

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-636691>

Оригинальное исследование



Влияние отжига на ударопрочность деталей машин, изготовленных по технологии 3D-печати из полилактида

В.-А.В. Бадакова^{1, 2}, Д.С. Талдыкин^{1, 2}, М.Г. Плетнёв^{1, 2}¹ Государственный университет управления, Москва, Россия;² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Технология 3D-печати стремительно развивается, предоставляя возможности для изготовления деталей с заданными свойствами. Однако, механические характеристики материалов, полученных методом 3D-печати, зачастую не соответствуют требованиям для различных приложений, например, сельскохозяйственных машин. Повышение ударной вязкости материалов, получаемых методом 3D-печати, является актуальной задачей для расширения их применения.

Цель работы — исследование влияния термообработки (отжига) и параметров 3D-печати (толщина слоя, процент заполнения) на ударную вязкость образцов из полилактида (PLA).

Методы. Проведено экспериментальное исследование с использованием образцов PLA, изготовленных методом 3D-печати с варьируемыми параметрами: толщина слоя (0,15 мм, 0,20 мм, 0,25 мм) и процент заполнения (50%, 75%, 100%). Образцы подвергались отжигу при температуре 80°C в течение 2 часов. Ударная вязкость определялась по методу Шарпи с помощью стандартного испытательного оборудования.

Результаты. В исследование было включено 27 образцов PLA. Отжиг существенно повысил ударную вязкость всех образцов. Наблюдалась зависимость ударной вязкости от толщины слоя и процента заполнения. Максимальное значение ударной вязкости ($2,58 \pm 0,12$ Дж/см²) достигнуто при толщине слоя 0,15 мм и 100%-ном заполнении. Статистический анализ результатов, выполненный с использованием ANOVA ($p < 0,001$), показал значимое влияние всех факторов на ударную вязкость.

Заключение. Полученные результаты демонстрируют, что отжиг и оптимизация параметров 3D-печати (толщина слоя, процент заполнения) позволяют повысить ударную вязкость материалов, полученных методом 3D-печати из PLA. Оптимальные параметры, достигнутые в данном исследовании, могут быть использованы для разработки деталей сельскохозяйственных машин с улучшенными механическими свойствами.

Ключевые слова: 3D-печать; отжиг; ударная вязкость; термообработка; аддитивные технологии; детали сельскохозяйственной техники.

Как цитировать:

Бадакова В.-А.В., Талдыкин Д.С., 2, Плетнёв М.Г. Влияние отжига на ударопрочность деталей машин, изготовленных по технологии 3D-печати из полилактида // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 6. С. 819–826. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-636691>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-636691>

Original Study Article

The effect of annealing on the impact resistance of machine parts made using 3D-printing technology from polylactide

Vasilisa-Aanastasiya V. Baidakova^{1, 2}, Dmitriy S. Taldykin^{1, 2}, Maksim G. Pletnev^{1, 2}

¹ State University of Management, Moscow, Russia;

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The 3D printing technology is rapidly developing, giving the opportunities for the manufacturing of parts with specified properties. However, the mechanical characteristics of materials obtained by 3D printing often do not meet the requirements for various applications, for example, agricultural machinery. Increasing the impact strength of materials produced by 3D printing is a relevant task for expanding their application.

OBJECTIVE: Study of the effect of heat treatment (annealing) and 3D printing parameters (layer thickness, filling percentage) on the impact strength of the polylactide (PLA) samples.

METHODS: An experimental study was conducted using the PLA samples made by 3D printing with variable parameters: layer thickness (0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm) and percentage of filling (50%, 75%, 100%). The samples were annealed at a temperature of 80 °C for 2 hours. The impact strength was determined by the Charpy method using standard test equipment.

RESULTS: 27 PLA samples were included in the study. Annealing significantly increases the impact strength of all samples. The dependence of the impact strength on the thickness of the layer and the percentage of filling was observed. The maximum impact strength (2.58 ± 0.12 J/cm²) was achieved with a layer thickness of 0.15 mm and 100% filling. Statistical analysis of the results performed using ANOVA ($p < 0.001$) showed a significant influence of all factors on the impact strength.

CONCLUSIONS: The results obtained demonstrate that annealing and optimization of 3D printing parameters (layer thickness, filling percentage) can increase the impact strength of materials obtained by 3D printing from PLA. The optimal parameters achieved in this study can be used in development of parts of agricultural machines with improved mechanical properties.

Keywords: 3D printing; annealing; impact strength; heat treatment; additive technologies; agricultural machinery parts.

To cite this article:

Baidakova V-AV, Taldykin DS, Pletnev MG. The effect of annealing on the impact resistance of machine parts made using 3D printing technology from polylactide. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(6):819–826. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-636691>

Received: 03.10.2024

Accepted: 16.01.2025

Published online: 16.01.2025

ВВЕДЕНИЕ

Ударная вязкость пластиков, применяемых для 3D-печати, является важнейшим свойством, влияющим на их практическое применение при производстве и ремонте сельскохозяйственной техники [1]. Несмотря на способность отдельных марок пластиков, таких как полилактиды (PLA), к биологическому разложению и совместимость с аддитивными технологиями производства, такими как 3D-печать, существуют факторы, ограничивающие применение рассматриваемых материалов для изготовления деталей машин, работающих в условиях динамического нагружения [2].

Повышение ударной вязкости материалов, применяемых для 3D-печати, имеет важное промышленное и технологическое значение [3–6]. В различных областях применения, особенно в тех, где требуется высокая прочность и долговечность конструкций (например, сельскохозяйственная техника), присущая пластикам хрупкость ограничивает возможности по их применению. Низкая ударная вязкость может привести к преждевременному выходу из строя или снижению долговечности деталей сельскохозяйственных машин и оборудования [7, 8].

Интерес представляют исследования по повышению ударной вязкости пластиков, применяемых для 3D-печати. Различные вариации включают модификацию материала и оптимизацию технологии его обработки. Отжиг является производительным и экономичным способом по сравнению с другими технологиями термообработки [9, 10]. Данная технология включает в себя выдержку изделия в печи в диапазоне от температуры стеклования до температуры плавления и поддержание данных режимов в течение заданного времени.

В ходе исследования было изучено влияние толщины слоя и процентного содержания наполнителя на ударную вязкость образцов из материала PLA, изготовленных по технологии 3D-печати, по методу Шарпи, а также проведён сравнительный анализ. Ударные испытания позволили количественно оценить поглощенную энергию при пластической деформации образцов, и в результате испытаний выявлено, что наибольшее поглощение энергии происходит при плотности наполнителя 85%.

Результаты экспериментов свидетельствуют о значимом влиянии армирования углеродным волокном и плотности наполнителя на ударную вязкость отожжённых образцов из материала PLA, при этом 100%-ная плотность наполнителя приводит к увеличению ударной вязкости на 5,5%. Термообработка при 80°C и 90°C повысила ударную вязкость на 97,80% и 133,20% соответственно по сравнению с необработанными образцами PLA. Ударные характеристики образцов были оценены с учётом таких факторов, как анизотропия материала, толщина слоя и объемное содержание волокон.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящего исследования является анализ влияния термообработки отжигом в зависимости от параметров печати, на ударную вязкость деталей, изготовленных по технологии 3D-печати.

МЕТОДЫ

Параметры 3D-печати представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры 3D-печати

Table 1. The 3D printing parameters

Параметр	Значение
Диаметр сопла, мм	0,40
Тип слоя	Плоский
Кол-во верхних твёрдых слоёв, шт.	4
Кол-во нижних сплошных слоёв, шт.	4
Внутренний рисунок заполнения	Прямолинейный
Внешний рисунок заполнения	Прямолинейный
Внутренние угловые смещения, °	45...135
Температура экструдера, °C	210
Температура подогреваемой подложки, °C	60
Скорость печати по умолчанию, мм/с	70
Диаметр нити, мм	1,75
Плотность нитей, г/см ³	1,24

В процессе изготовления использовался 3D-принтер Raise E2 с размерами рабочей зоны 330×240×240 мм. Параметры 3D-печати образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики образца

Table 2. Properties of the sample

Характеристика	Значение
<i>Постоянные параметры</i>	
Ориентация сборки	X-Y
Скорость печати, мм/с	80
Температура осаждения, °C	210
Модель Infill	Линии под углом 45°
<i>Переменные параметры</i>	
Толщина слоя L _z , мм	0,10 / 0,15 / 0,20
Процент заполнения I _p , %	50 / 75 / 100

Размерные характеристики образцов показаны на рис. 1(а).

Процесс отжига включал выдержку образцов при температуре 75 °C в течение 3 часов, что несколько выше температуры стеклования, с последующим постепенным и контролируемым охлаждением. Образцы равномерно охлаждались в печи, изображённой на рис. 2.

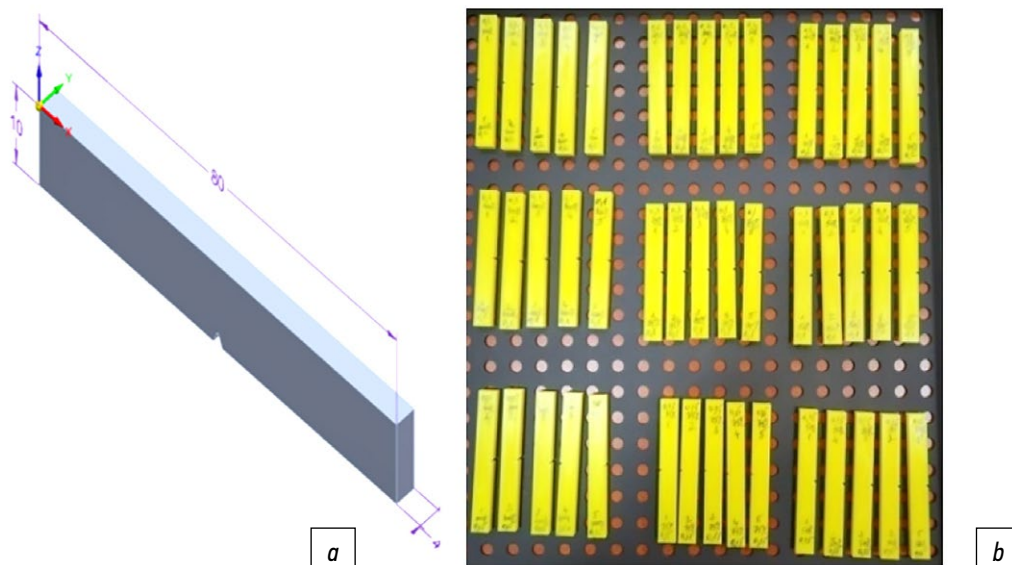


Рис. 1. Образцы, использованные для экспериментов: *a* — электронная модель образца, *b* — фото натуральных образцов, подвергнутых отжигу.

Fig. 1. Samples used for experiments: *a* — an electronic model of the sample, *b* — photos of full-scale samples subjected to annealing.

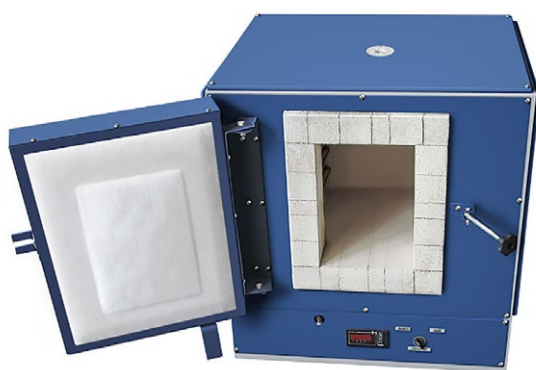


Рис. 2. Печь, используемая для термообработки.

Fig. 2. The furnace used for heat treatment.



Рис. 3. Машина для ударных испытаний.

Fig. 3. The impact testing machine.

Испытания на удар были проведены в лаборатории с использованием маятникового тестера Instron Sharpie (рис. 3) в соответствии со стандартом ISO 179-1:2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследования проводилось изучение влияния параметров печати и термообработки при отжиге на ударную вязкость образцов, изготовленных по технологии 3D-печати из материала PLA. Для каждого эксперимента подготовлено по пять образцов. Результаты механических испытаний были определены на основе средних значений ударной вязкости, полученных для данных образцов. Значения максимальной поглощённой энергии для каждой комбинации параметров печати, включая как отожжённые, так и неотожжённые образцы, представлены в табл. 3.

Общая поглощённая энергия удара рассчитана по следующей формуле:

$$E_T = mg(h_0 - h_f), \quad (1)$$

где E_T — полная поглощённая энергия, Дж, m — масса, кг, $g=9,81$ м/с² — ускорение свободного падения, h_0 — начальная высота маятника, м, h_f — высота маятника после удара, м.

На рис. 4 показаны средние значения поглощённой энергии удара в зависимости от параметров печати (толщина слоя и процент заполнения) как для неотожжённых, так и для отожжённых образцов.

Процентная разница в поглощённой энергии удара между отожжёнными и неотожжёнными образцами

Таблица 3. Средние значения энергии удара
Table 3. Average values of impact energy

Толщина, мм	Процент заполнения I_p , %	Энергия ЕТ, Дж		Разница, %
		Отожжённый образец	Образец без обработки	
0,10	50	0,162	0,072	125,07
	75	0,228	0,088	157,62
	100	0,220	0,078	181,29
0,15	50	0,167	0,078	114,10
	75	0,235	0,075	213,63
	100	0,311	0,081	283,72
0,20	50	0,190	0,076	148,97
	75	0,202	0,080	152,84
	100	0,278	0,082	238,82

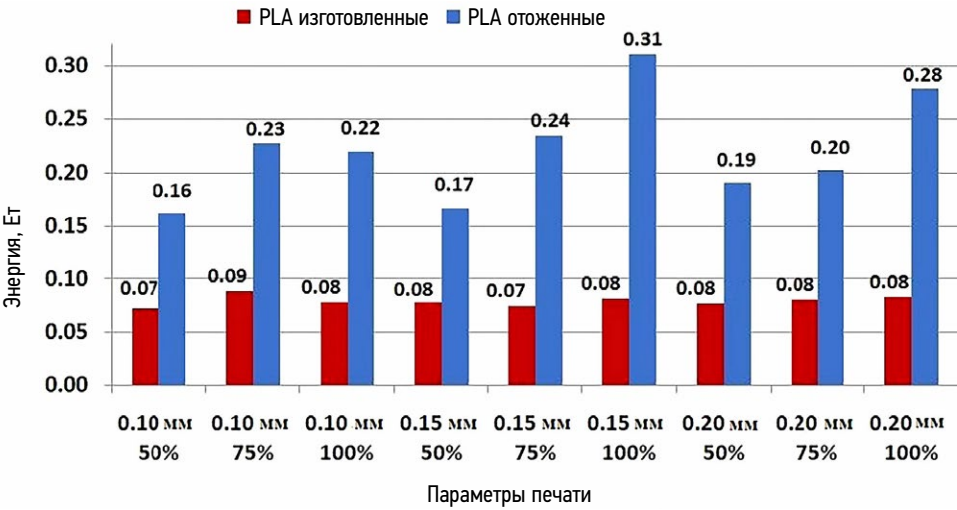


Рис. 4. Сравнительные значения поглощённой энергии удара, полученные для отожжённых образцов.
Fig. 4. Comparative values of the absorbed impact energy obtained for the annealed samples.

для каждого набора параметров печати проиллюстрирована на рис. 5, где показано влияние термообработки на ударопрочность образцов.

Поглощённая энергия удара увеличилась на 125,10% и 283,70% соответственно для отожжённых и неотожжённых образцов благодаря оптимальному сочетанию толщины слоя 0,15 мм и 100%-ного наполнителя. Значительно увеличилась ударная вязкость — на 97,80% и на 133,20% для отожжённых и неотожжённых образцов соответственно.

Для каждой толщины слоя наименьшее увеличение ударной вязкости отожжённых образцов по сравнению с неотожжёнными было зафиксировано при 50%-ном заполнении, в то время как более выраженный эффект от использования термообработки отжигом наблюдался при 100%-ном заполнении.

Для образцов, изготовленных в соответствии со стандартными параметрами, максимальная поглощённая

энергия удара была достигнута при 75%-ном заполнении и толщине слоя 0,1 мм, в то время как минимальное значение наблюдалось при 50%-ном заполнении и толщине слоя 0,2 мм (рис. 6).

Для отожжённых образцов максимальная поглощённая энергия удара была зафиксирована при 100%-ном заполнении и толщине слоя 0,15 мм, а минимальное значение соответствовало 50%-ному заполнению и толщине слоя 0,1 мм (рис. 7). Кроме того, было установлено, что ударопрочность отожжённых деталей увеличивается с увеличением процента заполнения. При каждом проценте заполнения максимальная поглощённая энергия удара неизменно достигалась при толщине слоя 0,15 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ударную вязкость существенно влияют такие параметры печати, как толщина слоя и процент заполнения,

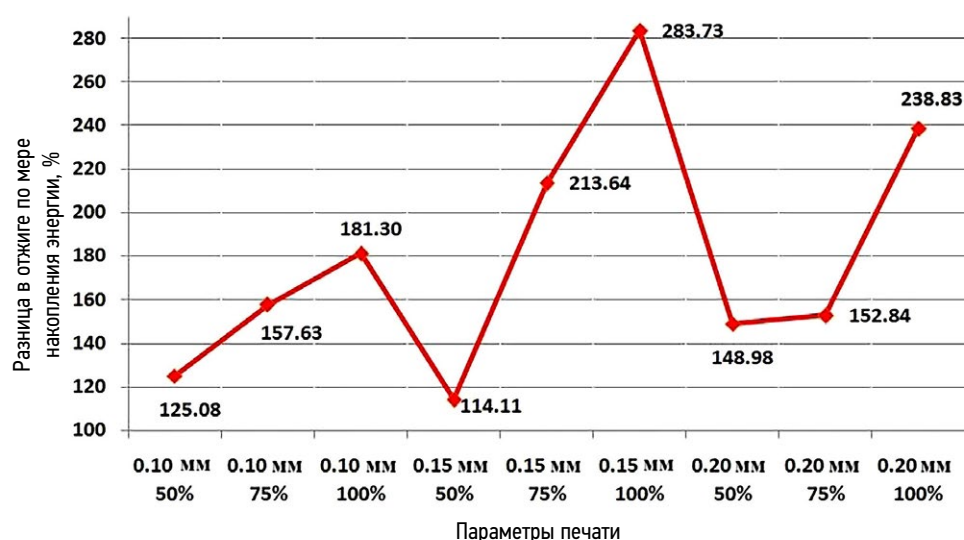


Рис. 5. Процентное изменение поглощённой энергии удара после отжига.

Fig. 5. Percentage change in absorbed impact energy after annealing.

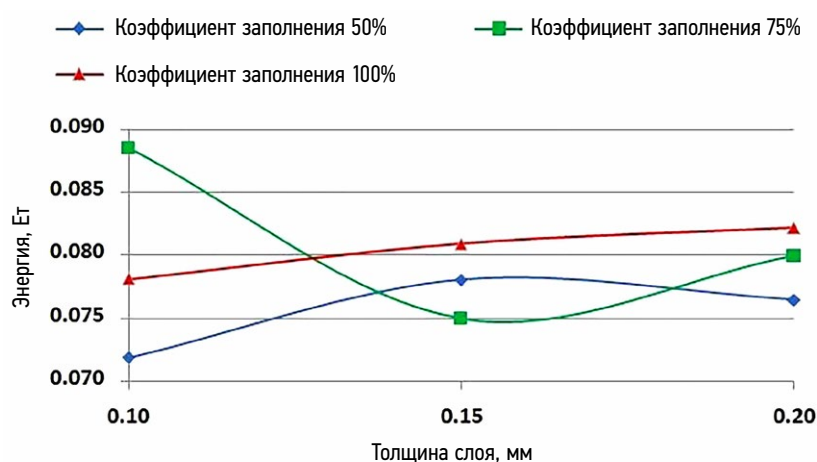


Рис. 6. Влияние параметров печати на поглощённую энергию удара для образцов без термообработки.

Fig. 6. The effect of printing parameters on the absorbed impact energy for samples without heat treatment.

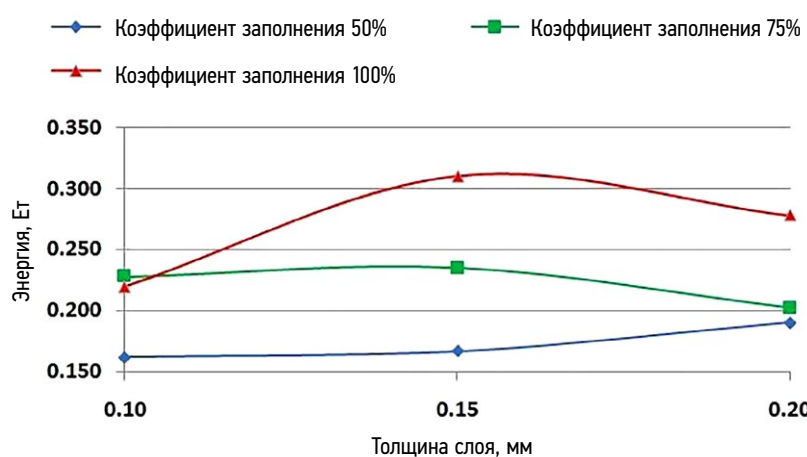


Рис. 7. Влияние параметров печати на поглощённую энергию удара для отожжённых образцов.

Fig. 7. The effect of printing parameters on the absorbed impact energy for annealed samples.

а также режим последующей термообработки отжигом. Основным фактором, определяющим ударопрочность отожжённых деталей, изготовленных по технологии 3D-печати, является процент заполнения, при этом максимальная поглощённая энергия удара наблюдается при 100%-ном заполнении.

Увеличение ударной вязкости за счёт отжига позволяет предположить, что данный вид термообработки является подходящим способом повышения ударопрочности деталей машин из PLA, изготовленных посредством 3D-печати и предназначенных для применения в условиях динамических нагрузок. Полученные результаты свидетельствуют о том, что отжиг позволяет повысить ударопрочность деталей, изготовленных по технологии 3D-печати из материала PLA, который может широко применяться в производстве и при ремонте сельскохозяйственных машин и оборудования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.-А.В. Бадакова — исследование влияния параметров 3D-печати на ударопрочность PLA-материала, разработка экспериментальной методики и координация выполнения лабораторных испытаний, участие в анализе результатов и в написании основной части статьи; Д.С. Талдыкин — подготовка образцов для экспериментов, включая настройку параметров печати и проведение отжига; проведение испытаний на ударопрочность и участие в обработке данных; М.Г. Плетнёв — статистическая обработка результатов экспериментов и анализ данных с использованием метода ANOVA, что позволило выявить значимость факторов; участие в написании разделов статьи, посвящённых результатам и заключению. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных

с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Данная статья подготовлена в рамках выполнения 1-го этапа научно-исследовательской работы, реализуемой за счёт средств федерального бюджета (источник финансирования — Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка научных, методологических и практических основ реверсивного инжиниринга для решения комплексных задач импортозамещения в агропромышленном комплексе Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2024-0026).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.-A.V. Badakova — conducted research on the influence of the 3D printing parameters on the impact resistance of the PLA material, developed the experimental methodology and coordinated the laboratory tests, results analysis and writing the main part of the manuscript; D.S. Taldykin — preparation of samples for experiments, including setting up printing parameters and annealing, conducting impact resistance tests and participated in data processing; M.G. Pletnev — statistical processing of experimental results and data analysis using ANOVA, which helped to identify the significance of factors. He also participated in writing the results and conclusion sections of the paper. All authors confirm their authorship compliance with the ICMJE international criteria (all authors made a significant contribution to the conceptualization, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This manuscript was prepared as part of the 1st stage of the research activity carried out at the expense of the federal budget (the source of funding is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation) on the topic: "Development of scientific, methodological and practical foundations of reverse engineering for solving complex import substitution problems in the agricultural industry of the Russian Federation" (code of the scientific topic FZNW-2024-0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Yurova EI, Shchetkina EE. Investigation of the characteristics of PLA plastic parts obtained by 3D printing for impact strength. In: *Science and youth: Materials of the XX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists, Barnaul, April 17–21, 2023*. Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov; 2023;1(1):102–104. (In Russ.) EDN: QZXRLP
2. Kovalenko AE, Urban VA, Bikbaev SF. Testing samples of PLA plastic and ABS plastic for compressive strength. In: *Improvement of engineering and technical support of agricultural processes in the agro-industrial complex: materials of the international*

- scientific and practical conference, Orenburg, May 29, 2015*. Orenburg: Orenburg State Agrarian University; 2015:111–112. (In Russ.) EDN: VIHGVV
3. Balashov AV, Markova MI. Study of the structure and properties of products obtained by 3D printing. *Engineering Bulletin of the Don*. 2019;1(52):66. (In Russ.) EDN: LSMZMB
4. Kablov VF, Sinkov AV. *Additive technologies in the production of polymer products*. Volzhsky: Volgograd State Technical University; 2018. (In Russ.) EDN: XPADGP
5. Basalgin MV. Compression test of PLA plastic samples for 3D printing of mechanism parts. In: *Scientific works of students*

of the Izhevsk State Agricultural Academy: Collection of articles. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy; 2022;1(14):2139–2144. EDN: CVDXQK

6. Gumennikov DV. Study of the bending strength of PLA plastic samples for 3D printing of mechanism parts. In: *Scientific works of students of the Izhevsk State Agricultural Academy: Collection of articles*. Izhevsk: Udmurt State Agrarian University; 2022;2(15):675–679. (In Russ.) EDN: VIOQDG

7. Ziomkovskaya PE, Gryaznov AO. Determination of the modulus of elasticity of ABS and PLA plastics used in 3D printing technologies. In: *Scientific research and development of students: Proceedings of the IV International Student Scientific and Practical Conference, Cheboksary, June 29, 2017*. Cheboksary: LLC "Scientific Cooperation Center "Interactive Plus"; 2017:166–169. (In Russ.) EDN: YZEJON

8. Stepanov KI, Alekseev DA. Investigation of the impact strength of PLA plastic for 3D printing of detail models. In: *Scientific works of students of the Izhevsk State Agricultural Academy: Collection of articles*. Izhevsk: Udmurt State Agrarian University; 2023;1(16):1353–1359. (In Russ.) EDN: FYTTEO

9. Chuvaev IA, Gabel'chenko NI. Thermal treatment of 3D printed plastic products. *International Research Journal*. 2019;6–1(84):70–75. (In Russ.) doi: 10.23670/IRJ.2019.84.6.014 EDN: ZTOZML

10. Nazarevich SA, Sviridenko AV. Research of temperature modes of PLA plastic filamentation during prototyping. *Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):51–55. (In Russ.) doi: 10.31799/2949-0693-2023-4-51-55 EDN: JMBSUC

ОБ АВТОРАХ

* Талдыкин Дмитрий Сергеевич,

студент Конструкторско-механического факультета, лаборант кафедры «Детали машин и теория механизмов»; адрес: Россия; 109542, Москва, Рязанский пр-кт, д. 99; ORCID: 0009-0008-5071-426X; eLibrary SPIN: 2271-8386; e-mail: dima.dima.taldykin@mail.ru

Бадакова Василиса-Анастасия Васильевна,

аспирант кафедры «Управление промышленными организациями», специалист лаборатории реверсивного инжиниринга; ORCID: 0009-0002-1990-6526; eLibrary SPIN: 1390-4338; e-mail: Vasilisk754@mail.ru

Плетнёв Максим Геннадьевич,

аспирант кафедры «Управление промышленными организациями», старший научный сотрудник УНИР; ORCID: 0000-0003-1917-0782; eLibrary SPIN: 9468-7240; e-mail: pletnevmg@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Dmitriy S. Taldykin,

Student of the Faculty of Mechanical Engineering and Design, Laboratory Assistant at the Machine Parts and Theory of Mechanisms Department; address: 99 Ryazansky ave, Moscow, Russia, 109542; ORCID: 0009-0008-5071-426X; eLibrary SPIN: 2271-8386; e-mail: dima.dima.taldykin@mail.ru

Vasilisa-Aanastasiya V. Baidakova,

Postgraduate of the Management of Industrial Organisations Department, Specialist of the Reverse Engineering Laboratory; ORCID: 0009-0002-1990-6526; eLibrary SPIN: 1390-4338; e-mail: Vasilisk754@mail.ru

Maksim G. Pletnev,

Postgraduate of the Management of Industrial Organisations Department, Senior Researcher at the Research Activities Department; ORCID: 0000-0003-1917-0782; eLibrary SPIN: 9468-7240; e-mail: pletnevmg@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author