

Научная статья
УДК 678.86
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.027

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, СОЗДАНЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С НАТУРАЛЬНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

**Наталья Игоревна Черкашина¹, Дарья Васильевна Пушкарская²,
Елена Витальевна Форова³, Лариса Федоровна Шрубченко⁴**

^{1–4}Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова, Белгород, Россия

¹natalipv13@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

²dashamenzhulina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1583-7992>

³evforova@mail.ru

⁴larisash84@mail.ru

Аннотация

Активное развитие аддитивных технологий обеспечивает оперативное реагирование на производственные потребности, что способствует разработке безопасных и экологичных материалов. В центре внимания находятся экологически чистые, быстро возобновляемые ресурсы с армирующими свойствами. Высокое содержание SiO₂ в растительных отходах и возможность их химической модификации, для использования в качестве наполнителей, позволяют создавать композиционные материалы с высокими физико-механическими характеристиками. В данной работе исследуется возможность 3D-печати продукта методом FDM (Fused Deposition Modeling) из филамента, который состоит из композиционного материала на основе биоразлагаемого термопластичного полимера (полилактида) и наполнителя (модифицированной овсяной шелухи). Филамент был получен с помощью экструзии. Нити (филамент) были испытаны на растяжение, и из образцов с наилучшими результатами были напечатаны лабораторные образцы на 3D-принтере для дальнейших испытаний на изгиб и прочность. В результате работы были произведены лабораторные образцы из филамента, состоящего из высоконаполненного композиционного материала на основе PLA и модифицированного химическим способом наполнителя, обладающего высокими физико-механическими свойствами.

Ключевые слова:

полилактид, химическая модификация, шелуха овса, аддитивные технологии, филамент, 3D-печать

Благодарности:

исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FZWN-2024-0001 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ имени В. Г. Шухова.

Финансирование:

государственное задание Министерства науки и высшего образования РФ № FZWN-2024-0001.

Для цитирования:

Исследование физико-механических свойств изделий, созданных при использовании аддитивных технологий на основе композиционного материала с натуральным наполнителем / Н. И. Черкашина [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 164–168. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.027.

Original article

RESEARCH INTO THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS CREATED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES BASED ON COMPOSITE MATERIAL WITH NATURAL FILLER

Natalia I. Cherkashina¹, Daria V. Pushkarskaia, Elena V. Forova³, Larisa F. Shrubchenko⁴

^{1–4}Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

¹natalipv13@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

²dashamenzhulina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1583-7992>

³evforova@mail.ru

⁴larisash84@mail.ru

Abstract

The active development of additive technologies ensures prompt response to production needs, which contributes to the development of safe and environmentally friendly materials. The focus is on environmentally friendly, rapidly renewable resources with reinforcing properties. The high content of SiO₂ in plant waste and

the possibility of their chemical modification for use as fillers allow the creation of composite materials with high physical and mechanical properties. This paper examines the possibility of 3D printing a product using the FDM (Fused Deposition Modeling) method from a filament, which consists of a composite material based on a biodegradable thermoplastic polymer (polylactide) and a filler (modified oat husk). The filament was obtained by extrusion. The threads (filament) were tested for tension, and laboratory samples with the best results were printed on a 3D printer for further bending and strength tests. As a result of the work, laboratory samples were produced from a filament consisting of a highly filled composite material based on PLA and a chemically modified filler with high physical and mechanical properties.

Keywords:

polylactide, chemical modification, oat husk, additive technologies, filament, 3-D printing

Acknowledgements:

The article was prepared with the support of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2024-0001 using equipment based at the High Technology Centre of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov.

Funding:

State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2024-0001.

For citation:

Research into the physical and mechanical properties of products created using additive technologies based on composite material with natural filler / N. I. Cherkashina [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 164–168. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.027.

Введение

В настоящее время аддитивные технологии играют ключевую роль в процессе цифровизации производства. Этот процесс предполагает послойное создание изделий из различных материалов, исключая использование режущих или литейных машин [1; 2]. С помощью специального программного обеспечения и компьютерного моделирования аддитивные технологии позволяют создавать трехмерные объекты сложной формы и геометрии на 3D-принтерах. Основной принцип аддитивных технологий заключается в точном послойном нанесении материала до получения спроектированной трехмерной модели, независимо от сложности ее поверхности [3]. Наиболее распространенным и доступным методом является экструдирование (FDM) [4]. В 3D-принтерах этого типа материал чаще всего в виде нити (филамента). Он подается в экструдер (печатающую головку), нить нагревается до температуры плавления и под давлением экструдировается через сопло на рабочую поверхность [5; 6].

Для 3D-печати широко используются различные пластиковые материалы. В качестве связующего вещества для наноккомпозитов предпочтительны полимерные матрицы, в основном термопласты с высокой пластичностью [7–9]. Полимолочная кислота (PLA) особенно популярна благодаря своей термопластичной структуре, доступности, экономичности и способности к более быстрому биоразложению, по сравнению с другими полимерами. В период стремления к экологическому балансу особое внимание уделяется аграрным отходам производства таким, как волокна и частицы шелухи злаковых культур, скорлупа орехов и косточки плодов, древесные опилки [10; 11] и т. д. Эти материалы демонстрируют хорошие физико-механические свойства в композициях с полимерными матрицами благодаря своим уникальным характеристикам и совместимости с полимерами. Цель исследования заключалась в создании объектов с использованием аддитивных технологий из композиционного материала, содержащего измельченную шелуху овса.

Результаты

Благодаря высокому содержанию чистого аморфного кремнезема, для улучшения свойств полимерной матрицы использовали шелуху овса (сбор урожая — 2023 г.). Для удаления загрязнений и улучшений адгезионной способности шелухи ее промывали в щелочном растворе. После — в дистиллированной воде для нормализации pH. Высушенные и измельченные частицы будущего наполнителя химически модифицировали кремнийорганической смолой К-9.

Были изготовлены составы с различным соотношением модифицированного наполнителя и PLA по массе изделия. Методом экструдирования под воздействием температуры проводилась первичная гомогенизация наполнителя и полимерной матрицы. Для равномерного распределения модифицированных частиц наполнителя нить после первичного экструдирования подвергалась измельчению до мелкодисперсного порошка и экструдировалась второй раз под воздействием температуры.

Созданные филаменты подвергались испытанию на специализированном оборудовании с целью определения показателя относительного удлинения, % и показателя максимальной деформации, мм. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

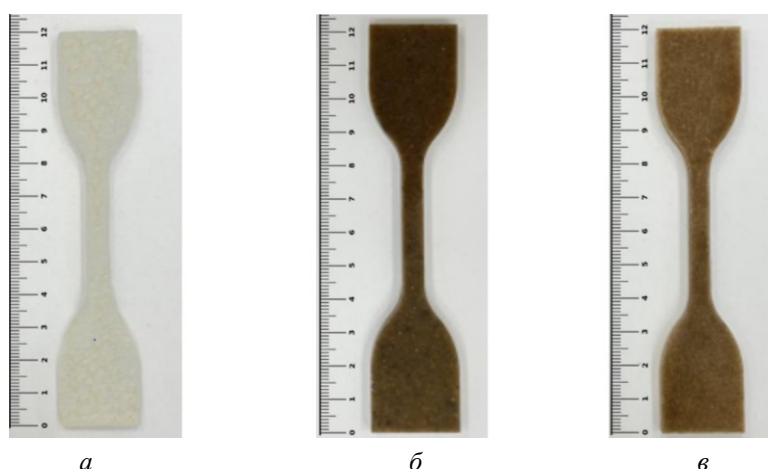
Таблица 1

Экспериментальные данные пластичности филамента

Состав материала PLA/шелуха овса (ШО), мас. %	Показатель	
	Относительное удлинение, %	Максимальная деформация, мм
PLA 100	42,15	12,31
PLA/ШО 10	44,54	13,36
PLA/ШО 20	40,37	11,73
PLA/ШО 30	26,07	7,82

В результате химической модификации наполнителя достигается равномерное распределение напряжений в композиционном материале. Наибольшие показатели относительного удлинения, % и максимальной деформации, мм наблюдаются у состава PLA с добавлением 10 мас. % модифицированной овсяной шелухи. Это свидетельствует о том, что данный филамент обладает наибольшей упругостью и гибкостью, так как оптимальное соотношение наполнителя и полимера способствует увеличению относительного удлинения.

Итоговые составы нитей использовали в качестве филамента для печати лопаток для испытаний на изгиб, представленных на рисунке, согласно стандартной методике на 3D-принтер Picaso Designer X S2 с учетом его параметров. Изделие с составом PLA с добавлением до 30 мас. % модифицированной шелухи овса не получилось произвести на устройстве, так как филамент характеризуется хрупким и неподатливым. Результаты испытаний представлены в табл. 2.



Напечатанные изделия на 3D-принтере Picaso Designer X S2:
а — из PLA 100 %; б — PLA/ШО 10 wt. %; в — PLA/ШО 20 wt. %

Таблица 2

Экспериментальные данные прочностных показателей лопаток,
созданных на 3D-принтере Picaso Designer X S2

Состав материала PLA/шелуха овса (ШО), мас. %	Показатель	
	Предел прочности при изгибе, МПа	Максимальная деформация, мм
PLA 100	52,93	12,31
PLA/ШО 10	53,06	13,36
PLA/ШО 20	46,85	11,73

Структурная плотность и механическая прочность напечатанных изделий проверялась методом Виккерса, который используется для оценки сопротивления материала пластической деформации при локальном воздействии. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Исследования прочности материала

Показатель	
Состав материала PLA/шелуха овса (ШО), мас. %	Твердость по Виккерсу при нагрузке 100 г, HV
PLA 100	30,8
PLA/ШО 10	31,0
PLA/ШО 20	29,8

Вывод

В ходе 3D-печати были созданы изделия из композиционных материалов на основе биоразлагаемого полилактида (PLA) и модифицированного порошка овса. Модификация наполнителя, заключающаяся в нанесении кремнийорганической оболочки на частицы шелухи овса, значительно улучшила совместимость компонентов. Наилучшие физико-механические свойства продемонстрировал композит с оптимальным соотношением: PLA с 10 % массовой долей модифицированной шелухи овса. Полученные результаты подтверждают армирующее действие модифицированного наполнителя в оптимальной концентрации. Таким образом, композиты на основе PLA и модифицированной шелухи овса обладают высоким потенциалом для применения в различных отраслях, где требуются биоразлагаемые материалы с высокими механическими свойствами.

Список источников

1. Sandeep R., Vijaykumar J., Nitin K., Tejinder S. Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts // *Procedia materials science*. 2014. V. 6. P. 1625–1630.
2. Sztorch B., Brząkalski D., Pakuła D., Frydrych M., Spitalsky Z., Przekop R. Natural and Synthetic Polymer Fillers for Applications in 3D Printing—FDM Technology Area // *Solids*. 2022. V. 3. P. 508–548.
3. Kafle A., Luis E., Silwal R., Pan H., Shrestha P. 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA) // *Polymers*. 2021. V. 13. P. 3101.
4. Bhagia S., Agrawal R., Satlewal A., Durkovic J., Lagana R., Yoo C., Zhao X., Kunc V., pu Yunqiao, Ozcan S., Ragauskas A. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries // *Appl. Mater. Today*. 2021. V. 24. P. 101078.
5. Shaffer S., Yang K., Vargas J., Prima M., Voit W. On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation // *Polymer*. 2014. V. 55 (23). P. 5969–5979.
6. Akter M., Uddin M., Tania I. Biocomposites based on natural fibers and polymers: A review on properties and potential applications // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022. V. 41 (17-18). P. 705–742.
7. Mastalygina E., Podzorova M., Pantyukhov P., Popov A. Fibers and Filaments from Polylactic Acid: Production Features, Structure, and Physical–Mechanical Properties // *Polym. Sci. Ser. D*. 2024. V. 17. P. 181–186.
8. Farah S., Anderson D., Langer R. Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications—A Comprehensive Review // *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2016. V. 107. P. 367–392.
9. Pavon C., Aldas M., Samper M., Motoc D., Ferrándiz S., López J. Mechanical, Dynamic-Mechanical, Thermal and Decomposition Behavior of 3D-Printed PLA Reinforced with CaCO₃ Fillers from Natural Resources // *Polymers*. 2022. V. 14. P. 2646.
10. Cherkashina N., Kuprieva O., Pushkarskaya D., Kashibadze N., Shrubchenko L. Modification of buckwheat husk powder and creation of composite material on its basis // *Physica Scripta*. 2024. V. 99. P. 105921.
11. Cherkashina N., Pavlenko Z., Matveenko D., Domarev S., Pushkarskaya D., Ryzhikh D. Synthesis and Characteristics of Composite Material with a Plant-Based Filler // *ChemEngineering*. 2023. V. 7 (2). P. 38.

References

1. Sandeep R., Vijaykumar J., Nitin K., Tejinder S. Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts. *Procedia materials science*, 2014, vol. 6, pp. 1625–1630.
2. Sztorch B., Brząkalski D., Pakuła D., Frydrych M., Spitalsky Z., Przekop R. Natural and Synthetic Polymer Fillers for Applications in 3D Printing—FDM Technology Area. *Solids*, 2022, vol. 3, pp. 508–548.
3. Kafle A., Luis E., Silwal R., Pan H., Shrestha P. 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 3101.

4. Bhagia S., Agrawal R., Satlewal A., Durkovic J., Lagana R., Yoo C., Zhao X., Kunc V., pu Yunqiao, Ozcan S., Ragauskas A. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. *Appl. Mater.Today*, 2021, vol. 24, p. 101078.
5. Shaffer S., Yang K., Vargas J., Prima M., Voit W. On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation. *Polymer*, 2014, vol. 55 (23), pp. 5969–5979.
6. Akter M., Uddin M., Tania I. Biocomposites based on natural fibers and polymers: A review on properties and potential applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2022, vol. 41 (17–18), pp. 705–742.
7. Mastalygina E., Podzorova M., Pantyukhov P., Popov A. Fibers and Filaments from Polylactic Acid: Production Features, Structure, and Physical–Mechanical Properties, *Polym. Sci. Ser. D.*, 2024, vol. 17, pp. 181–186.
8. Farah S., Anderson D., Langer R. Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications – A Comprehensive Review. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 2016, vol. 107, pp. 367–392.
9. Pavon C., Aldas M., Samper M., Motoc D., Ferrándiz S., López J. Mechanical, Dynamic-Mechanical, Thermal and Decomposition Behavior of 3D-Printed PLA Reinforced with CaCO₃ Fillers from Natural Resources. *Polymers*, 2022, vol. 14, p. 2646.
10. Cherkashina N., Kuprieva O., Pushkarskaya D., Kashibadze N., Shrubchenko L. Modification of buckwheat husk powder and creation of composite material on its basis, *Physica Scripta*, 2024, vol. 99, p. 105921.
11. Cherkashina N., Pavlenko Z., Matveenko D., Domarev S., Pushkarskaya D., Ryzhikh D. Synthesis and Characteristics of Composite Material with a Plant-Based Filler. *ChemEngineering*, 2023, vol. 7 (2), p. 38.

Информация об авторах

Н. И. Черкашина — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник;

Д. В. Пушкарская — аспирант, младший научный сотрудник;

Е. В. Форова — инженер-исследователь;

Л. Ф. Шрубченко — инженер-исследователь.

Information about the authors

N. I. Cherkashina — DSc (Engineering), Leading Researcher;

D. V. Pushkarskaya — Postgraduate Student, Research Assistant;

E. V. Forova — Research Engineer;

L. F. Shrubchenko — Research Engineer.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 07.07.2025; принята к публикации 21.07.2025.
The article was submitted 23.06.2025; approved after reviewing 07.07.2025; accepted for publication 21.07.2025.