41	18,99	20,14
195	18,64	19,28	19,37	19,91
200	18,10	19,15	19,58	20,02
205	17,42	18,38	20,83	21,41

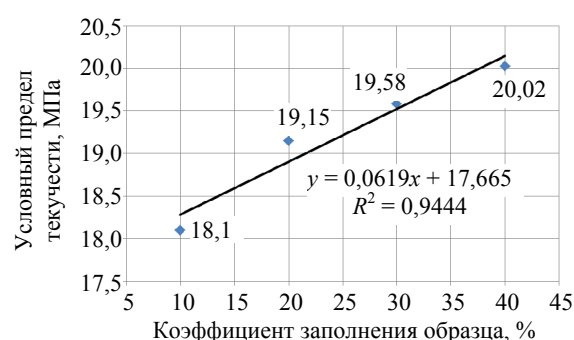


Рис. 4. Зависимость изменения условного предела текучести $\sigma_{\text{рты}}$ от коэффициента заполнения образца при постоянной температуре сопла 200 °C

Fig. 4. Dependence of conditional yield strength $\sigma_{\text{рты}}$ change on sample filling factor at constant nozzle temperature of 200 °C

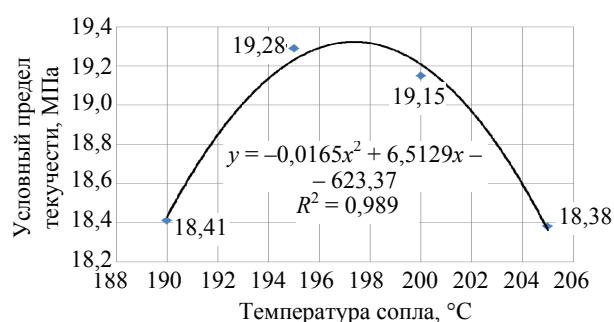


Рис. 5. Зависимость изменения условного предела текучести $\sigma_{\text{рты}}$ от температуры сопла при постоянном коэффициенте заполнения образца 20 %

Fig. 5. Dependence of conditional yield strength $\sigma_{\text{рты}}$ change on nozzle temperature at constant sample filling factor of 20 %

Минимальные значения условного предела текучести наблюдаются при температурах сопла 190 и 205 °C, а максимум достигается в интервале 195–200 °C. Варьирование температуры сопла позволяет увеличить прочностные характеристики образца на 5 %.

ВЫВОДЫ

1. Согласно анализу экспериментальных данных образцов, полученных методом 3D-печати из PLA:

- форма заполнения образцов существенно влияет на их механические характеристики: условный предел текучести может изменяться от минимального ($\sigma_{\text{рту}} = 16,50$ МПа, форма заполнения – линия) до максимального 22,42 МПа (печать на ребре);

- наиболее рациональными формами заполнения образцов при 3D-печати, с точки зрения их прочности на разрыв, времени печати и расхода материала, являются треугольник и шестигранник;

- влияние коэффициента заполнения образцов в пределах варьирования 10–40 % на условный предел текучести носит линейный характер, при этом с ростом коэффициента заполнения с 10 до 40 % $\sigma_{\text{рту}}$ увеличивается на 9,6 %, или на 1,92 МПа;

- зависимость условного предела текучести от изменения температуры сопла в пределах температур 190–205 °С имеет явно выраженный экстремум, достигающий максимума в интервале 195–200 °С, значение условного предела текучести в данном диапазоне на 5 % больше, чем в крайних точках интервала варьирования.

2. Полученные в процессе испытаний данные могут быть использованы для углубления и корректировки существующих теоретических моделей, описывающих процессы 3D-печати, а также в промышленности при проектировании изделий, производимых методом 3D-печати из PLA.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутьлина. СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2013. 222 с.
2. Савченя, А. А. Исследование влияния технологических параметров 3D-печати PLA-пластиком на механические характеристики изделий / А. А. Савченя, А. И. Ермаков // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 16-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 18-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», 26 марта 2020 г. Минск: Право и экономика, 2020. С. 231–232.
3. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) / В. А. Валетов. СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. 63 с.
4. Малевич, Д. М. Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь / Д. М. Малевич // Стратегические направления социально-экономического и финансового обеспечения развития национальной экономики: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 27–28 сент. 2018 г. / редкол. В. В. Пузиков [и др.]. Минск, 2018. С. 275–276.
5. Ермаков, А. И. Утилизация тары и упаковки / А. И. Ермаков. Минск: БНТУ, 2017. 194 с.
6. Experimental Determination and Comparative Analysis of the PPH030GP, ABS and PLA Polymer Strength Characteristics at Different Strain Rates / M. Yu. Zalohin [et al.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 3. С. 233–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>.
7. Cantrell, J. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts / J. Cantrell // Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Proceedings of the 2016 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics. 2016. No 3. P. 89–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11.
8. Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D-Printed Objects / T. Galeta [et al.] // Procedia Engineering. 2016. No 149. P. 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.644>.
9. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D-Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation / B. Rankouhi [et al.] // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2016. Vol. 3, No 16. P. 467–481. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>.
10. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment / O. A. Mohamed [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. Vol. 25, No 7. P. 2922–2935. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>.
11. Технология аддитивного производства, моделирование и управление качеством процесса послыого синтеза / А. В. Чабаненко [и др.]. СПб.: ГУАП, 2018. 137 с.
12. Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Изменением № 1): ГОСТ 11262–80. Введ. 01.12.1980. М.: Госстандарт СССР, 1980. 8 с.
13. Третьякова, А. А. Кукуруза как основное сырье для производства PLA-пластика / А. А. Третьякова, В. А. Ермакова, А. И. Ермаков // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 25–26 марта 2021. Минск: БГАТУ, 2021. С. 74–76.
14. Третьякова, А. А. Влияние температурных режимов 3D-печати на характеристики изделия / А. А. Третьякова, А. И. Ермаков // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 17-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 19-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», 25–26 марта 2021 г. Минск: Право и экономика, 2021. 213 с.
15. Ермаков, А. И. Применение 3D-печати в кондитерском производстве / А. И. Ермаков, С. В. Чайко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. 70-й Науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов. БНТУ: в 4 т. Минск: БНТУ, 2017. Т. 4. С. 503.
16. Разработка 3D-принтера для образовательных учреждений / А. И. Ермаков [и др.] // Переработка и управ-

ление качеством сельскохозяйственной продукции: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 23–24 марта 2017 г. / редкол. В. Я. Груданов [и др.]. Минск: БГАТУ, 2017. С. 426–428.

Поступила 14.10.2021

Подписана в печать 15.12.2021

Опубликована онлайн 31.03.2022

REFERENCES

- Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylyna I. N. (2013) *Additive Technologies in Mechanical Engineering*. Saint-Petersburg, Publishing House of Polytechnical University. 222 (in Russian).
- Savchenya A. A., Ermakov A. I. (2020) Study of the Influence of Technological Parameters of 3D-Printing with PLA Plastic on the Mechanical Characteristics of Products. *Mirovaya Ekonomika i Biznesadministririvanie Malykh i Srednikh Predpriyatii: Materialy 16-go Mezhdunar. Nauch. Seminara, Provodimogo v Ramkakh 18-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. "Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike"*, 26 Marta 2020 [World Economy and Business Administration of Small and Medium Enterprises: Proceedings of 16th International Scientific Workshop Held Within the Framework 18th International Scientific and Technical Conference "Science for Education, Production, Economy", Minsk, March 26, 2020]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 231–232 (in Russian).
- Valetov V. A. (2015) *Additive Technologies (State and Prospects)*. Saint-Petersburg, Publishing House of ITMO University. 63 (in Russian).
- Malevich D. M. (2018) Prospects for Development of Additive Technologies in the Republic of Belarus. *Strategicheskie Napravleniya Sotsial'no-Ekonomicheskogo i Finansovogo Obespecheniya Razvitiya Natsional'noi Ekonomiki: Materialy II Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Minsk, 27–28 Sent. 2018 g.* [Strategic Directions of Socio-Economic and Financial Support for Development of National Economy: Proceedings of 2nd International Scientific and Practical Conference, Minsk, Sept. 27–28, 2018]. Minsk, 275–276 (in Russian).
- Ermakov A. I. (2017) *Disposal of Containers and Packaging*. Minsk, Belarusian National Technical University. 194 (in Russian).
- Zalohin M. Yu., Skliarov V. V., Dovzhenko J. S., Brega D. A. (2019) Experimental Determination and Comparative Analysis of the PPH030GP, ABS and PLA Polymer Strength Characteristics at Different Strain Rates. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 18 (3), 233–239. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239>.
- Cantrell J. (2016) Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Proceedings of the 2016 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, (3), 89–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11.
- Galetka T., Raos P., Stojšić J., Pakši I. (2016) Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D-Printed Objects. *Procedia Engineering*, 149, 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.644>.
- Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F., Letcher T. (2016) Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D-Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 3 (16), 467–481. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>.
- Mohamed O. A., Masood S. H., Bhowmik J. L., Nikzad M., Azadmanjiri J. (2016) Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25 (7), 2922–2935. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2157-6>.
- Chabanenko A. V., Nazarevich S. A., Shchenikov Ya. A., Gulevitskii A. Yu. (2018) *Additive Manufacturing Technology, Modeling and Quality Control of the Layer-by-Layer Synthesis Process*. Saint-Petersburg, Publishing House of State University of Aerospace Instrumentation. 137 (in Russian).
- State Standard 11262–80. *Plastics. Tensile Test Method (as Amended by Change No 1)*. Moscow, Gosstandart Publ., 1980. 8 (in Russian).
- Tretyakova A. A., Ermakova V. A., Ermakov A. I. (2021) Corn as the Main Rawmaterial for the Production of PLA Plastic. *Pererabotka i Upravlenie Kachestvom Sel'skokhozyaistvennoi Produktitsii: Materialy 5-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Minsk, 25–26 Marta 2021* [Processing and Management of Quality of Agricultural Products: Proceedings of 5th International Scientific and Practical Conference, Minsk, March 25–26, 2021]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 74–76 (in Russian).
- Tretyakova A. A., Ermakov A. I. (2021) Influence of Temperature Conditions of 3D-Printing on Product Characteristics. *Mirovaya Ekonomika i Biznes-Administririvanie Malykh i Srednikh Predpriyatii: Materialy 17-go Mezhdunar. Nauch. Seminara, Provodimogo v Ramkakh 19-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. "Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike"*, 25–26 Marta 2021g. [World Economy and Business Administration of Small and Medium Enterprises: Proceedings 17th International Scientific Workshop Held Within the Framework 19th International Scientific and Technical Conference "Science for Education, Production, Economy", Minsk, March 25–26, 2021]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 213 (in Russian).
- Ermakov A. I., Chaiko S. V. (2017) Use of 3D-Printing in the Confectionery Industry. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 15-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. 70-i Nauch.-Tekhn. Konf. Prof.-Prepod. Sostava, Nauch. Rabotnikov, Doktorantov i Aspir. BNTU. T. 4* [Science for Education, Production, Economy: Proceedings of 15th International Scientific and Technical Conference, 70th Scientific and Technical Conference of Teaching Staff, Researchers, Doctoral Students and Postgraduates of BNTU. Vol. 4]. Minsk, Belarusian National Technical University, 503 (in Russian).
- Ermakov A. I., Kniga V. V., Meleshchenya E. P., Tretyakova A. A. (2017) Development of 3D-Printer for Educational Institutions. *Pererabotka i Upravlenie Kachestvom Sel'skokhozyaistvennoi Produktitsii: Sb. St. III Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Minsk, 23–24 Marta 2017 g.* [Processing and Management of Quality of Agricultural Products: Collecte Dpapers of III International Scientific and Practical Conference, Minsk, March 23–24, 2017]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 426–428 (in Russian).

Received: 14.10.2021

Accepted: 15.12.2021

Published online: 31.03.2022