

УДК 544.02;544.03

ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА СМЕСИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И ПОЛИБУТИЛЕНАДИПИНАТТЕРЕФТАЛАТА

© 2024 г. Л. Д. Селезнева^{1, 2*}, М. В. Подзорова^{1, 2}, Ю. В. Тертышная^{1, 2},
Р. Р. Романов², А. А. Попов^{1, 2}

¹Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

*E-mail: seleznyova.ludmila@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023;
после доработки 14.06.2023;
принята в печать 20.06.2023

В работе изучали воздействие воды на композиции полилактида и полибутиленадипинаттерефталата, смешение которых проводили в расплаве с последующим прессованием. Приготовлены смеси, в которых содержание полибутиленадипинаттерефталата составило 10, 20 и 30 мас. %. Исследовано влияние воздействия дистиллированной воды на пленочные образцы смесей при температуре $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 270 сут. После воздействия обнаружены визуальные изменения: помутнение образцов и появление дефектов. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определены теплофизические характеристики до и после гидролитической деградации. Показано снижение температуры холодной кристаллизации в чистом полилактиде и в образце с малым содержанием полибутиленадипинаттерефталата (10%), а также исчезновение пика холодной кристаллизации при содержании полибутиленадипинаттерефталата 20 и 30 мас. %. Степень кристалличности полилактида после воздействия воды имеет тенденцию к увеличению от 0 до 16%. Изменение химической структуры смесевых образцов контролировали методом ИК-спектроскопии.

Ключевые слова: смеси полимеров, полилактид, полибутиленадипинаттерефталат, степень кристалличности, гидролитическая деструкция, ИК-спектры.

DOI: 10.31857/S0207401X24030116 EDN: VFPQFC

ВВЕДЕНИЕ

Одним из процессов разрушения полимеров является гидролитическая деструкция, которая вызывается водой. Водная среда может оказывать значительное воздействие на полимерные материалы [1]. Во время этого типа деструкции молекулы воды диффундируют в полимер и протекает гидролиз сложноэфирных связей [2, 3]. В процессе гидролитической деструкции меняется химический состав, структура и, как следствие, механические, теплофизические и другие свойства материалов.

Важные факторы, влияющие на гидролиз, — это степень кристалличности, молекулярная масса, наличие пластификаторов, стабилизирующих агентов, компатибилизаторов и нанодисперсных наполнителей, а также особые свойства образца, такие как шероховатость поверхности, толщина и

пористость. Температура и pH среды являются наиболее важными внешними факторами [4].

Полилактид (ПЛА) и полибутиленадипинаттерефталат (ПБАТ) заявлены производителями как биоразлагаемые материалы. Поскольку предполагается их самопроизвольное разложение в почве после, как правило, краткосрочного использования, выбраны условия, близкие к стандартным: атмосферное давление и температура $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$. Биоразложение в почве — комплексный процесс. Вода является одним из факторов воздействия на материал. Поэтому цель данного исследования — оценка действия воды как фактора окружающей среды на ПЛА, ПБАТ и их смеси.

Говоря про материалы на основе полилактида, стоит отметить, что несмотря на свою гидрофобность, этот полимер подвержен гидролизу. В работе [5] исследовали гидролитическую деградацию

смесей полилактид—поликапролактон (ПЛА:ПКЛ) в буферном растворе при pH 4, 7, 10 в течение 50 дней. Максимальная скорость потери массы наблюдалась при pH 10 для обоих полимеров и их смесей.

Не менее важным фактором гидролиза ПЛА является температура. Сначала гидролитическое расщепление сложноэфирных связей протекает в аморфных областях. Деструкция начинается с поверхности и переходит в объем полимера [6]. Гидролитическую деструкцию композитов на основе ПЛА и глины с содержанием последней 5, 10, 15% проводили в течение 6 недель при $T=25$, 37 и 80°C [7]. Необходимо отметить, что композиты представляют собой гетерогенные системы, в которых всегда имеется граница раздела или межфазный слой [8]. Межфазный слой и приграничные области характеризуются пониженной плотностью по сравнению с составляющими фазами. Материалы с такой структурой более активно подвергаются воздействию агрессивных сред, поэтому композиты больше подвержены разрушению, чем чистые полимеры [9].

Скорость биodeградации и гидролиза как неотъемлемых частей биодеструкции ПБАТ измеряли в фосфатном буферном растворе (pH 8.0) при 58°C. Для имитации гидролиза в процессе компостирования был также добавлен вермикулит ввиду схожей с компостом текстуры и способности удерживать влагу. Сложноэфирная группа в алифатическом звене бутиленадипината более восприимчива к гидролизу, чем в бутилентерефталате [10].

Исследование композиций ПЛА : ПБАТ важно с точки зрения перспективности использования таких материалов. Композиты ПЛА : ПБАТ обладают улучшенными механическими характеристиками и способностью к биоразрушению по сравнению с чистым ПЛА [11, 12]. Наличие границы раздела фаз влияет на структуру и свойства полимерных смесей. Так, авторы [13] в своем обзоре исследовали смеси ПЛА:ПБАТ и пришли к выводу, что они проявляют многофазное поведение из-за несовместимости характеристик каждого компонента. Показано, что высокая разница в значениях параметрах растворимости между ПЛА и ПБАТ указывает на несовместимость этой пары полимеров [14–16]. Признаки межфазного расслоения в смесях, наблюдаемые авторами методом сканирующей электронной микроскопии

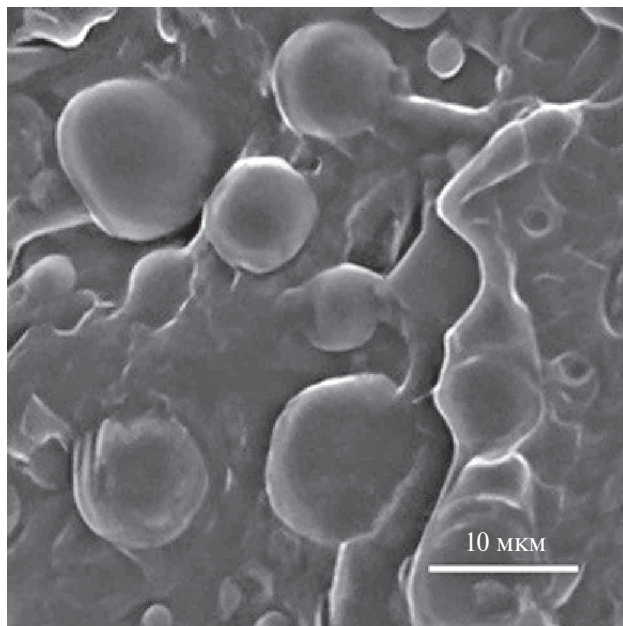


Рис. 1. Полученная методом СЭМ фотография образца пленки ПЛА90 : ПБАТ10 [16].

(СЭМ), указывали на слабую межфазную адгезию в смесях ПЛА : ПБАТ (рис. 1) [16]. В составах, близких к составам с инверсией фаз, как правило, образуется межфазный слой, который влияет на поведение образцов при воздействии агрессивных факторов окружающей среды.

В процессе гидролиза ПБАТ происходит разрыв цепи, что приводит к охрупчиванию материала, т.е. материал меняет свои пластичные свойства на хрупкие при старении [17–19]. Процесс гидролитической деструкции ПЛА происходит в несколько стадий [20]: 1) диффузия воды в материал; 2) гидролиз цепей в аморфной фазе; 3) снижение молекулярной массы за счет гидролитического расщепления сложноэфирных связей и образования водорастворимых соединений; 4) гидролиз кристаллической фазы, который может происходить с помощью автокаталитического механизма при увеличении кислотности среды.

В данной работе исследован процесс воздействия водной среды на смеси ПЛА : ПБАТ при температуре $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 270 сут. Изменение морфологии было изучено оптическим методом, а изменение структурных характеристик зафиксировано с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и ИК-спектроскопии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве образцов использовали пленочные материалы на основе полилактида марки 2003D производства компании Nature Works, (USA) и полибутиленадипинаттерефталата марки TH801T (Shanghai Hengsi New Material Science, China). Полимеры смешивали при температуре 175°C в смесительной камере компании Brabender (Germany) в течение 10 мин. Затем смеси измельчали на роторно-ножевой мельнице (Вибротехника, Россия).

Пленочные образцы были получены на лабораторном прессе ОПА (Биолент, Россия) при температуре прессования (170 ± 5)°C. Время прессования составляло 1 мин при давлении 50 МПа. Пленки охлаждали в воде при температуре (15 ± 2)°C. Толщина полученных пленок находилась в пределах 300–350 мкм.

Для определения теплофизических характеристик полученных смесей использовался калориметр DSC 214 Polyma производства компании NETZSCH (Germany). Основной температурный диапазон – 20–200°C, скорость сканирования – 10°C/мин. Навеска образца составляла (10 ± 0.3) мг.

Величину степени кристалличности ($\chi_{кр}$) рассчитывали по формуле

$$\chi_{кр} (\%) = \left[(\Delta H_{пл} - \Delta H_{хк}) / (x \Delta H_{пл}^*) \right] \cdot 100,$$

где $\Delta H_{пл}$ – теплота плавления согласно ДСК-кривой, $\Delta H_{хк}$ – энтальпия холодной кристаллизации, $\Delta H_{пл}^* = 93.1$ Дж/г – теплота плавления идеального кристаллита [16], x – доля ПЛА.

Кинетику поглощения дистиллированной воды исследовали в течение 240 ч до достижения материалами равновесия. Испытание проводили в соответствии с ГОСТ 4650-2014. Анализ гидролитической деструкции проводили после 270 дней нахождения образцов в дистиллированной воде.

После достижения равновесного количества воды в образце его вынимали из воды, просушивали фильтровальной бумагой и не более чем через 1 мин взвешивали на электронных аналитических весах марки ATL-220d4-I производства компании Acculab (Germany).

Степень водопоглощения (α_v) рассчитывали по формуле

$$\alpha_v = [(m_2 - m_1) / m_1] \cdot 100\%,$$

где m_1 – исходная масса образца, m_2 – масса образца после воздействия воды.

Метод инфракрасной спектроскопии используют для химического анализа состава смесей. С его помощью можно идентифицировать состав смеси, а также зафиксировать изменения в составе после воздействия влаги, кислорода, ультрафиолета, экспонирования в почве.

Эксперимент проводили на ИК-фурье-спектрометре Lumos производства компании Bruker (Germany). Спектры снимали при температуре (22 ± 2)°C в диапазоне длин волн $4000 \leq \lambda \leq 600$ см⁻¹ методом нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО).

Морфологию материалов исследовали с помощью оптического микроскопа BX 3 MPS LED производства компании Olympus (Japan) с разрешением 200× в отраженном свете.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При изучении смесей ПЛА : ПБАТ установлено, что водная среда способствует разрушению материала. Из рис. 2 видно, что есть визуальные изменения. Это отмечается и на микрофотографиях: образуются дефекты, темные пятна (рис. 3). Процесс деструкции полимеров начинается с поверхности. Когда в структуре поверхностных слоев образуются значительные повреждения, дефекты проникают в основную массу материала и дальше продолжают реакции разрыва молекулярных цепей в полимерной матрице [21, 22].

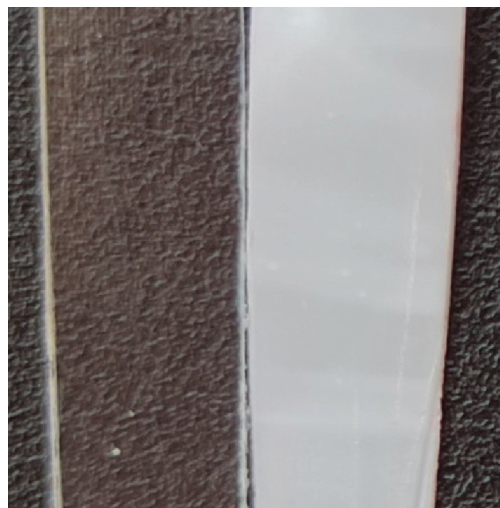


Рис. 2. Фотография исходного ПЛА и после его выдержки в воде в течение 270 дней.

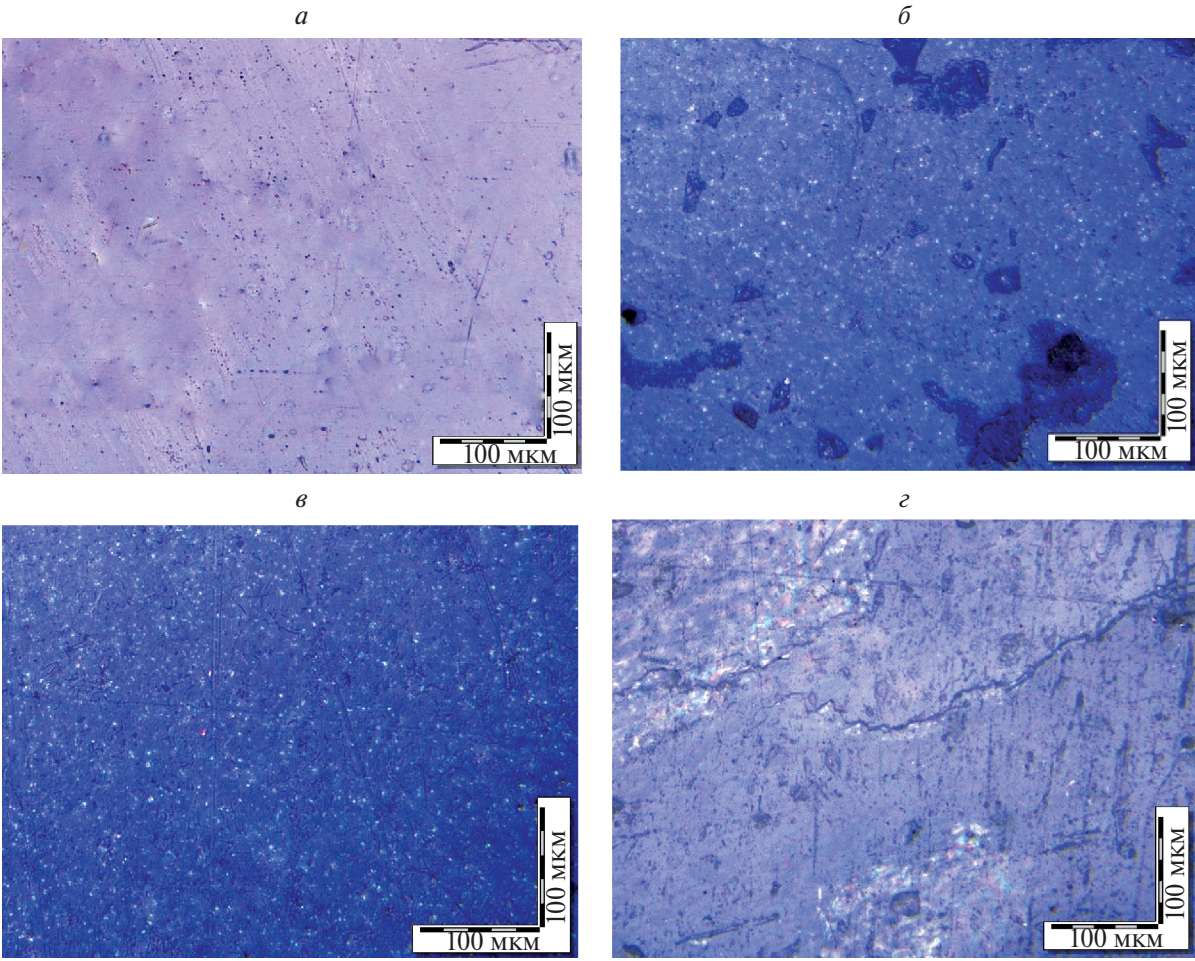


Рис. 3. Микрофотографии исходного ПЛА и состава ПЛА80 : ПБАТ20 до (а, в) и после 270 дней гидролиза (б, г).

Таблица 1. Теплофизические характеристики смесей ПЛА : ПБАТ до и после действия воды в течение 270 сут

Состав смеси, мас. %	$T_{ст}, ^\circ\text{C}$ ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)	$T_{х.к.}, ^\circ\text{C}$ ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$ ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)	$\chi_{кр*},$ ($\pm 1\%$)
Исходные				
ПЛА	52	99	144	0
ПЛА90 : ПБАТ10	53	105	146	10.77
ПЛА80 : ПБАТ20	58	95	147	24.79
ПЛА70 : ПБАТ30	56	109	145	8.79
После воздействия воды в течение 270 сут				
ПЛА	—	89	148	16.32
ПЛА90 : ПБАТ10	63	95	151	22.72
ПЛА80 : ПБАТ20	62	—	149	25.79
ПЛА70 : ПБАТ30	66	—	149	20.95

Теплофизические характеристики исходных образцов и после гидролитической деградации были изучены методом ДСК (табл. 1). В исходных композициях температура стеклования ($T_{ст}$) и плавления ($T_{пл}$) ПЛА при добавлении ПБАТ практически не изменяется. При добавлении ПБАТ

в ПЛА до 30 мас. % пик, характеризующий температуру стеклования, становится более ярко выраженным по сравнению с пиком, соответствующим чистому ПЛА. На само значение температуры стеклования $T_{ст} = (55 \pm 3)^\circ\text{C}$ введение ПБАТ практически не влияет. Температура холодной

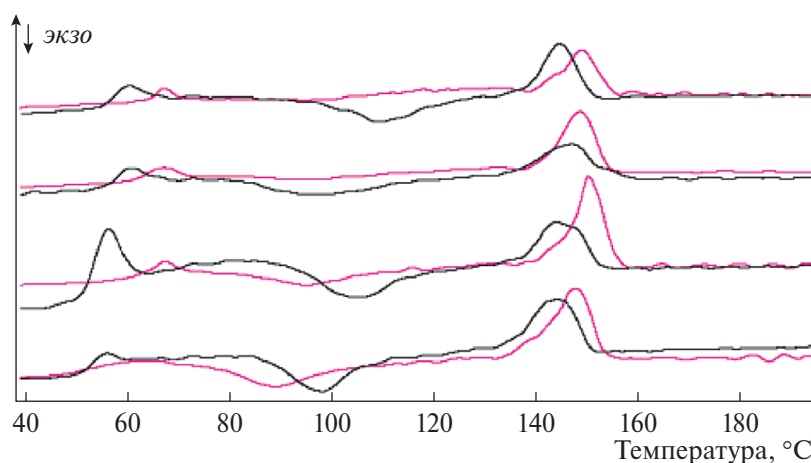


Рис. 4. Термограммы ДСК образцов чистого ПЛА и составов ПЛА90 : ПБАТ10, ПЛА80 : ПБАТ20, ПЛА70 : ПБАТ30 (снизу вверх) до (черные линии) и после их выдержки в воде (пурпурные линии) в течение 270 дней.

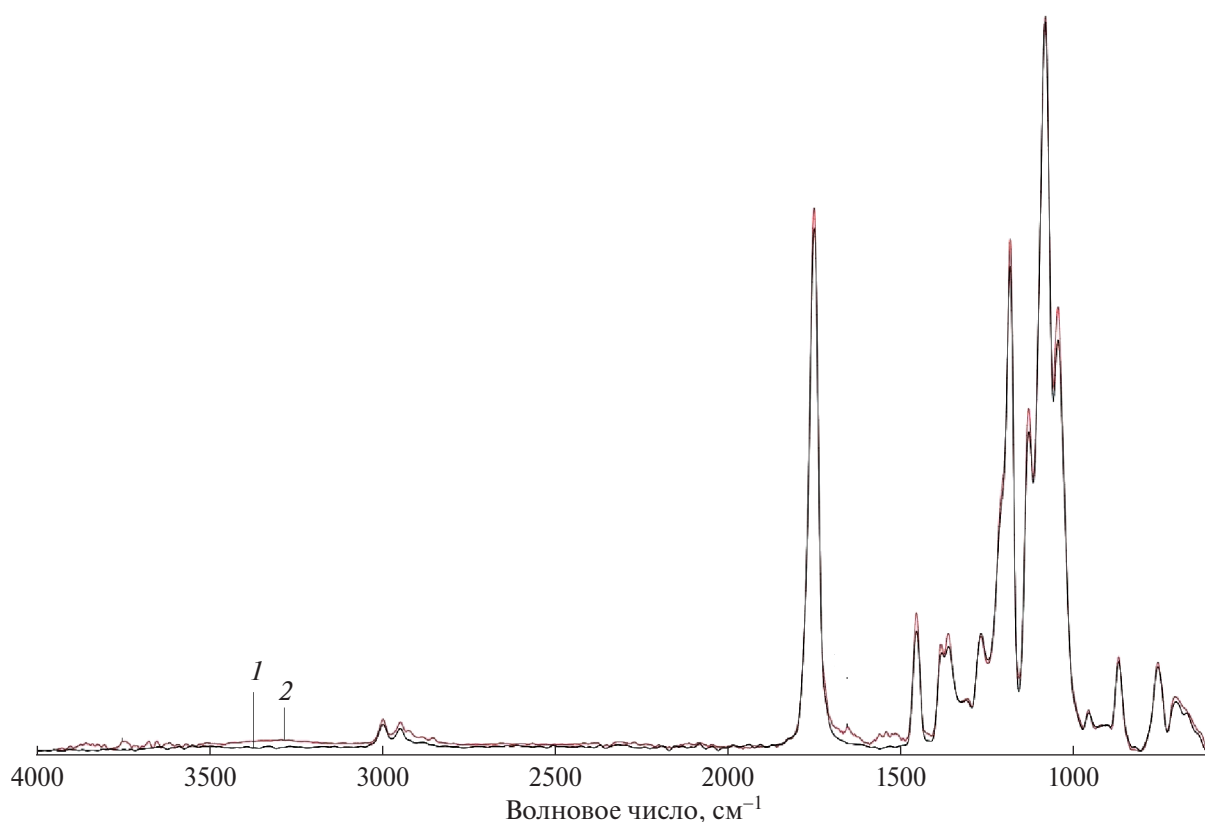


Рис. 5. ИК-спектры (МНПВО) исходного ПЛА (1) и после его выдержки в воде в течение 270 дней (2).

кристаллизации с добавлением ПБАТ смещается в сторону больших температур: с 98 до 112°C. На значение температуры плавления полилактида $T_{пл}$ ПЛА $\approx 145^\circ\text{C}$ введение ПБАТ практически не влияет.

После воздействия водной среды в течение 270 дней величины теплофизических характеристик меняются (рис. 4). Температура стеклования смещается в сторону больших температур: с (55 ± 3) до

$(64 \pm 2)^\circ\text{C}$. Холодная кристаллизация ПЛА и смеси состава ПЛА90 : ПБАТ10 смещается в сторону меньших температур, с 92.2 до 89.0°C и с 104.9 до 95.2°C соответственно, и становится менее выраженной, а в смесях состава ПЛА80 : ПБАТ20 и ПЛА70 : ПБАТ30 полностью отсутствует, что может свидетельствовать о релаксации и докристаллизации ПЛА ниже температуры стеклования во время выдержки образцов в воде.

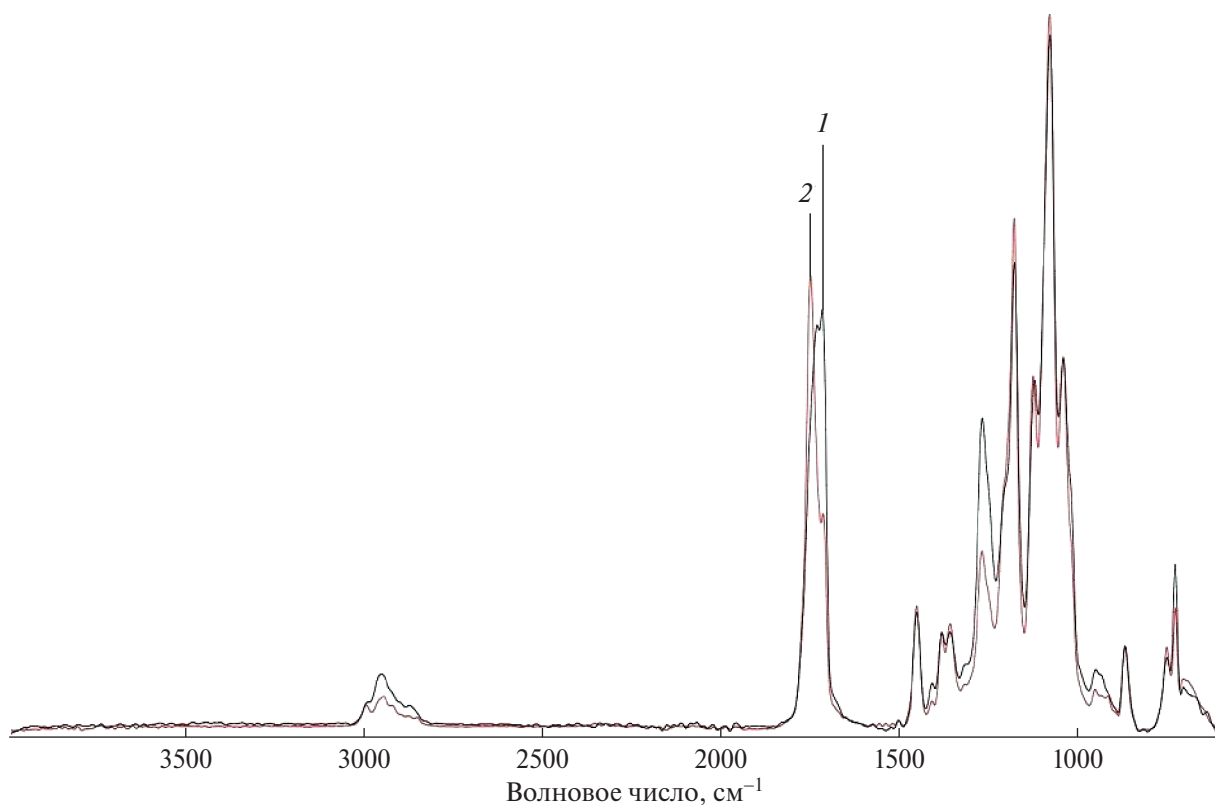


Рис. 6. ИК-спектры (МНПВО) образца состава ПЛА80 : ПБАТ20 — исходного (1) и после его выдержки в воде (2) в течение 270 дней.

Для всех составов наблюдается смещение плавления в сторону больших температур на 3–5°C (табл. 1), что связано с совершенствованием кристаллической структуры. Степень кристалличности после выдержки в воде увеличивается на 12–16% для ПЛА и составов ПЛА90 : ПБАТ10, ПЛА70 : ПБАТ30. Данный эффект может быть результатом частичной деструкции макроцепей в аморфной фазе ПЛА с дальнейшим вымыванием низкомолекулярных фрагментов. Лишь для состава ПЛА80 : ПБАТ20 не наблюдалось изменение кристаллической структуры, что представляет интерес и будет предметом дальнейших исследований.

Изменение химической структуры смесевых композиций ПЛА : ПБАТ после воздействия воды исследовалось методом ИК-спектроскопии. Существенных изменений в спектрах ПЛА и состава ПЛА90 : ПБАТ10 не произошло. На ИК-спектрах смесей ПЛА80 : ПБАТ20 и ПЛА60 : ПБАТ40 заметны изменения интенсивностей характеристических полос ПЛА и ПБАТ, а также появление пиков, характерных для гидролитического распада полимеров (рис. 5–7).

На ИК-спектрах наблюдается смещение интенсивной полосы при 1740 см⁻¹ до 1760 см⁻¹. С одной стороны, это, видимо, связано с гидролизом в основном алифатической сложноэфирной связи между остатком бутандиола и адипиновой кислоты (1740 см⁻¹), а с другой — появлением свободной гидроксильной алифатической карбоксильной группы (1760 см⁻¹). Что касается полосы поглощения, соответствующей ароматическому сложному эфиру (1720 см⁻¹), то ее наличие обнаруживается и после выдержки в воде в виде плеча при той же частоте. На качественном уровне полученный результат указывает на преимущественный гидролиз алифатического эфира с образованием концевой карбоксильной группы адипинового фрагмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования влияния дистиллированной воды на смесевые композиции ПЛА : ПБАТ различных составов при $T = (22 \pm 2)^\circ\text{C}$ было показано, что изменяются теплофизические характеристики образцов и их химическая структура. После гидролитической деградации в течение

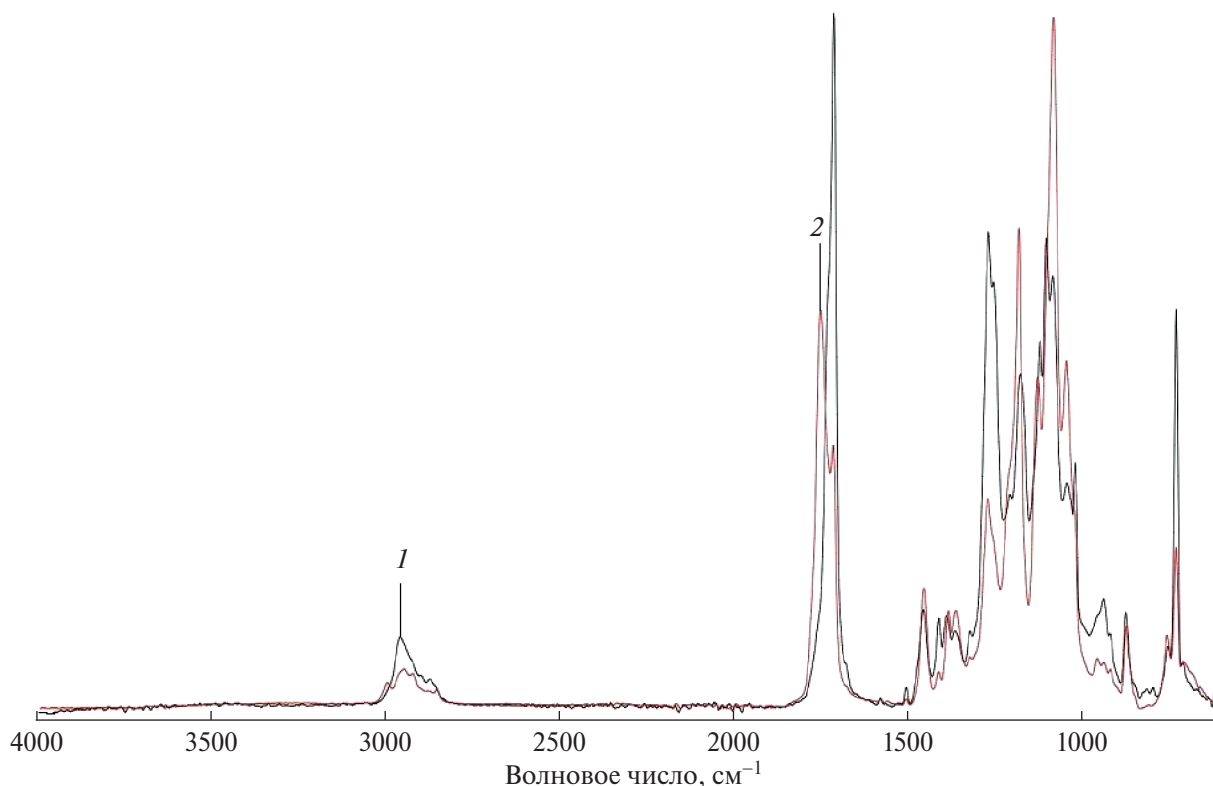


Рис. 7. ИК-спектры (МНПВО) образца состава ПЛА60:ПБАТ40 — исходного (1) и после его выдержки в воде (2) в течение 270 дней.

ние 270 суток на ДСК-кривых образцов с содержанием ПБАТ 20 и 30 мас. % исчезает пик холодной кристаллизации полилактида, при этом возрастает степень кристалличности ПЛА. Визуально наблюдается характерное изменение образцов в результате выдержки в воде.

Методом ИК (МНПВО) продемонстрированы изменения химической структуры исследуемых образцов. Показано, что пик, соответствующий карбонильным группам, сместился в сторону пика карбоксильных групп, что, по-видимому, отражает протекание гидролиза.

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования РЭУ им. Г.В. Плеханова, а также Центру коллективного пользования “Новые материалы и технологии” (ЦКП ИБХФ РАН) за предоставленное оборудование. Работа выполнена при финансовой поддержке РЭУ им. Г.В. Плеханова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тертышная Ю.В., Подзорова М.В. // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 5. С. 638
<https://doi.org/10.31857/S0044461821050121>
2. Zhou Q., Xanthos M. // Polym. Eng. Sci. 2010. V. 50. №2. P. 320e330; <https://doi.org/10.1002/pen.21520>
3. Тертышная Ю.В., Подзорова М.В., Храмова А.В. // Хим. физика. 2023. Т. 42. №1. С. 35; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23010090>
4. Olewnik-Kruszkowska E. // Polym. Degrad. Stab. 2016. V. 129. P. 87; <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.009>
5. Scaffaro R., Lopresti F., Botta L. // Eur. Polym. J. 2017. V. 96. P. 266; <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.09.016>
6. Elsayya M.A., Kimc K.-H., Parkc J.-W., Deepb A. // Renew.Sust. Energ. Rev. 2017. Vol. 79. P. 1346; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.143>
7. Rapacz-Kmita A., Stodolak-Zych E., Szaraniec B., Gajek M., Dudek P. // Mater. Lett. 2015. V. 146. P. 73; <https://doi.org/10.1515/adms-2016-0002>
8. Karpova S.G., Tertyshnaya Y.V., Podzorova M.V., Popov A.A. // Polym Sci Ser A. 2021. V. 63. P. 515; <https://doi.org/10.31857/S2308112021050060>
9. Варьян И.А., Колесникова Н.Н., Попов А.А. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 12. С. 42; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21120153>
10. Kijchavengkul T., Auras R., Rubino M. et al. // Polym. Degrad. Stab. 2010. V. 95. P. 2641; <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.07.018>

11. Zhang M., Jia H., Weng Y., Lia C. // *Int. Biodeterior Biodegradation*. 2019. V. 145. P. 104817; <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104817>
12. Nofar M., Heuzey M.C., Carreau P.J., Kamal M.R., Randall J. // *J. Rheol.* 2016. V. 60. P. 637; <https://doi.org/10.1122/1.4953446>
13. Jian J., Xiangbin Z., Xianbo H. // *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2020. V. 3. № 1. P. 19; <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>
14. Meaurio E., Zuza E., Sarasua J.R. // *Macromolecules* 2005. V. 38. № 22. P. 9221; <https://doi.org/10.1021/ma051591m>
15. Kumara P.H.S., Nagasawa N., Yagi T., Tamada M. // *J. Appl. Polym. Sci.* 2008. V. 109. № 5. P. 3321; <https://doi.org/10.1002/app.28402>
16. Zhao X., Hu H., Wang X. et al. // *RSC Adv.* 2020. V. 10. № 22. P. 13316; <https://doi.org/10.1039/D0RA01801E>
17. Boudaoud N., Benali S., Mincheva R. et al. // *Polym Int.* 2018. V. 67. № 10. P. 1393; <https://doi.org/10.1002/pi.5659>
18. Hocker S.J., Kim W.T., Schniepp H.C., Kranbuehl D.E. // *Polymer*. 2018. V. 158. P. 72; <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.031>
19. Bardin A., Gac P.Y. Le, Cérantola S. et al. // *Polym. Degrad. Stab.* 2020. V. 171. P. 109002; <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.109002>
20. Gorassi G., Pantani R. // *Adv. Polym. Sci.* 2016. P. 119; https://doi.org/10.1007/12_2016_12
21. Tertyshnaya Y.V., Podzorova M.V., Varyan I.A. et al. // *Polymers* 2023. V. 15. P. 1029; <https://doi.org/10.3390/polym15041029>
22. Kale B.G., Auras R., Singh S.P. // *Packag. Technol. Sci.* 2007. V. 20. P. 49; <https://doi.org/10.1002/pts.742>

THE IMPACT OF WATER ON POLYLACTIDE – POLYBUTYLENE ADIPINATE TEREPHTHALATE BLENDS

L. D. Selezneva^{1,2}, M. V. Podzorova^{1,2*}, Y. V. Tertyshnaya^{1,2},
A. A. Popov^{1,2}, R. R. Romanov²

¹Emanuel Institute of biochemical physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

* E-mail: mariapdz@mail.ru

Mixing in the melt followed by pressing, blends of polylactide – polybutylene adipate terephthalate of various compositions were obtained. The content of polybutylene adipate terephthalate in blends was 10, 20 and 30 wt.%. The effect of water on film samples at a temperature of $22 \pm 2^\circ\text{C}$ for 270 days was studied. After exposure to water, a change in morphology was detected: turbidity of the samples and the appearance of defects. The thermophysical characteristics before and after hydrolytic degradation were determined by differential scanning calorimetry. A decrease in the cold crystallization temperature in pure polylactide and with a low content of polybutylene adipate terephthalate, and the disappearance of the cold crystallization peak at a content of 20 and 30 wt.% of polybutylene adipate terephthalate were shown. The degree of crystallinity of polylactide after exposure to water tended to increase. Changes in the chemical structure of mixed samples were monitored by IR spectroscopy.

Keywords: polymer blends, polylactide, polybutylene adipate terephthalate, hydrolytic degradation, degree of crystallinity, IR spectra.

REFERENCES

1. Tertyshnaya Y.V., Podzorova M.V. // 2021. V. 94(5). P. 639–646;
<https://doi.org/10.1134/S1070427221050128>
2. Zhou Q., Xanthos M. // Polym. Eng. Sci. 2010. V. 50. № 2. P. 320e330; <https://doi.org/10.1002/pen.21520>
3. Tertyshnaya Y.V., Podzorova M.V., Khramkova A. // Russ. J. Phys. Chem B. 2023. V. 17(1). P. 163–170; <https://doi.org/10.1134/S1990793123010098>
4. Olewnik-Kruszkowska E. // Polym. Degrad. Stab. 2016. V. 129. P. 87; <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.009>
5. Scaffaro R., Lopresti F., Botta L. // Eur. Polym. J. 2017. Vol. 96. P. 266; <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.09.016>
6. Elsayya M.A., Kim K.-H., Park J.-W., Deepb A. // Renew.Sust. Energ. Rev. 2017. V. 79. P. 1346; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.143>
7. Rapacz-Kmita A., Stodolak-Zych E., Szaraniec B., Gajek M., Dudek P. // Mater. Lett. 2015. V. 146. P. 73; <https://doi.org/10.1515/adms-2016-0002>
8. Karpova S.G., Tertyshnaya Y.V., Podzorova M.V., Popov A.A. // Polym Sci Ser A. 2021. V. 63. P. 515;
9. Varyan I.A., Kolesnikova N.N., Popov A.A. // Russ. J. Phys. Chem B. 2021. V. 15(6). P. 1041–1045; <https://doi.org/10.1134/S1990793121060257>
10. Kij chavengkul T., Auras R., Rubino M. et al. // Polym. Degrad. Stab. 2010. V. 95. P. 2641; <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.07.018>
11. Zhang M., Jia H., Weng Y., Lia C. // Int. Biodeterior Biodegradation. 2019. V. 145. P. 104817; <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104817>
12. Nofar M., Heuzey M.C., Carreau P.J., Kamal M.R., Randall J. // J. Rheol. 2016. V. 60. P. 637; <https://doi.org/10.1122/1.4953446>
13. Jian J., Xiangbin Z., Xianbo H. // Adv. Ind. Eng. Polym. Res. 2020. V. 3. № 1. P. 19; <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.001>
14. Meaurio E., Zuza E., Sarasua J.R. // Macromolecules 2005. V. 38. № 22. P. 9221; <https://doi.org/10.1021/ma051591m>
15. Kumara P.H.S., Nagasawa N., Yagi T., Tamada M. // J. Appl. Polym. Sci. 2008. V. 109. № 5. P. 3321; <https://doi.org/10.1002/app.28402>
16. Zhao X., Hu H., Wang X. et al. // RSC Adv. 2020. V. 10. № 22. P. 13316; <https://doi.org/10.1039/D0RA01801E>
17. Boudaoud N., Benali S., Mincheva R. et al. // Polym Int. 2018. V. 67. № 10. P. 1393; <https://doi.org/10.1002/pi.5659>
18. Hocker S.J., Kim W.T., Schniepp H.C., Kranbuehl D.E. // Polymer. 2018. V. 158. P. 72; <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.031>
19. Bardin A., Gac P.Y. Le, Cérantola S. et al. // Polym. Degrad. Stab. 2020. V. 171. P. 109002; <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.109002>
20. Gorassi G., Pantani R. // Adv. Polym. Sci. 2016. P. 119; https://doi.org/10.1007/12_2016_12
21. Tertyshnaya Y.V., Podzorova M.V., Varyan I.A. et al. // Polymers 2023. V. 15. P. 1029; <https://doi.org/10.3390/polym15041029>
22. Kale B.G., Auras R., Singh S.P. // Packag. Technol. Sci. 2007. V. 20. P. 49; <https://doi.org/10.1002/pts.742>