
ХИМИЯ

Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 42–47.
Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026. Vol. 16, no. 1. P. 42–47.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64

Влияние графеновых наночастиц на прочность полилактида при его модификации

Альбина Мухамедовна Алтуева¹, Карина Руслановна Кожемова², Марат Хамидович Алтуев³, Назифат Мухтаровна Мирзоева⁴

^{1,2,3,4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹ k-a.albina@mail.ru

² kozhemova88@mail.ru

³ k-a.albina@mail.ru

⁴ mnazifa@bk.ru

Аннотация. Полилактид (PLA) – перспективный биоразлагаемый полимер, активно используемый в 3D-печати, упаковке и биомедицине. Однако его применение ограничено низкой механической прочностью и термостойкостью. В настоящей работе исследуется возможность улучшения этих характеристик за счёт модификации PLA наночастицами графена.

Ключевые слова: полилактид, графен, наполнители, термостойкость и термостабильность

Для цитирования: Алтуева А.М., Кожемова К.Р., Алтуев М.Х., Мирзоева Н.М. Влияние графеновых наночастиц на прочность полилактида при его модификации // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 42–47.

CHEMISTRY

Original article

Influence of graphene nanoparticles on the strength of polylactide during its modifications

Albina M. Altueva¹, Karina R. Kozhemova², Marat Kh. Altuev³, Nazifat M. Mirzoeva⁴

^{1,2,3,4} Kabardino-Balkarian State University, Nal'chik, Russia

¹ k-a.albina@mail.ru

² kozhemova88@mail.ru

³ k-a.albina@mail.ru

⁴ mnazifa@bk.ru

Abstract. Polylactide (PLA) is a promising biodegradable polymer widely used in 3D-printing, packaging, and biomedicine. However, its application is limited by insufficient mechanical strength and low thermal stability. This study explores the possibility of improving these properties by modifying PLA with graphene nanoparticles.

Keywords: polylactide, graphene, fillers, heat resistance and thermal stability

For citation: Altueva A.M., Kozhemova K.R., Altuev M.Kh., Mirzoeva N.M. The Influence of Graphene Nanoparticles on the Strength of Polylactide during Its Modification // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026. 2026;16(1):42–47.

Введение

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к постепенному отказу от традиционных нефтяных синтетических полимеров в пользу биополимеров, получаемых из возобновляемого природного сырья. Эта трансформация обусловлена как экологическими соображениями, так и стремлением к созданию материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, комплексно влияющими на свойства конечной продукции [1].

Особое внимание в этом контексте привлекает полилактид (PLA) – термопластичный алифатический полиэфир, синтезируемый из молочной кислоты [2, 3]. Молочная кислота, являясь простейшей α -гидроксикислотой, содержит хиральный центр и существует в виде двух оптических изомеров – L- и D-форм. PLA получают преимущественно двумя способами: прямой поликонденсацией молочной кислоты или кольцевой полимеризацией её циклического димера – лактида [4, 5].

Сырьём для производства молочной кислоты служат возобновляемые углеводы, такие как глюкоза, сахароза или лактоза. В зависимости от соотношения L- и D-изомеров в исходной смеси лактидов (L,L-, D,D- и мезо-D,L-форм) возможно целенаправленное регулирование стереоструктуры полимера, что позволяет получать как аморфные, так и полукристаллические разновидности PLA с заданными физико-химическими свойствами [6, 7].

Ключевыми достоинствами PLA являются его биосовместимость, нетоксичность, способность образовывать прочные плёнки и волокна, высокая диэлектрическая проницаемость, а также чувствительность к незначительным изменениям состава, позволяющая точно настраивать свойства материала [8]. Тем не менее, широкому применению PLA препятствуют ряд ограничений: относительно высокая стоимость, ограниченная долговечность, низкая термостабильность, повышенная хрупкость и гидрофильность [7, 8].

Одним из важнейших факторов, определяющих характеристики и выход конечного продукта, является выбор катализатора. Традиционно в синтезе PLA применяются металлоорганические катализаторы, обеспечивающие высокую эффективность реакции, но вызывающие загрязнение полимера металлами и усложняющие его последующую очистку. В связи с этим всё большее распространение получают металло-свободные каталитические системы, сочетающие высокую активность с экологической и биомедицинской безопасностью.

Несмотря на указанные недостатки, PLA активно используется в упаковке, биомедицине и аддитивных технологиях (в частности, в 3D-печати) [10]. Для преодоления ограничений, связанных с его механическими и термическими свойствами, применяются стратегии модификации: создание полимерных blends или введение функциональных наполнителей, в том числе наноразмерных, таких как графен.

Особое внимание в последнее время уделяется исследованию термической деструкции PLA-композиций, содержащих графеновые наполнители, что обусловлено необходимостью повышения их термостойкости и снижения горючести [8].

Экспериментальная часть

Целью настоящего исследования является оценка влияния различных концентраций графена на механическую прочность (в том числе растяжимость) и термостойкость модифицированного полилактида.

Для исследования механических свойств модифицированного полилактида (PLA) в качестве исходного материала был выбран гранулированный PLA, произведённый компанией FDplast (Россия). Основные характеристики используемого полимера приведены в *таблице 1*.

Таблица 1 – Физико-механические и термические характеристики исходного полилактида (PLA, FDplast, Россия)

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

В качестве нанонаполнителя для формирования композиционного материала использовался графен – двумерная аллотропная модификация углерода, состоящая из одного атомного слоя, в котором атомы упорядочены в гексагональную решётку (рисунок 1).

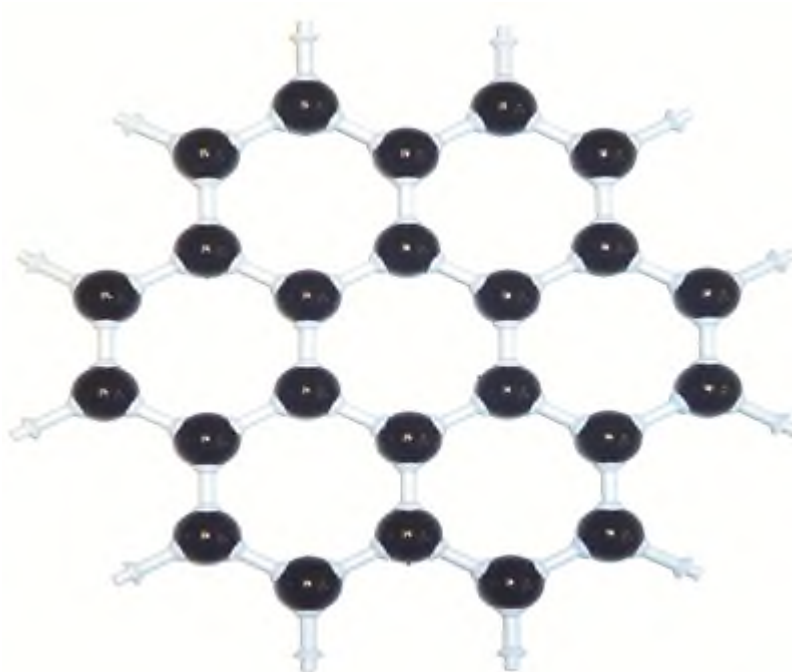


Рисунок 1 – Кристаллическая решетка графена

Графен характеризуется чрезвычайно низкой поверхностной плотностью ($0,77 \text{ мг/м}^2$) и рекордно высокой удельной поверхностью – до $2600 \text{ м}^2/\text{г}$ (таблица 2). Эти особенности обуславливают его высокую реакционную способность и эффективность даже при минимальных концентрациях в полимерной матрице, что делает его перспективным компонентом для модификации таких биополимеров, как полилактид (PLA).

Таблица 2 – Характеристики 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

Для получения PLA-графеновых нанокомпозитов в качестве наполнителя использовали графен. Поскольку порошкообразный графен склонен к агрегации и плохо диспергируется в полимерной матрице, его предварительно стабилизировали в виде водной дисперсии с помощью резольной фенолформальдегидной смолы Фенотам GR-326 (АО «Пигмент», Россия). Такая модификация обеспечила высокую устойчивость и однородность распределения нанопластин в растворе.

Смешение дисперсии графена с расплавленным PLA проводили методом ультразвуковой эксфолиации при следующих параметрах: мощность – 2 кВт, частота – 22 кГц, интенсивность УЗ-воздействия – $50 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$. Процесс длился 2 часа с непрерывным охлаждением реакционной массы проточной водой для предотвращения термического разложения полимера.

После обработки композит осаждали, промывали водой и сушили в вакуумном шкафу при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 минут.

Были получены три состава:

- контрольный образец – чистый PLA (0 % графена);
- образец А – PLA + 10 масс. % графена;
- образец В – PLA + 20 масс. % графена.

Для стандартизации испытаний все материалы экструдировали в филаменты диаметром 1,75 мм и длиной 70 мм с использованием экструдера.

Механические испытания на растяжение проводили при температуре 19 °С, влажности 60 % и скорости деформации 2 мм/мин.

Термостойкость оценивали методом термогравиметрического анализа (ТГА). Образцы массой 200 мг нагревали на воздухе от 293 К до 873 К со скоростью 10 °С/мин в керамических тиглях.

В исследовании были использованы три типа образцов: чистый полилактид (PLA) без наполнителя, а также композиты с добавлением графена в концентрациях 0,1 масс. % и 0,2 масс. %. Основной оценкой механических свойств полученных материалов служил предел прочности при растяжении, результаты которого представлены на *рисунке 2*.

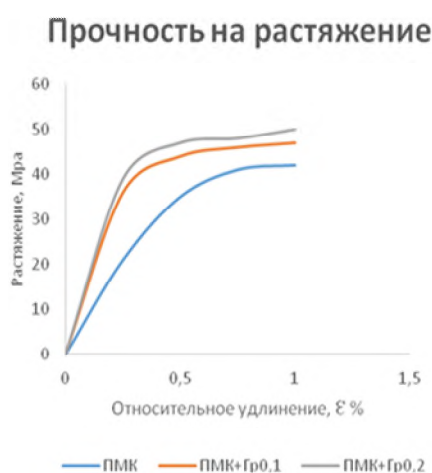


Рисунок 2 – Прочность на растяжение композитов на основе PLA

Анализ данных показал, что введение даже незначительного количества графена оказывает заметное влияние на прочностные характеристики PLA. Образец с содержанием 0,1 % графена продемонстрировал повышение прочности по сравнению с контрольным PLA, что свидетельствует о хорошей совместимости наполнителя с полимерной матрицей и эффективной передаче нагрузки на наночастицы. При увеличении концентрации до 0,2 % наблюдался дальнейший рост прочности, однако темп упрочнения замедлился, а в некоторых случаях отмечалась повышенная хрупкость образцов, вероятно, вследствие частичной агрегации графеновых пластинок и нарушения однородности структуры.

Таким образом, можно заключить, что низкие концентрации графена (до 0,2 %) позволяют целенаправленно модифицировать механические свойства PLA, однако превышение оптимального содержания может привести к снижению качества дисперсии и ухудшению эксплуатационных характеристик композита. Полученные результаты подтверждают перспективность использования графена в качестве высокоэффективного наномодификатора.

Как видно из представленных данных, нанокompозиты с добавлением графенового наполнителя (0,1 и 0,2 %) демонстрируют заметное увеличение как предела прочности при растяжении, так и модуля упругости по сравнению с чистым полилактидом (обозначен синей линией). Наблюдается чёткая тенденция к росту прочностных характеристик с увеличением концентрации нанокompозита.

Одновременно с этим отмечается снижение относительного удлинения при разрыве, что указывает на повышение жёсткости и хрупкости материала при введении графеновых наноструктур. Такое поведение типично для армированных полимерных систем, где усиление механических свойств достигается за счёт некоторого уменьшения пластичности.

Таким образом, полученные в ходе исследования нанокompозиты характеризуются улучшенной прочностью и жёсткостью, что делает их перспективными для применения в областях, где требуются повышенные механические характеристики при сохранении биосовместимости и экологичности исходного PLA.

Анализ термогравиметрических кривых (рисунок 3) показал, что введение графена в матрицу полилактида (PLA) положительно влияет на его термическую стабильность. Основной этап термодеструкции как чистого PLA, так и его композитов начинается при температурах выше 300 °С, что соответствует разложению полимерной цепи вследствие разрыва эфирных связей.

При этом нанокompозит с содержанием 0,2 % графена (PLA/Gr-0,2) демонстрирует повышение температуры начала разложения примерно на 5 °С по сравнению с исходным полимером. Это указывает на способность графеновых нанопластин замедлять деградацию PLA, вероятно, за счёт формирования физического барьера, ограничивающего диффузию летучих продуктов разложения.

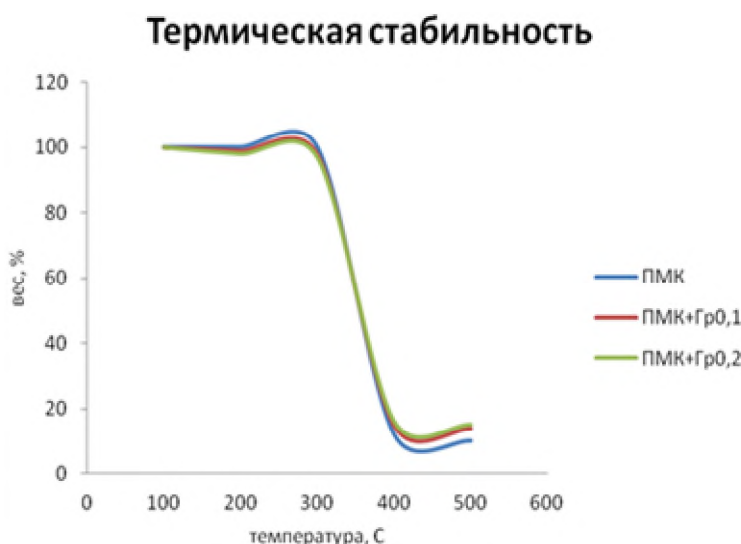


Рисунок 3 – Термическая стабильность PLA и его нанокompозитов

Таким образом, даже минимальные добавки графена позволяют достоверно улучшить термостойкость PLA, что подтверждает его потенциал в качестве функционального нанонаполнителя для термически нагружаемых биополимерных материалов [8].

Результаты исследования подтверждают, что введение графеновых наночастиц в полилактид (PLA) в количестве 0,1–0,2 масс. % приводит к достоверному улучшению его механических и термических характеристик. Установлено повышение прочности при растяжении, увеличение модуля упругости и рост температуры начала термодеструкции на ~5 °С, что свидетельствует об усилении и термостабилизации полимерной матрицы.

Одновременно наблюдается снижение пластичности композита, что типично для армированных систем и требует баланса между жёсткостью и ударной вязкостью при проектировании материала под конкретные задачи.

Полученные данные демонстрируют высокий потенциал графена как функционального наномодификатора для биополимеров. Вместе с тем, для перехода от лабораторных образцов к промышленному применению необходимы дальнейшие работы по оптимизации состава, улучшению дисперсности наполнителя и оценке технологичности переработки композитов.

Таким образом, разработка PLA-графеновых нанокompозитов открывает реальные перспективы для создания экологически безопасных материалов с расширенным функционалом, в том числе для аддитивных технологий, биомедицины и упаковки, где важны одновременно прочность, термостойкость и биосовместимость.

Библиография

1. Чичварин А.В., Игуменова Т.И. Явление стабилизации теплового старения связующих на основе товарного полибутадиена смесью фуллеренов группы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 142–144.
2. Jem K.J., Jem K.J., Van der Pol J.F., De Vos S., Chen G.G.-Q. Microbial Lactic Acid. Its Polymer Poly(lactic acid) and their industrial Applications, *Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 323–346.
3. Garlotta D.A. Literature review of poly(lactic acid) // J. Polym. Environ. 2011. V. 19, N 2. P. 63–84.
4. Ghafar T., Irshad M., Anwar Z., Aqil T., Zulifqar Z., Tarig A., Kamran M., Ehsan N., Mehmood S. Recent trends in lactic acid biotechnology: A brief review on production to purification // J. Radiat. Res. Appl. Sci. 2014. V. 7, N 2. P. 222–229.
5. 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).
6. Ave´ros L., Belgacem M.N., Gandini A. Polylactic acid: synthesis, properties and applications // In: Book: Monomers, polymers, and composites from renewable resources. Amsterdam: Elsevier Science, 2008. Chapter 21. P. 433–450.
7. Роговина С.З., Кузнецова О.П., Гасымов М.М., Ломакин С.М., Шевченко В.Г., Берлин А.А. Композиции полилактида с углеродными нанонаполнителями: получение, структура, свойства // Высокомолекулярные соединения Б. 2024. Т. 66, № 2. С. 140–155.
8. Коваленко Р.В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 1. С. 263–266.