

МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИЛАКТИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНА: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ НА ПРОЧНОСТЬ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ

А.М. Алтуева, З.Л. Бесланеева, К.Р. Кожемова, Л.Р. Паштова

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

Поступила в редакцию 4.11.2024 г.

Аннотация. В статье проводится анализ физико-химических свойств модифицированного вещества – полилактида (PLA), в структуру которого внедрены наночастицы графена. Данная модификация структуры полимера, согласно гипотезе исследования, позволит изменить свойства нового соединения, такие как прочность и термостойкость. В качестве полимера, в работе представлен анализ свойств полилактида, при добавлении в его структуру нановещества – графена. Характеризуя полилактид (PLA) отметим, что сегодня он является одним из наиболее популярных биополимеров, используемым в различных областях, включая медицину и 3D-печать. Однако его механические свойства и термостойкость ограничены, что сказывается на области его применения в определенных условиях. Внедрение графена, известного своими исключительными механическими и термическими свойствами, в структуру полимера, позволяет значительно улучшить характеристики полилактида. Объединение свойств полимеров и нанокompозитов открывает новые горизонты для разработки материалов с уникальными характеристиками. Это сочетание позволяет создавать более прочные, термостойкие и функциональные материалы, которые могут быть использованы в различных отраслях, включая строительство, медицину, электронику и пр. Нанокompозиты представляют собой важное направление в области материаловедения, способствуя созданию более устойчивых и эффективных решений для современных задач.

Целью данного исследования является оценка влияния различных концентраций графена на прочность и термостойкость модифицированного полилактида.

В ходе исследования нами запланировано было проведение серии сравнительных анализов для уточнения свойств PLA в следующих образцах: композиционный материал, полученный при добавлении графена с процентным содержанием последнего 0,1%, композиционный материал, полученный при добавлении графена с процентным содержанием последнего 0,2%, образец без наполнителя. Введение графена в состав полилактида приводит к увеличению прочности на растяжение и жесткости материала. Это связано с высокой прочностью графена и его способностью эффективно распределять нагрузки. Графеновые наночастицы способствуют повышению термостойкости полилактида, что делает модифицированный материал более устойчивым к высоким температурам. Это открывает новые возможности для применения PLA в условиях, где требуется высокая термостойкость. Результаты исследования показывают, что включение в состав полиэфира наномолекул графена позволяет повысить прочность и термостойкость нанокompозита.

Ключевые слова: графен, полилактид, термостойкость, прочность, наномодификаторы.

Наметившаяся в последние 20 лет тенденция к постепенному переходу от синтетических полимеров, получаемых из нефти, к полимерам, синтезируемым из природного сырья, становится все более очевидной. Отмечен стабильный рост применения новейших полимерных материалов, отличающихся высокими эксплуатационными по-

казателями, которые комплексно влияют на свойства конечного продукта [1]. Среди различных полимеров этого типа наиболее перспективным является термопластичный алифатический полилактид (PLA), полученный поликонденсацией молочной кислоты [2, 3].

Молочная кислота является простейшей гидроксикислотой, имеющей хиральный атом углерода и существующей в виде оптических L- и

D-изомеров. Полилактид (PLA) относится к семейству алифатических полиэфиров, чаще всего получаемых из α -гидроксикислот. По своей структуре PLA - это полимер, стереомер, модификация которого осуществляется путем полимеризации контролируемой смеси L- и D-изомеров с получением высокомолекулярных и аморфных или полукристаллических полимеров [4]. Сырьем для получения молочной кислоты могут служить различные углеводы, такие как глюкоза, сахароза, лактоза и др. Существует два метода синтеза PLA: прямая поликонденсация молочной кислоты и полимеризация лактида (димера молочной кислоты) с раскрытием цикла [5, 6]. Полимеры обладают ценными физико-химическими свойствами: высокоэластичностью, диэлектрическими свойствами, способностью образовать высокопрочные волокна и пленки; способность резко изменить свои свойства под действием малого количества реагента и др. [7] Нетоксичность полилактида является главным преимуществом данного материала. В качестве основных недостатков данного материала можно отметить его недолговечность и дороговизну [8]. Путем изменения времени реакции, температуры, типа и количества катализатора можно влиять на свойства получаемого полимера.

Выбор оптимального катализатора является чрезвычайно важным аспектом этого процесса, поскольку от него зависят свойства и выход конечного продукта. Обычно для синтеза PLA используются металлоорганические катализаторы, которые дают хороший выход, но загрязняют конечный продукт и затрудняют его очистку; поэтому в настоящее время используются альтернативные каталитические системы, не содержащие металлов. Соотношение изомеров в полимере регулируется составом реакционной смеси (соотношение L,L-, D,L-, и DD-лактидов, вступающих в реакцию полимеризации) [9].

PLA находит широкое применение как материал для 3D-печати [10]. Однако PLA обладает некоторыми недостатками, ограничивающими его применение, основными из которых являются низкая термостабильность и гидрофильность, а также повышенная хрупкость [7]. Эти недостатки можно устранить либо путем смешивания PLA с другими полимерами, либо путем добавления наполнителей.

В последние годы ведутся работы, направленные на создание нанокомпозитов на основе PLA [11]. В полимерных нанокомпозитах чаще всего применяются такие наполнители, как оксидные

керамические наночастицы (например, SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO) и органоглины, металлы (W и Sn), а также углеродные нановолокна и нанотрубки, которые могут применяться в комбинации с другими наполнителями [12, 13]. Особое внимание уделяется композитам, содержащим различные производные углерода, такие как многослойные углеродные нанотрубки, терморасширенный графит, оксид графена (ОГ) и восстановленный оксид графена (ВОГ) [14-22].

В данной работе будут рассмотрены свойства такого нанокомпозита как графен, который был открыт в 2004 году в Манчестерском университете учеными российского происхождения А. Геймом и К. Новосёловым [23]. В связи с этим большой интерес вызывают полимерные нанокомпозиционные материалы (полимерные нанокомпозиты - ПМК) на основе графена, которые характеризуются улучшенными механическими свойствами, термической стабильностью, электро-, теплопроводностью и др. [22] Графен, представляющий собой монослой графита в виде плоских листов толщиной в один атом sp^2 -гибридизованного углерода, упорядоченный в гексагональные структуры, обладает высокими значениями механической прочности и теплопроводности, уникальными электрическими свойствами, оптической прозрачностью и другими ценными характеристиками [24, 25]. Исследователи, например, Р.К. Анг отмечают, что графен и оксид графена (GO) обладают отличными электронными, тепловыми и механическими свойствами [26]. Анализ проведенный С. З. Роговиной, О.П. Кузнецовой в отношении термического поведения исходного полилактида в его композициях с нанопластинами графита (НПГ) и восстановленного оксида графена (ВОГ), синтезированных твердофазным и жидкофазным способами показало, что добавление как НПГ, так и ВОГ в общем случае приводит к увеличению термостабильности и повышению температуры холодной кристаллизации вследствие образования более термостабильной формы α -полилактида, а также уменьшению степени кристалличности полилактида из-за снижения сегментальной подвижности макромолекул в присутствии наполнителей [17].

ОГ – это графит с различными ковалентно связанными кислородсодержащими (эпоксидными, карбоксильными, гидроксильными, эфирными и т.д.) группами, прикрепленными к плоскостям графена [27]. Наличие дефектов, образующихся при окислении графита, и остаточных кислородсо-

держащих групп снижает электропроводность, в результате чего графит является отличным изолятором и эффективно используется при производстве изоляционных покрытий, пенополиуретанов и т.д. [28]. При восстановлении ОГ кислородсодержащие группы частично восстанавливаются, что приводит к образованию ВОГ. Таким образом, терморасширенный графит и ВОГ, благодаря своей хорошей тепло- и электропроводности, являются перспективными наполнителями при создании композитов, улучшающих не только физико-химические характеристики PLA, но и повышающих его термостойкость [29-31].

Благодаря высокой электрической и тепловой проводимости графеновых или графитовых нанопластин введение даже небольшого их количества в полимерную матрицу может привести к созданию тепло- и электропроводящего композита [32]. Композиции PLA с ВОГ активно используются в биомедицине для создания биосовместимых изделий с высокой прочностью — каркасов и биоимплантатов [33-35]. Термическая деструкция композитов на основе PLA с добавками графена также является предметом интенсивных исследований, что связано с необходимостью решения проблем, связанных с термостойкостью и горючестью этих материалов [36].

Целью данного исследования является оценка влияния различных концентраций графена на прочность (растяжимость) и термостойкость модифицированного полилактида.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью изучения механических свойств модифицированного полилактида, нами подобран исходный материал - полилактид PLA фирмы FDplast, Россия, обладающий следующими характеристиками (таблица 1).

В качестве второго вещества, для создания композиционного материала, был предложен графен. Графен - моноатомный слой атомов углерода - представляет собой очень легкий материал: его поверхностная плотность составляет 0,77 мг/м², в то время как площадь свободной поверхности - 2600 м²/г. Графен - это двумерный материал, аллотропная модификация углерода (таблица 2). В графене атомы углерода выстроены в 6-тигранную структуру и формируют слой толщиной в один атом.

Для получения нанокompозита, в качестве углеродсодержащего компонента использовали графен, однако отметим, что равномерное введение и распределение углеродных наноструктур в порошкообразном виде в матрицу компози-

Таблица 1

Характеристика полилактид PLA

Характеристика	Показатель	Единицы измерения
Плотность материала	1,25	г/см ³
Температура термдеформации	52	°C (0,45 МПа)
Температура стеклования: около +60°C	60	°C
Температура плавления	от +170 до +180	°C
Термостойкость	до +70	°C
Индекс текучести расплава	4	г/10 мин (190 °C/2,16 кг)
Предел прочности	65	МПа
Относительное удлинение при разрыве	12	%
Прочность на изгиб	75	МПа
Модуль упругости при изгибе	2102	МПа
Диаметр филамента	1,75±0,03	мм
Ударная прочность по Изоду	8,5	Дж/м

Таблица 2

Характеристика графена

Характеристика	Показатель	Единицы измерения
Плотность материала	0,77	мг/м ²
Модуль сдвига	280	ГПа
Модуль Юнга (жесткость) при растяжении	1	ТПа
Прочность	100	ГПа
Температура плавления	5000	К

онного материала невозможно. В связи с этим необходимо было наноструктурный компонент перевести в вид дисперсии. Данная процедура была реализована за счет применения резольной водорастворимой фенолформальдегидной смолы (Фенотам GR-326 производства, АО «Пигмент», г. Тамбов, Россия). Модифицирование графеновых нанопластин фенолформальдегидной смолой способствует получению их высококонцентрированных и устойчивых дисперсий.

Внедрение и получение композита за счет дисперсионного вещества графена с расплавленным полилактидом, осуществлялось при ультразвуковой эксфолиации материалов. Ультразвуковую обработку проводили с использованием установки периодического действия ИЛ-10 с выходной мощностью 2 кВт и частотой 22 кГц, интенсивность УЗ воздействия $50 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ (INLAB НПО, Санкт-Петербург, Россия). Обработка ультразвуком проводилась в течение 2 часов, охлаждение осуществлялось непрерывно и проводилось с помощью проточной воды.

Полученный осажденный композит был промыт водой, сушка проводилась в вакуумном сушильном шкафу Stegler VAC-24 при температуре 50°C , в течение 1 часа.

В ходе получения композиционных материалов было получено два образца, которые содержали 0,1%, 0,2% графена. Третьим контрольным образцом послужил исходный материал - полиактид PLA (FDplast, Россия) с 0% содержанием графена.

Для получения одинаковых форм анализируемых образцов в виде филамента, мы использовали настольный экструдер НТ400 (производство Китай). Филаменты (нити) полученных образцов композитов сформированы следующих размеров $d=1,75 \text{ мм}$, длина каждого образца составляет 70 мм.

На следующем этапе проводились испытания полученных образцов. Оценка механических характеристик композитного материала разных образцов была проведена на оборудовании - машина испытательная универсальная РЭМ-50-А-1, которая предназначена для механических испытаний в режиме растяжения, сжатия и изгиба образцов и изделий из материалов, разрушающая нагрузка для которых не превышает 50 кН (5 тонн). Анализ образцов на растяжение проводился при комнатной температуре 19°C и влажности 60%, скорость растяжения материала составляла $2 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Для изучения и оценки термостойкости полученного композитного материала в разных образцах проводилась был использован метод тер-

могравиметрического анализа с использованием дериватографа Q-1500Д фирмы MOM (Венгрия). Испытания проводили в специальных керамических тиглях на воздухе в интервале температур 293–873К. Скорость подъема температуры – $10^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$, навеска вещества – 200 мг.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве испытательных образцов выбраны варианты с процентным содержанием графена 0,1%, 0,2%, а также третий образец – полимер без наночастиц. Механические свойства нанокompозита оценивалось на прочность при растяжении материала (рис.1).

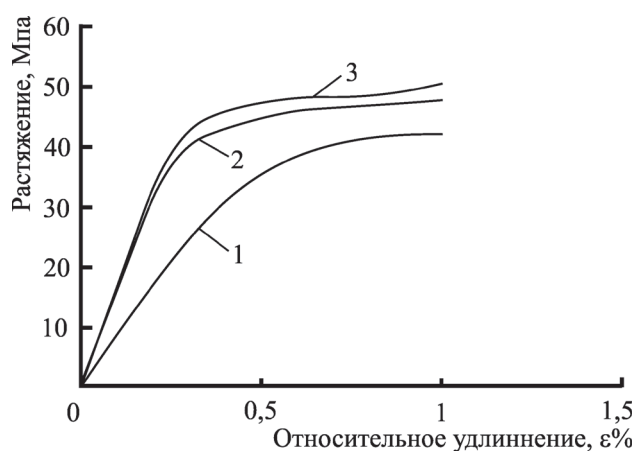


Рис. 1. Прочность на растяжение. Обозначения: 1 - ПМК; 2 - ПМК + Гр 0,1; 3 - ПМК + Гр 0,2

Нанокompозиты с графитовым наполнителем (0,1% и 0,2%) демонстрируют положительное отклонение модуля упругости и прочности на растяжение по сравнению с упругостью растяжения полимера без добавок (синяя линия). Прочность на разрыв и модуль упругости при растяжении увеличивались по мере добавления нанокompозита. Сочетание графеновых нановолокон уменьшало относительное удлинение при разрыве. Благодаря свойствам относительного удлинения нанокompозит, полученный в ходе этого исследования, демонстрирует новые свойства.

Исследования ПМК, а также термической стабильности чистого полимера и нанокompозитов с содержанием графена 0,1 и 0,2% (рис. 2.) показали, что последняя улучшается при добавлении графена к чистому образцу полимеру ПМК. Процесс термической деградации у полимера и у нанокompозита начинается в основном при температурах выше 300°C , что обусловлено разрывами связи. Результаты показывают, что у нанокompозита ПМК+Гр0,2 повышен термическая стабиль-

ность по сравнению с чистым полимером ПМК примерно на 5 °С.

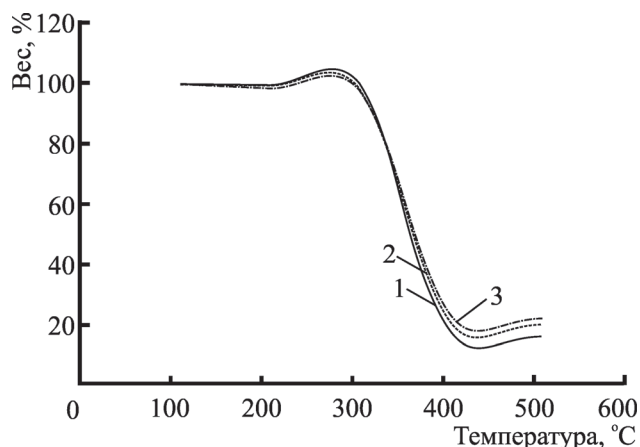


Рис. 2. Термическая стабильность. Обозначения: 1 - ПМК; 2 - ПМК + Гр 0,1; 3 - ПМК + Гр 0,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что добавление графеновых наночастиц значительно влияет на механические и термические свойства полилактида. Добавление графена изменяет свойства PLA.

Введение графена в состав полилактида приводит к увеличению прочности на растяжение и жесткости материала. Это связано с высокой прочностью графена и его способностью эффективно распределять нагрузки. Графеновые наночастицы способствуют повышению термостойкости полилактида, что делает модифицированный материал более устойчивым к высоким температурам. Это открывает новые возможности для применения PLA в условиях, где требуется высокая термостойкость.

Необходимы дальнейшие исследования для оптимизации содержания графена в композите и изучения его влияния на другие свойства, такие как ударная прочность, адгезия и процессы переработки. Также стоит рассмотреть возможность использования различных форм графена (например, оксид графена) для достижения лучших результатов.

Таким образом, модификация полилактида с использованием графена открывает новые горизонты для разработки высококачественных, устойчивых и экологически безопасных материалов, что делает ее актуальной темой для будущих исследований и разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Чичварин А.В. Явление стабилизации теплового старения связующих на основе товар-

ного полибутадиена смесью фуллеренов группы C50-C92 / А.В. Чичварин, Т.И. Игуменова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 4. – С. 142-144. // Chichvarin A.V. The phenomenon of stabilization of thermal aging of binders based on commercial polybutadiene with a mixture of fullerenes of the C50-C92 group // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2011. – No. 4. – P. 142-144.

2. Jem K. J. Microbial Lactic Acid, Its Polymer Poly(lactic acid) and their industrial Applications, Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications / K. J. Jem, J. F. van der Pol, S. de Vos Ed. G. G.-Q. Chen. – 2010, Berlin, Heidelberg: Springer. – P. 323-346.

3. Garlotta D. A. Literature review of poly(lactic acid) / D. A. Garlotta // J. Polym. Environ. – 2011. – Vol. 19. – No. 2. – P. 63-84.

4. Avérous L. Polylactic acid: synthesis, properties and applications. In: Belgacem MN, Gandini A (eds) Book Monomers, polymers, and composites from renewable resources. Chapter 21 – Polylactic Acid: Synthesis, Properties and Applications / L. Avérous. – 2008. Elsevier. – P. 433-450.

5. Ghafar T. Recent trends in lactic acid biotechnology: A brief review on production to purification / T. Ghafar, M. Irshad, Z. Anwar, T. Aqil, Z. Zulifqar, A. Tarig, M. Kamran, N. Ehsan, S. Mehmood // J. Radiat. Res. Appl. Sci. – 2014. – Vol. 7. – No. 2. – P. 222- 229.

6. Mehta R. Synthesis of poly(lactic acid): A Review. / R. Mehta, V. Kumar, H. Bhunia, S. N. Upadhyay // J. Macromol. Sci., Polym. Rev. – 2005. – Vol. 45. – No. 4. – P. 325-349.

7. Шутихин Е.Д. Российские и зарубежные ученые и их вклад в развитие науки о полимерах // Материалы XVI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <https://scienceforum.ru/2024/article/2018036562> (дата обращения: 24.01.2025). // Shutikhin E.D. Russian and foreign scientists and their contribution to the development of polymer science // Proceedings of the XVI International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum" URL: <https://scienceforum.ru/2024/article/2018036562> (date of request: 24.01.2025).

8. Коваленко Р. В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №1. С. 263-266 // Kovalenko R. V. Modern polymer materials and 3D printing technologies // Bulletin of

Kazan Technological University. 2015. №1. С. 263-266

9. Drumright R. E. Polylactic acid technology / R. E. Drumright, P. R. Gruber, D. E. Henton // *Adv. Mater.* 2000. – Vol. 12. – No. 23. – P. 1841-1846.

10. Camargo J.C. Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing / J.C. Camargo, Á.R. Machado, E.C. Almeida et al. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2019. – Vol. 103 – P. 2423–2443.

11. Raquez J.-M. Polylactide (PLA)-based nanocomposites / J.-M. Raquez, Y. Habibi, M. Murariu, Ph. Dubois // *Progress in Polymer Science.* 2013. – Vol. 38, Iss. 10-11. – P. 1504-1542.

12. Кулик В.И. Наномодифицированные конструкционные материалы: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов, Е.Е. Складнова; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 138 с. // Kulik V.I. Nanomodified structural materials: a textbook / V.I. Kulik, A.S. Nilov, E.E. Skladnova; Baltic State Technical University. University of St. Petersburg. – 2020. – 138 p.

13. Holden G. Thermoplastic Elastomers/ G. Holden, H.R. Kricheldorf, R.P. Quirk. –Hanser Publishers, 2004. – 540 p.

14. Norazlina H. Graphene modifications in polylactic acid nanocomposites: a review. / H. Norazlina, Y. Kamal // *Polym. Bull.* – 2015. – Vol. 72. – P. 931–961.

15. Gonçalves C. Poly(lactic acid) Composites Containing Carbon-Based Nanomaterials: A Review / C. Gonçalves , I. C. Gonçalves, F. D. Magalhães, A. M. Pinto // *Polymers.* – 2017. – Vol. 9. – P. 269.

16. Dehnou K.H A review: studying the effect of graphene nanoparticles on mechanical, physical and thermal properties of polylactic acid polymer / K. H. Dehnou, G. S. Norouzi, M. Majidipour // *RSC Adv.* – 2023. – Vol. 13. – P. 3976.

17. Роговина С.З. Композиции полилактида с углеродными нанонаполнителями: получение, структура, свойства / С.З. Роговина, О.П. Кузнецова, М.М. Гасымов, С.М. Ломакин, В.Г. Шевченко, А.А. Берлин // *Высокомолекулярные соединения Б.* – 2024. – Т. 66. – № 2. – С. 140-155 // Rogovina S.Z. Compositions of polylactide with carbon nanofillers: preparation, structure, properties / S.Z. Rogovina, O.P. Kuznetsova, M.M. Gasimov, S.M. Lomakin, V.G. Shevchenko, A.A. Berlin // *High-molecular compounds B.* – 2024. – Vol. 66. – No. 2. – P. 140-155.

18. Роговина С.З. Полимерные композиции на основе полилактида и восстановленного окси-

да графена / С.З. Роговина, С.М. Ломакин, М.М. Гасымов, О.П. Кузнецова, В.Г. Шевченко, В.П. Мельников, А.А. Берлин // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* – 2022. – № 6. – С. 11-19. // Rogovina S.Z. Polymer composites based on polylactide and reduced grapheme oxide / S.Z. Rogovina, S.M. Lomakin, M.M. Gasymov, O.P. Kuznetsova, V.G. Shevchenko, V.P. Mel'nikov, A.A. Berlin // *Polymer Science, Series D.* – 2023. – V. 16. – No. 1. – P. 161-167.

19. Rogovina S.Z. Polymer composites based on polylactide and reduced grapheme oxide / S.Z. Rogovina, S.M. Lomakin, M.M. Gasymov, O.P. Kuznetsova, V.G. Shevchenko, V.P. Mel'nikov, A.A. Berlin // *Polymer Science, Series D.* – 2023. Vol. 16. – № 1. – P. 161-167.

20. Rogovina S.Z. Influence of the method of obtaining filled polymer nanocomposites of polylactide reduced grapheme oxide on their properties and / S. Z. Rogovina, M. M. Gasymov, S. M. Lomakin, O. P. Kuznetsova, I. M. Ermolaev, V. G. Shevchenko, A. V. Shapagin, A. A. Arbuzov, A. A. Berlin // *Mechanics of Composite Materials.* – 2023. – Vol. 58. – No. 6. – P. 845-856.

21. Rogovina S.Z. Polylactide Composites Containing Various Carbon Nanofillers / S. Z. Rogovina, M. M. Gasymov , S. M. Lomakin, O. P. Kuznetsova, V. G. Shevchenko, A. A. Arbuzov, A. A. Berlin // *Russian Journal of Physical Chemistry B.* 2023. – Vol. 17. – No. 6. – P. 1376-1383. (Russian Original *Khimicheskaya Fizika*, 2023, Vol. 42, No. 11, pp. 70–78.)

22. Холхоев Б.Ч. Функциональные композиты на основе полилактида и графена / Б.Ч. Холхоев, А.С. Буинов, М.Н. Козлова, В.Г. Макотченко, В.Е. Федоров, В.Ф. Бурдуковский // *Журнал прикладной химии.* – 2018. – Т. 91. – № 3. – С. 352 - 355 // Kholkhoev B.C. Functional composites based on polylactide and graphene / B.C. Kholkhoev, A.S. Buinov, M.N. Kozlova, V.G. Makotchenko, V.E. Fedorov, V.F. Burdukovsky // *Journal of Applied Chemistry.* – 2018. – Vol. 91. – No. 3. – P. 352-355.

23. Чуланов Д.М. Возможности использования графена // *Научный журнал.* 2020. №7 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-grafena> (дата обращения: 24.01.2025). // Chulanov D.M. Possibilities of using graphene // *Scientific Journal.* 2020. No. 7 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-grafena> (accessed: 01/24/2025).

24. Mbayachi V. B. Graphene synthesis, characterization and its applications: A review / V. B.,

Mbayachi, E. Ndayiragije, T. Sammani, S. Taj, E. R. Mbuta, Atta ullah khan // Results in Chemistry. – 2021. – Vol. 3. – P. 100163. doi:10.1016/j.rechem.2021.100163

25. Ощаги Х. Исследование антикоррозионных свойств нетканого полиэстерного слоя, дополненного графеном / Х. Ощаги, А. Мохтари // Молодой ученый. – 2017. – № 21 (155). – С. 1-8. URL: <https://moluch.ru/archive/155/37145/> (дата обращения: 24.01.2025). // Oshhagi H. Issledovanie antikorrozionnyh svojstv netkanogo polijesternogo sloja, dopolnennogo grafenom / H. Oshhagi, A. Mohtari // Molodoj uchenyj. – 2017. – № 21 (155). – P. 1-8. URL: <https://moluch.ru/archive/155/37145/> (data obrashhenija: 24.01.2025).

26. Ang P.K., Jaiswal M., Lim C.H. A bioelectronic platform using a graphene–lipid bilayer interface / P. K. Ang, M. Jaiswal, C. H Yi Xuan Lim, Y. Wang, J. Sankaran, A. Li, C. T. Lim, T. Wohland, Ö. Barbaros, K. P.Loh // ACS Nano. – 2010. – Vol. 4. – P. 7387 - 7394.

27. Sanes J. Extrusion of Polymer Nanocomposites with Graphene and Graphene Derivative Nanofillers: An Overview of Recent Developments / J. Sanes, C. Sánchez, R. Pamies, M.-D. Avilés, M.-D. Bermúdez // Materials. – 2020. – Vol. 13. – P. 549.

28. Gao W. The Chemistry of Graphene Oxide, Graphene Oxide. Cham: Springer Int. Publ. – 2015. – P. 61-95.

29. Fu Y. Functionalized graphenes with polymer toughener as novel interface modifier for property-tailored polylactic acid/graphene nanocomposites / Y. Fu, L. Liu, J. Zhang, W. C. Hiscox // Polym. – 2014. – Vol. 55. – No. 24 – P. 6381-6389.

30. Rogovina S. The study of properties and structure of polylactide-graphite nanoplates compositions / S. Rogovina, S. Lomakin, S. Usachev, M. Gasymov, O. Kuznetsova, N. Shilkina, V.

Shevchenko, A. Shapagin, E. Prut, A. Berlin // Hindawi Polym. Crystal. – 2022. – Article ID 4367582.

31. Mortazavi B. Experimental and multiscale modeling of thermal conductivity and elastic properties of PLA/expanded graphite polymer nanocomposites / B. Mortazavi, F. Hassouna, A. Laachachi, A. Rajabpour, S. Ahzi, D. Chapron, V. Toniazzi, D. Ruch // Thermochim. Acta – 2013. – Vol. 552. – P. 106-113.

32. Gao Y. Influence of filler size on the properties of poly(lactic acid) (PLA)/graphene nanoplatelet (GNP) nanocomposites / Y. Gao, O.T. Picot, E. Bilotti, and T. Peijs // Europ. Polym. J. – 2017. – Vol. 86. – P. 117-131.

33. Lai Y.-H. Regulation of cell differentiation via synergistic self-powered stimulation and degradation behavior of a biodegradable composite piezoelectric scaffold for cartilage tissue / Y.-H. Lai, Y.-H. Chen, A. Pal, S.-H. Chou, S.-J. Chang, E.-W. Huan, Z.-H. Lin, S.-Y. Chen // Nano Energy. Part A. – 2021. – Vol. 90. – P. 106545.

34. Esperanza D. Cytocompatible scaffolds of poly(L-lactide)/reduced graphene oxide for tissue engineering / D. Esperanza, I. Naroa, R. Sylvie, L.-M. Senentxu // J. Biomat. Sci. Polym. – 2021. – Vol. 32. – No. 11. – P. 1406-1419.

35. Adekoya G.J. Recent advancements in biomedical application of polylactic acid/graphene nanocomposites: An overview / G. J. Adekoya, A. Ch. Ezika, O. Ch. Adekoya, E. R. Sadiku, Y. Hamam, S. S. Ray // BMEMat. – 2023. – Vol. 1. – e12042.

36. Usachev S. V. Thermal degradation of various types of polylactides research. The effect of reduced graphene oxide on the composition of the PLA4042D / S. V. Usachev, S. M. Lomakin, E. V. Koverzanova, N. G. Shilkina, I. I. Levina, E. V. Prut, S. Z. Rogovina, A. A. Berlin // Thermochim. Acta. – 2022. – V. 712. – 179227.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

Алтуева Альбина Мухамедовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры органической химии и ВМС

Бесланеева Зера Лионовна, кандидат технических наук, доцент кафедры органической химии и ВМС

Кожемова Карина Руслановна, кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры органической химии и ВМС

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Altueva Albina Mukhamedovna, PhD., Senior Lecturer, Department of Organic Chemistry and High-Molecular Compounds

Beslaneeva Zera Lionovna, PhD., Associate Professor, Department of Organic Chemistry and High-Molecular Compounds

Kozhemova Karina Ruslanovna, PhD., Senior Lecturer, Department of Organic Chemistry and High-Molecular Compounds

MODIFICATION OF POLYMERS USING NANOMATERIALS: INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE ADDITION OF NANOPARTICLES ON THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF POLYMERS, SUCH AS STRENGTH, HEAT RESISTANCE AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY

A.M. Altueva, Z.L. Beslaneeva, K.R. Kozhemova, L.R. Pashtova

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Abstract. The article analyzes the physico-chemical properties of a modified substance, polylactide (PLA), in the structure of which graphene nanoparticles are embedded. This modification of the polymer structure, according to the hypothesis of the study, will change the properties of the new compound such as strength and heat resistance. As a polymer, the paper presents an analysis of the properties of polylactide when adding graphene nanomaterial to its structure. Characterizing polylactide (PLA), we note that today it is one of the most popular biopolymers used in various fields, including medicine and 3D printing. However, its mechanical properties and heat resistance are limited, which affects its field of application under certain conditions. The incorporation of graphene, known for its exceptional mechanical and thermal properties, into the polymer structure makes it possible to significantly improve the characteristics of polylactide. Combining the properties of polymers and nanocomposites opens up new horizons for the development of materials with unique characteristics. This combination allows you to create more durable, heat-resistant and functional materials that can be used in various industries, including construction, medicine, electronics, etc. Nanocomposites represent an important area in the field of materials science, contributing to the creation of more sustainable and efficient solutions for modern tasks.

The purpose of this study is to evaluate the effect of different graphene concentrations on the strength and heat resistance of modified polylactide.

During the study, we planned to conduct a series of comparative analyses to clarify the properties of PLA in the following samples: composite material obtained by adding graphene with a percentage of the latter 0,1%, composite material obtained by adding graphene with a percentage of the latter 0,2%, sample without filler.

The results of the study show that the inclusion of graphene nanomolecules in the polyamide structure makes it possible to increase the strength and heat resistance of the nanocomposite.

Keywords: graphene, polylactide, heat resistance, strength, nanomodifiers.