

УДК 541.64:547.458.81

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОМПОЗИЦИИ ПОЛИЛАКТИДА С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ПЛАСТИНАМИ ГРАФИТА

© 2024 г. М. М. Гасымов¹, С. З. Роговина^{1*}, О. П. Кузнецова¹,
Е. О. Перепелицина², В. Г. Шевченко^{1,3}, С. М. Ломакин^{1,4}, А. А. Берлин¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

³Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова
Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: S.Rogovina@mail.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023;
после доработки 11.10.2023;
принята в печать 20.10.2023

Твердофазным способом под действием сдвиговых деформаций получены композиции полиэфира полилактида (ПЛА), синтезируемого из природного сырья, с наноразмерными пластинами графита (НПГ), представляющие собой новый тип композиционных материалов на основе биоразлагаемых полимеров. Проведена оценка пористости, исследованы электрические и механические свойства полученных композиций. С использованием метода эксклюзионной хроматографии изучено воздействие УФ-облучения на молекулярную массу и молекулярно-массовое распределение ПЛА в композициях ПЛА–НПГ различного состава, а также показано влияние содержания нанодисперсного наполнителя на изменение их механических характеристик в процессе облучения.

Ключевые слова: полилактид, наноразмерные пластины графита, УФ-облучение, эксклюзионная хроматография, электрические и механические свойства.

DOI: 10.31857/S0207401X24030121 EDN: VFNIAA

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиции, содержащие в качестве наполнителей различные наноразмерные производные углерода, в частности, двумерные слоистые наноразмерные пластины графита (НПГ), привлекают в настоящее время внимание большого числа исследователей, поскольку композиты, полученные с их использованием, обладают улучшенными прочностными и термическими характеристиками и представляют собой высоковольтостребованный тип современных материалов, предназначенных для широкого использования в различных областях [1, 2].

В то же время термопластичный биоразлагаемый полиэфир полилактид (ПЛА) является одним из наиболее перспективных, так называемых “зеленых” полимеров [3, 4]. Синтезируемый из молочной кислоты, образующейся при брожении

сельскохозяйственных отходов, ПЛА по своим механическим и термическим характеристикам близок к синтетическим полимерам [5], вследствие чего разработка полимерных композитов на его основе является перспективным направлением исследований, проводимых в области создания новых материалов, способных к биодеструкции.

Одним из возможных путей модификации ПЛА, приводящих к созданию полимерных материалов, обладающих широким спектром новых свойств, является получение композиций ПЛА с использованием в качестве нанодисперстных наполнителей различных графеновых производных. Структурные особенности и хорошие механические характеристики таких углеродных соединений позволяют применять их для производства на основе ПЛА разнообразных материалов, обла-

дающих необходимыми для конкретной области применения характеристиками [6, 7].

Ранее нами было проведено сравнительное изучение структуры и свойств композиций ПЛА с восстановленным оксидом графена (ВОГ), полученных жидкофазным и экологически чистым твердофазным методами [8], где было показано, что способ получения оказывает влияние на комплекс свойств и структуру образующихся композитов. В частности, было установлено, что композиции, полученные методом твердофазного смешения в условиях сдвиговых деформаций, обладают более высокими прочностными характеристиками, а их электрическая проводимость более чем на порядок превышает проводимость композитов, полученных в жидкой фазе. Наблюдаемое при этом резкое падение кристалличности ПЛА связано как с аморфизацией полимера под действием сдвиговых деформаций, так и со снижением сегментарной подвижности полимерных цепей в присутствии неагрегированных частиц наполнителя.

При этом для композиций ПЛА–НПП, синтезированных в жидкой фазе в хлороформе, наряду с увеличением кристалличности и термической стабильности было обнаружено образование микропористой структуры [9].

Известно, что в процессе эксплуатации на воздухе полимерные материалы подвергаются воздействию ультрафиолетового (УФ) облучения, приводящего к деструкции полимерных цепей и, как следствие, разрушению получаемых из них изделий [10]. В то же время введение различающихся по своей природе неорганических наполнителей может в различной степени влиять на этот процесс, устраняя, в частности, негативное воздействие излучения [11].

Для оценки влияния УФ-излучения на характеристики полимерных материалов обычно используют такие физико-химические методы анализа, как метод эксклюзионной хроматографии, позволяющий оценить изменение молекулярного веса и молекулярно-массовых характеристик полимеров, наряду со спектральными методами определения структуры образующихся при деструкции полимеров (ИК-спектроскопия, ЯМР) [12]. Поскольку деструкция полимеров обычно сопровождается падением прочности, то измерение механических параметров позволяет устано-

вить влияние излучения на области практического использования таких материалов.

Исследование устойчивости композиций ПЛА–НПП к воздействию УФ-излучения будет способствовать расширению возможных областей применения этого производного графена. В данной работе изучение влияния УФ-облучения на композиции ПЛА–НПП различного состава проводилось на основании данных ЭХ, а также путем измерения механических характеристик исходных и облученных образцов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе был использован полилактид марки PLA 4043D производства компании Nature Works, (USA) с $M_w = 1.3 \cdot 10^5$ г/моль, $T_{пл} = 155^\circ\text{C}$ и НПП производства компании XG Sciences (USA) с диаметром $d = 10$ нм, длиной $L = 5$ мкм, отношением $L/d = 500$, плотностью $\rho \leq 1.8$ г/см³.

Композиции ПЛА–НПП, содержащие от 0.05 до 5 мас. % наполнителя, были получены твердофазным способом под действием сдвиговых деформаций в смесителе закрытого типа Plastograph EC производства компании Brabender (Germany) при температуре 170°C и скорости вращения ротора 100 об/мин [13].

Для последующих исследований на лабораторном прессе Carver (USA) при температуре 170°C и давлении 10 МПа были отпрессованы пленки толщиной 0.3 мм.

Диэлектрические свойства композитов (диэлектрическая проницаемость, потери, электрический модуль и проводимость) изучали в диапазоне частот 10^{-1} – 10^6 Гц с помощью анализатора импеданса Alpha-A производства компании Novocontrol Technologies (Netherlands), оборудованного диэлектрической ячейкой ZGS Alpha Active Sample Cell с позолоченными дисковыми электродами диаметром 20 и 30 мм.

Исследование размеров пор проводили с помощью рентгеновской микротомографии, позволяющей изучать внутренний объем объекта без разрушения образца. Этот метод отличается оперативностью исследований наряду с высокой информативностью получаемых данных и минимизирующим влиянием человеческого фактора на результаты исследований [14].

Сканирование образцов выполняли на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172 произ-

водства компании Bruker microCT (Belgium). Время сканирования составляло 3 ч. В результате сканирования был получен набор теневых проекций образцов.

Морфометрический анализ и расчет пористости проводили с использованием программы STAN. В режиме бинарных изображений (изображений с двоичным отображением полутонов на дисплее) белый цвет соответствует областям с яркостью в пределах бинарного порогового значения – “твердый”, а областям за пределами этого диапазона соответствует черный цвет – “пустота”. Для корректного отображения пустот и областей с высокой плотностью был выбран оптимальный диапазон значений на гистограмме распределения яркости (25–255 градаций серого).

Механические испытания полученных композиций проводили на разрывной машине Instron-3365 (UK) в режиме одноосного растяжения при постоянной скорости перемещения верхней траверсы 5.0 мм/мин и комнатной температуре. Из диаграмм растяжения напряжение–удлинение (σ – ε) определяли модуль упругости (E), прочность при разрыве (σ_p) и удлинение при разрыве (ε_p). Результаты усредняли по шести-семи образцам, погрешность измерения составляла не более 10% [15].

Изучение влияния воздействия УФ-излучения на свойства пленок ПЛА и ПЛА–НПП различного состава проводили при длине волны 253.7 нм с использованием четырех ламп Philips TUV мощностью 11 Вт в течение различного времени [16]. Молекулярно-массовые характеристики образцов определяли методом эксклюзионной гель-проникающей хроматографии (ГПХ) на жидкостном хроматографе Waters (USA), снабженном рефрактометрическим и УФ-детекторами.

Элюент – тетрагидрофуран (ТГФ), скорость элюирования составляла 1 мл/мин, температура колонки – 35°C, температура рефрактометра – 45°C. Образцы полимеров растворяли в ТГФ, фильтровали раствор через PTFE фильтр Anator25 производства компании Whatman (UK) толщиной 0.2 мкм. При измерениях использовали две последовательно соединенные колонки PL-gel 5 мкм MIXED-C производства компании Agilent (USA). Среднюю молекулярную массу полимеров рассчитывали с помощью калибровочной кривой, полученной с использованием полистирольных

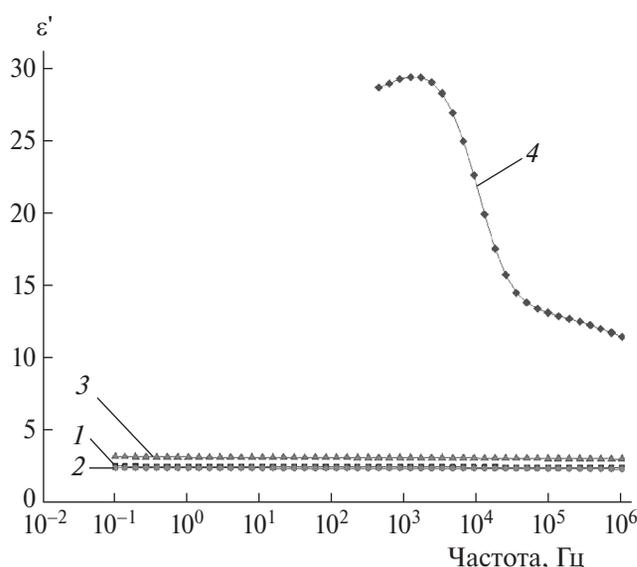


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости ε' композиций от частоты f при концентрациях НПП 0.1 (1), 0.25 (2), 1 (3) и 5 мас. % (4).

стандартов с ММ от 589 до $3.7 \cdot 10^6$ Да с программным обеспечением Empover [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отличительной особенностью композиционных материалов, содержащих нанодисперсные углеродные наполнители, является их способность проводить электрический ток. В этой связи в работе были исследованы диэлектрические свойства композитов ПЛА–НПП с концентрацией наполнителя 0.1, 0.25, 1 и 5 мас. %. На рис. 1 приведена зависимость диэлектрической проницаемости ε' от частоты. При малых концентрациях наполнителя (менее 1 мас. %) ε' не зависит от частоты и незначительно возрастает при увеличении степени наполнения. При концентрации наполнителя, равной 5 мас. %, ε' в значительной степени определяется межфазной поляризацией, обусловленной образованием микроконденсаторов между соседними частицами наполнителя, вследствие чего диэлектрическая проницаемость значительно возрастает и проявляется ее зависимость от частоты. Как видно из рис. 2, при концентрациях наполнителя < 1 мас. % зависимость проводимости от частоты линейна в логарифмических координатах, а при концентрации наполнителя, равной 5 мас. %, эта зависимость выходит на плато. Частотная зависимость проводимости имеет две компоненты: проводимость на постоянном σ_{dc} и переменном токе σ_{ac} . Горизонтальный участок на

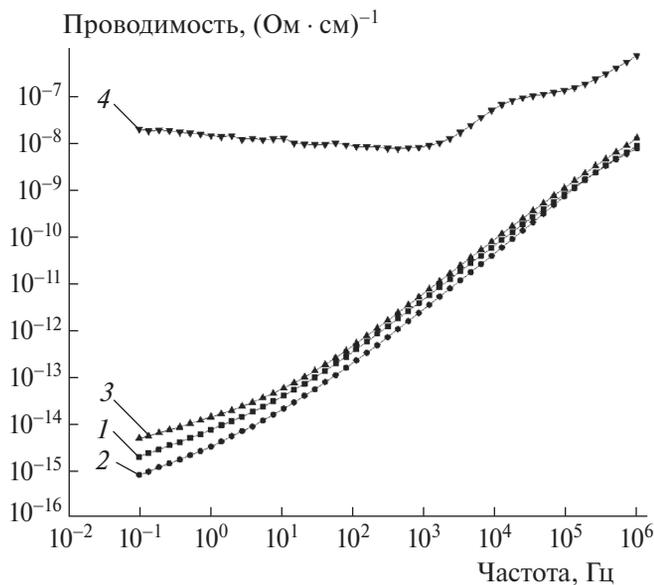


Рис. 2. Зависимость проводимости σ_{ac} композиций от частоты f при концентрациях НПГ 0.1 (1), 0.25 (2), 1 (3) и 5 мас. % (4).

кривой (dc -проводимость) указывает на то, что перенос зарядов осуществляется по бесконечному кластеру контактирующих частиц наполнителя, т.е. при данной концентрации порог перколяции превышен. Линейная зависимость от частоты (ас-проводимость) свидетельствует о прыжковой проводимости между изолированными частицами наполнителя, т.е. о концентрации ниже порога перколяции. В общем случае зависимость описывается следующим уравнением:

$$\sigma(f) = \sigma_{dc} + \sigma_{ac} = \sigma_{dc} + Af^s,$$

где f – частота, s – параметр, характеризующий особенности прыжковой проводимости [18]. Обращает на себя внимание наличие двух участков плато для образца с концентрацией наполнителя 5 мас. %, что может указывать на наличие двух режимов переноса зарядов в данной системе. Высоочастотное плато (24 700 Гц) соответствует переносу зарядов в сравнительно больших областях (агрегатах частиц наполнителя), а низкочастотное плато (435 Гц) отвечает образованию контактов между данными областями или агрегатами и перемещению зарядов в перколяционном кластере. Частота выхода на плато соответствует максимуму на частотных зависимостях мнимой части электрического модуля M'' (рис. 3). Соответственно, масштабы первой и второй областей различаются приблизительно в 60 раз. Резкий и значительный рост диэлектрической проница-

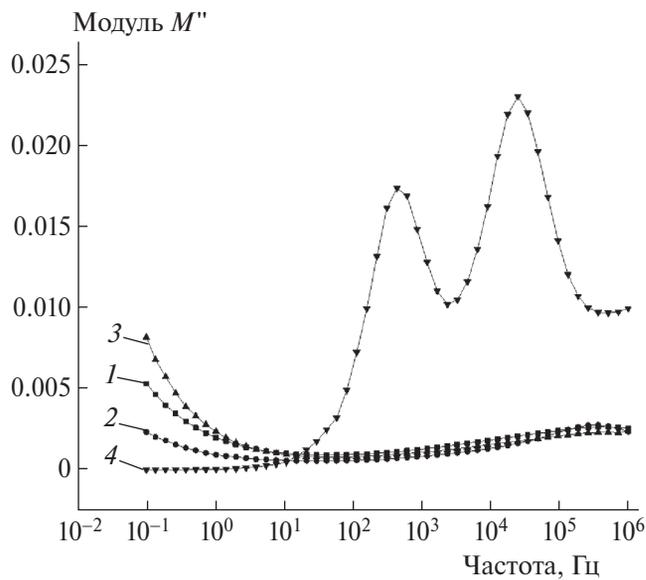


Рис. 3. Зависимость от частоты f мнимой части электрического модуля M'' при концентрациях НПГ 0.1 (1), 0.25 (2), 1 (3) и 5 мас. % (4).

Таблица 1. Пористость исходного ПЛА и композиций ПЛА–НПГ до и после УФ-облучения

Содержание НПГ в композиции, мас. %	Пористость, об. %
Исходные композиции	
ПЛА	5.9
0.1	7.3
0.25	7.4
1	7.2
5	14.5
Композиции после УФ-облучения в течение 3 ч	
ПЛА	11.6
0.1	11.9
0.25	13.7
1	9.0
5	15.0

емости (рис. 2) также указывает на то, что при концентрации наполнителя, равной 5 мас. %, порог протекания превышен.

Известно, что механические характеристики композиционных материалов в значительной степени определяются пористостью структуры. В этой связи методом рентгеновской микротомографии была определена пористость образцов ПЛА и композиций ПЛА–НПГ различного состава до и после УФ-облучения в течение 3 ч. Полученные результаты представлены в табл. 1. Как видно из приведенных данных, введение НПГ в исходные композиции способствует увеличению

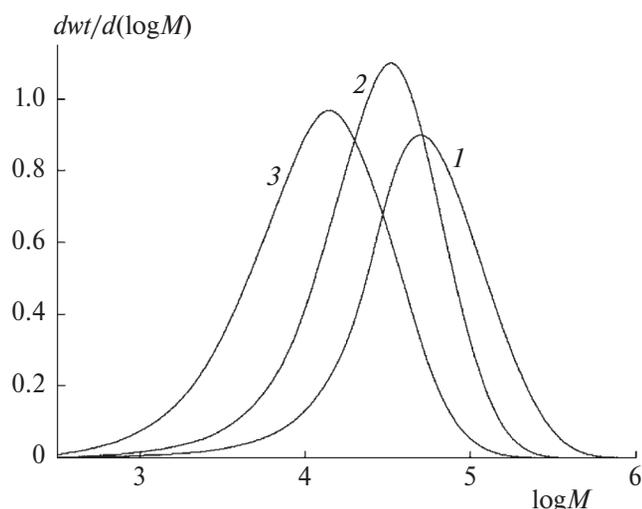


Рис. 4. Кривые ММР ПЛА в зависимости от времени УФ-облучения: 1 – 0 ч, 2 – 3 ч, 3 – 24 ч.

Таблица 2. Механические характеристики исходного ПЛА и композиций ПЛА–НПП

Содержание НПП в композиции, мас. %	E , МПа	σ_p , МПа	ε_p , %
ПЛА	2700	45.4	4
0.05	2960	44.4	3
0.1	3155	46.9	3
0.15	3020	45.5	3
0.2	3170	40.9	3
0.25	3200	44.5	2
1	3220	40.7	2
5	3550	32.6	1

пористости образцов, которая практически остается неизменной в интервале концентраций наполнителя 0.1–1 мас. %, однако увеличение его содержания до 5 мас. % приводит к почти двухкратному росту количества пор.

В то же время воздействие УФ-облучения способствует возрастанию числа пор, что объясняется нарушением целостности материала в этих условиях. Необходимо отметить, что наиболее заметно этот процесс протекает при низких концентрациях наполнителя, тогда как при более высоких концентрациях (5 мас. %) наблюдаемый эффект нивелируется (количество пор равняется 14.5 и 15.0 соответственно). По-видимому, в этом случае количество НПП достаточно для сохранения материала от разрушительного действия УФ-облучения.

Механические характеристики ПЛА и его композиций с НПП приведены в табл. 2. Сравнительный анализ данных показывает, что увеличение

Таблица 3. Молекулярно-массовые характеристики исходного ПЛА и в композициях ПЛА–НПП в зависимости от времени УФ-облучения

Содержание НПП в композициях, мас. %	M_n	M_w	M_p	PD
0 ч				
ПЛА	27800	70000	49400	2.5
0.10	34280	95940	77600	5.1
0.25	29730	81600	66370	3.4
1	29680	88930	65370	3.0
5	30060	99700	79940	3.3
3 ч				
ПЛА	15570	37330	32780	2.4
0.10	19930	47060	42900	4.2
0.25	18120	55000	45240	3.0
1	30900	80900	60200	2.6
5	31750	94160	68630	3.0
24 ч				
ПЛА	6320	17700	13740	2.8
0.10	7120	20460	15740	2.9
0.25	7100	20300	16000	2.9
1	15400	57000	42250	3.7
5	26470	92260	75250	3.5

Примечание: M_n – среднечисловая молекулярная масса; M_w – средневесовая молекулярная масса; M_p – молекулярная масса, соответствующая максимуму хроматографического пика; PD – полидисперсность.

содержания НПП приводит к незначительному возрастанию модуля упругости E и небольшому снижению значений разрывной прочности σ_p и удлинения при разрыве ε_p . Аналогичные результаты были получены нами ранее при изучении влияния ВОГ на механические характеристики композиций ПЛА–ВОГ, полученных твердофазным способом [19]. В общем случае такой характер изменения механических характеристик связан с влиянием жестких дисперсных нанодисперсных наполнителей, синтезированных на основе графита.

Как уже упоминалось, в процессе эксплуатации изделия из полимерных композиционных материалов могут подвергаться воздействию УФ-излучения, негативно влияющего на их свойства. В этой связи процессы, происходящие в композициях ПЛА–НПП в процессе облучения, были изучены методом ГПХ, позволяющим оценить изменение молекулярного веса и молекулярно-

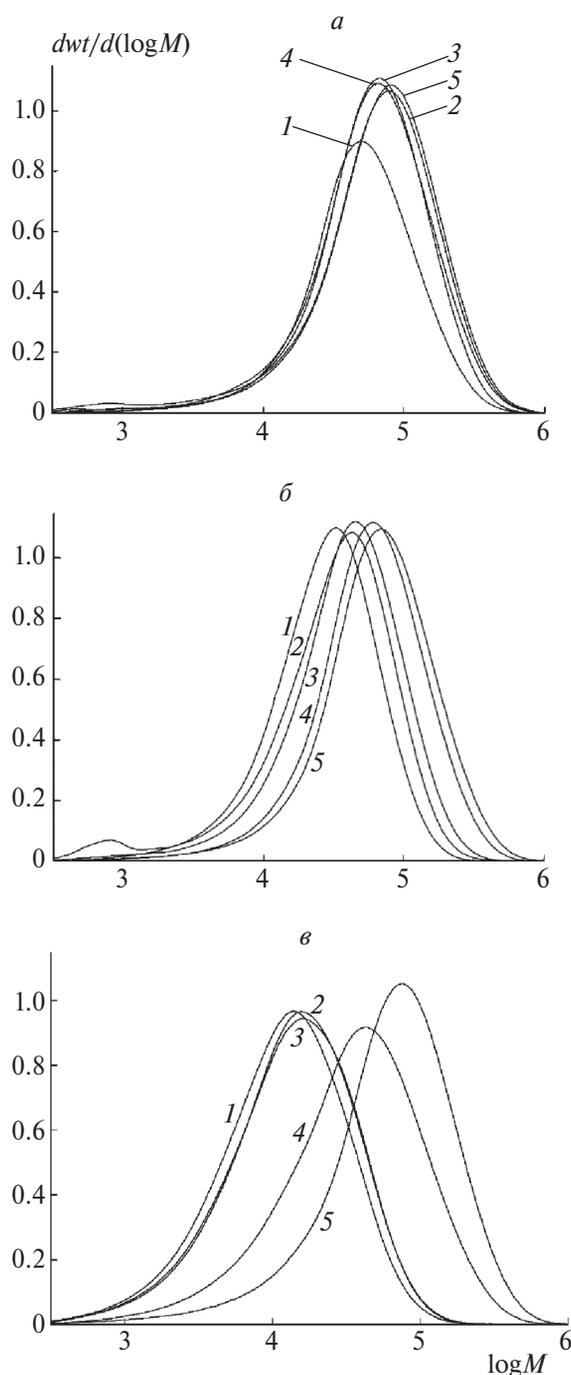


Рис. 5. *a* – Кривые ММР композиций на основе ПЛА (1), содержащих 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4) и 5 мас. % (5) НПГ без воздействия УФ-облучения; *б* – кривые ММР композиций на основе ПЛА (1), содержащих 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4) и 5 мас. % (5) НПГ при УФ-облучении в течение 3 ч; *в* – кривые ММР композиций на основе ПЛА (1), содержащих 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4) и 5 мас. % (5) НПГ при УФ-облучении в течение 24 ч.

массового распределения (ММР) ПЛА от времени облучения, а также путем измерения механических характеристик облученных образцов.

Молекулярно-массовые характеристики исходного ПЛА и в композициях ПЛА–НПГ различного состава после воздействия УФ-излучения в зависимости от времени облучения представлены на рис. 4, 5 и в табл. 3. На рис. 4 приведены кривые ММР исходного ПЛА (кривая 1) и ПЛА, подвергнутого УФ-облучению в течение 3 (кривая 2) и 24 ч (кривая 3), построенные в полулогарифмических координатах. Как видно из этого рисунка, на всех кривых ММР присутствует лишь один пик, однако в процессе облучения наблюдается смещение максимума кривых распределения, свидетельствующее об уменьшении молекулярной массы образцов (см. табл. 3).

На рис. 5 приведены кривые ММР композиций на основе ПЛА, содержащих от 0.1 до 5 мас. % НПГ, в зависимости от времени УФ-облучения. Из этого рисунка следует, что в процессе облучения происходит смещение кривых ММР, особенно заметное после 24 ч облучения. Если для композиций, содержащих 0.1 и 0.25 мас. % НПГ, не происходит значительного изменения ММР (рис. 5б, 5в, кривые 2 и 3), то для образцов, содержащих 1 и 5 мас. % наполнителя, кривые смещаются в высокомолекулярную область, что свидетельствует о стабилизирующем действии графеновых наполнителей на деструкцию ПЛА под действием УФ-облучения. При этом характер кривых распределения не меняется, т.е. происходит последовательная деструкция полимерной цепи по сложноэфирным связям [16], приводящая к снижению молекулярного веса и, как показано ниже, потере механической устойчивости образцов.

Результаты измерения ММР ПЛА и ПЛА в композициях различного состава представлены в табл. 3. Из сравнительного анализа данных, приведенных в этой таблице, следует, что изменение молекулярного веса образцов зависит как от содержания наполнителя, так и от времени УФ-облучения. Если M_w ПЛА в композиции, содержащей 1 мас. % НПГ, после 3 ч облучения равняется 80 900, то после 24 часов облучения эта величина составляет лишь 57 000. В то же время для композиции с 5 мас. % НПГ молекулярная масса ПЛА равняется 94 160 и 92 260, соответственно, т.е. увеличение содержания НПГ оказывает стабилизирующее воздействие на процесс деструкции полиэфира.

Вышеописанные результаты наглядно иллюстрируют кривые, приведенные на рис. 6. Они

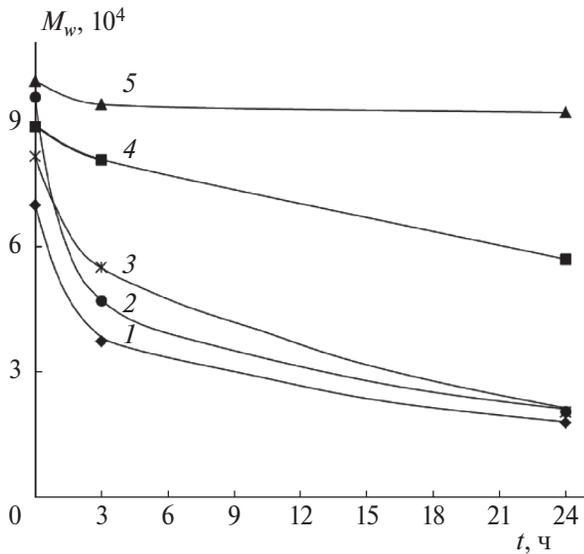


Рис. 6. Влияние времени УФ-облучения на M_w исходного ПЛА (1) и ПЛА в композициях с НПГ различного состава. Содержание НПГ: 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4), 5 мас. % (5).

демонстрируют влияние содержания нанодисперсного наполнителя на изменение молекулярного веса (стабильности образцов) ПЛА в композициях на его основе.

Поскольку уменьшение молекулярного веса ПЛА в процессе облучения неизбежно должно сказываться на его механических свойствах, в работе было проведено сравнительное изучение изменения механических характеристик ПЛА и композиций ПЛА–НПГ различного состава в процессе облучения.

На рис. 7 представлены временные зависимости механических характеристик композиций с различным содержанием наполнителя, подвергшихся воздействию УФ-излучения. Как видно из этого рисунка, УФ-облучение приводит к резкому снижению значений всех механических характеристик композиций с низким содержанием НПГ (0.1 мас. %), которые уже после облучения в те-

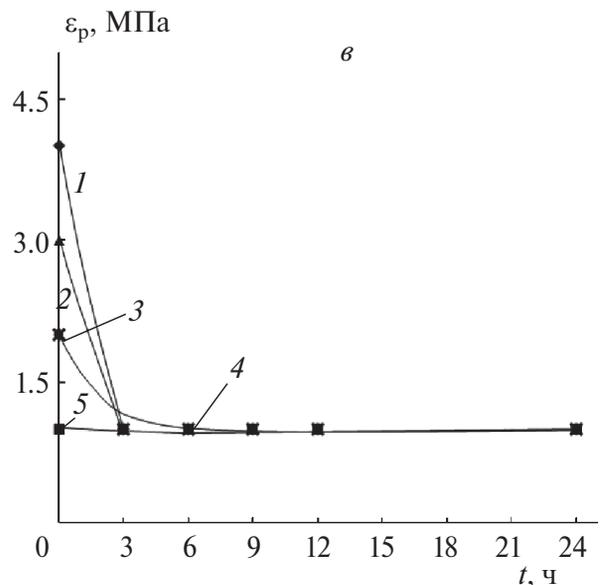
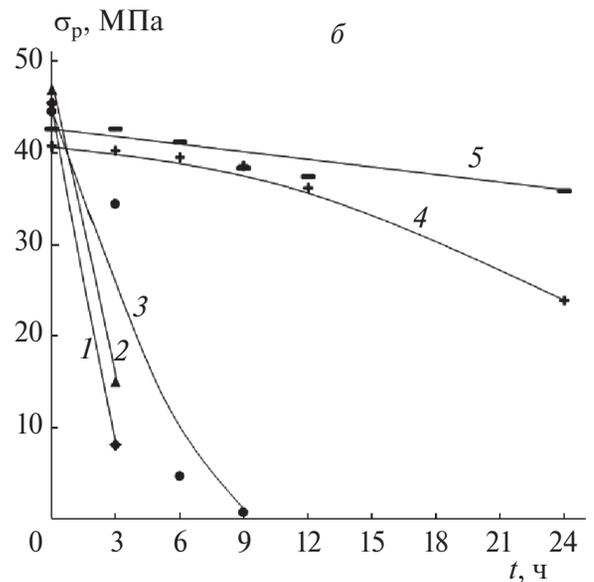
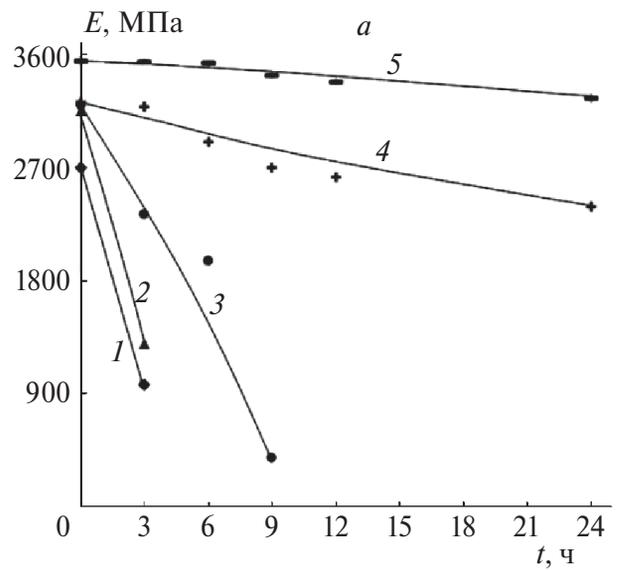


Рис. 7. а – Зависимость модуля упругости E композиций исходного ПЛА (1) и композиций ПЛА–НПГ с содержанием НПГ 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4) и 5 мас. % (5) от времени УФ-облучения; б – зависимость предельной прочности σ_p композиций исходного ПЛА (1) и композиций ПЛА–НПГ с содержанием НПГ 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4), 5 мас. % (5) от времени УФ-облучения; в – зависимость удлинения при разрыве ϵ_p композиций исходного ПЛА (1) и композиций ПЛА–НПГ с содержанием НПГ 0.1 (2), 0.25 (3), 1 (4), 5 мас. % (5) от времени УФ-облучения.

чение 3 ч теряют механическую устойчивость. В то же время композиции, содержащие 0.25 мас. % наполнителя разрушаются лишь после 9 ч облучения. Последующее УФ-облучение приводит к полному разрушению пленок, причем начало времени разрушения возрастает с увеличением содержания наполнителя.

Однако уже при содержании НПП 1 и 5 мас. % наблюдается лишь незначительное уменьшение механических характеристик композиций, которые остаются стабильными и после УФ-облучения в течение 24 ч. По-видимому, это связано с тем, что при таких концентрациях наночастицы графена достаточно хорошо защищают макромолекулы ПЛА от деструктивного воздействия УФ-облучения, приводящего к разрыву полимерных цепей, что было описано нами ранее в работе [16] при изучении облученного ПЛА методом ИК-спектроскопии.

Таким образом, полученные данные убедительно демонстрируют, что присутствие НПП способствует повышению устойчивости композиционных пленок на основе ПЛА к воздействию УФ-излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом твердофазного смешения под действием сдвиговых деформаций в смесителе Браббендера получены композиции полилактида с наночастицами графита в широком диапазоне соотношения компонентов. Продемонстрирована зависимость электрических и механических свойств разрабатываемых материалов от их состава.

Исследование электрических свойств композиций показало, что проводимость композиций на постоянном токе появляется при концентрации наполнителя 5 мас. %, т.е. порог протекания находится в интервале 1–5 мас. %. В образце с концентрацией наполнителя 5 мас. % обнаружен двойной перколяционный переход, связанный с агрегацией частиц наполнителя.

В процессе эксплуатации полимерные изделия могут подвергаться агрессивному воздействию внешней среды, в частности УФ-излучению, под действием которого протекает деструкция полимерных цепей, приводящая к снижению молекулярного веса полимеров и, как следствие, потере изделиями на их основе механической стабильности.

Методом рентгеновской микротомографии определена пористость исходных образцов и

образцов, подвергнутых УФ-облучению, и установлено его влияние на изменение механических характеристик композиций.

В общем случае введение нанодисперсных наполнителей приводит к увеличению модуля упругости, снижению предельной прочности и удлинения при разрыве.

Эффективным методом оценки воздействия УФ-излучения на характеристики полимерных изделий является изучение их методом эксклюзионной хроматографии, позволяющим оценить изменение молекулярного веса и молекулярно-массового распределения. На основании проведенных исследований было установлено, что в зависимости от времени облучения (3 и 24 ч) происходит смещение максимума на кривых ММР и падение молекулярного веса ПЛА. Максимальное падение молекулярного веса отмечено для композиций с низким содержанием НПП, тогда как увеличение содержания нанодисперсных наполнителей приводит к увеличению их стабильности. Следствием падения молекулярного веса ПЛА является снижение механических характеристик композиций на его основе, величины которых зависят как от содержания наполнителей, так и от времени облучения. В общем случае наиболее устойчивыми к УФ-облучению оказались композиции с максимальным содержанием НПП, причем их устойчивость незначительно изменяется в зависимости от времени облучения.

Полученные результаты позволяют целенаправленно влиять на свойства получаемых композиций на основе ПЛА и НПП и способствуют получению полимерных материалов, обладающих устойчивостью к воздействию УФ-облучения.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом (проект № 22-23-00369).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chieng B.W., Ibrahim N.A., Yunus W.M.Z.W. et al. // Polymer. 2014. V. 6. P. 2232; <https://doi.org/10.3390/polym6082232>*
2. *Papageorgiou D.J., Kinloch I.A., Young R.J. // Prog. Mater. Sci. 2017. V. 90. P. 75; <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>*
3. *Jem K.J., van der Pol J.F., de Vos S. Microbial Lactic Acid, Its Polymer Poly(lactic acid) and their industrial Applications. Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications. Gorinchem, The Netherlands: Royal Society of Chemistry, 2010; https://doi.org/10.1007/978-3-642-03287-5_13*

4. *Garlotta D.A.* // *J. Polym. Environ.* 2001. V. 19. P. 63; <https://doi.org/10.1023/A:1020200822435>
5. *Jiménez A., Peltzer M., Ruseckaite R.* Poly(lactic acid) Science and Technology Processing, Properties, Additives and Applications. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015; <https://doi.org/10.1039/9781782624806-FP005>
6. *Zhang M., Ding X., Zhan Y., Wang Y., Wang X.* // *J. Hazard. Mater.* 2020. V. 384. P. 121260; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121260>
7. *Tawiah B., Bin Y., Richard K.K. Y. et al.* // *Carbon.* 2019. V. 150. P. 8; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.002>
8. *Rogovina S.Z., Gasymov M.M., Lomakin S.M., Kuznetsova O.P. et al.* // *Mech. Compos. Mater.* 2023. V. 58. P. 845; <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10073-2>
9. *Rogovina S.Z., Lomakin S.M., Usachev S.V. et al.* // *Polym. Cryst.* 2022. V. 2022. P. 1; <https://doi.org/10.1155/2022/4367582>
10. *Hideto T., Hiroaki S., Yoshihiro S.* // *J. Polym. Environ.* 2012. V. 20. P. 706; <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0424-7>
11. *Angelin T.S., Ananthi V., Abhispa B., Nallathambi S. et al.* // *Int. J. Biol. Macromol.* 2023. V. 234. P. 123703; <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123703>
12. *Olewnik-Kruszkowska E., Koter I., Skopińska-Wiśniewska J. et al.* // *J. Photochem. Photobiol. A. Chem.* 2015. V. 311. P. 114; <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jphotochem.2015.06.029>
13. *Смыковская Р.С., Кузнецова О.П., Мединцева Т.И. и др.* // *Хим. физика.* Т. 41. № 4. С. 56.
14. *Sasov A., Van Dyck D.* // *J. Microscopy.* 1998. V. 191. P. 151; <https://doi.org/10.5772/32264>
15. *Мединцева Т.И., Сергеев А.И., Шилкина Н.Г., Прут Э.В.* // *Хим. физика.* 2023. Т. 42. № 2. С. 61; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23050096>
16. *Rogovina S.Z., Lomakin S.M., Usachev S.V. et al.* // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. P. 3920; <https://doi.org/10.3390/app13063920>
17. *Rogovina S.Z., Lomakin S.M., Usachev S.V. et al.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 2019. V. 136. P. 47598; <https://doi.org/10.1002/app.47598>
18. *Jonscher A.K.* // *Nature.* 1977. V. 267. P. 673; <https://doi.org/10.1038/267673a0>
19. *Роговина С.З., Ломакин С.М., Гасымов М.М. и др.* // *Все материалы. Энциклопед. справ.* 2022. № 6. С. 11; <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2022-0-6-11-19>

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF UV RADIATION ON COMPOSITIONS OF POLYLACTIDE WITH GRAPHITE NANOPATES

M. M. Gasymov¹, S. Z. Rogovina^{1*}, O. P. Kuznetsova¹,
E. O. Perepelitsyna², V. G. Shevchenko³, S. M. Lomakin^{1,4}, A. A. Berlin¹

¹*Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Federal State Research Center for Chemical Physics and Medical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow region, Russia*

³*Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁴*Emanuel Institute of biochemical physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: s.rogovina@mail.ru

Composites of polyether polylactide (PLA) synthesized from natural raw materials with graphite nanoplates (GNP), which represent a new type of composite materials based on biodegradable polymers, were obtained by solid-phase method under the action of shear deformations. The porosity of composites was evaluated and their electrical and mechanical properties were studied. The effect of UV radiation on the molecular weight and molecular weight distribution of PLA in PLA-GNP composites of different compositions was investigated using the method of excision chromatography (EC), and the effect of the GNP nanofiller content on the change of their mechanical characteristics in the process of radiation was shown.

Keywords: polylactide, graphite nanoplates, UV Radiation, exclusion chromatography, electrical and mechanical properties.

REFERENCES

1. *Chieng B.W., Ibrahim N.A., Yunus W.M.Z.W. et al. // Polymer. 2014. V. 6. P. 2232; https://doi.org/10.3390/polym6082232*
2. *Papageorgiou D.J., Kinloch I.A., Young R.J. // Prog. Mater. Sci. 2017. V. 90. P. 75; https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004*
3. *Jem K.J., van der Pol J.F., de Vos S. Microbial Lactic Acid, Its Polymer Poly(lactic acid) and their industrial Applications. Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications. Gorinchem, The Netherlands: Royal Society of Chemistry, 2010; https://doi.org/10.1007/978-3-642-03287-5_13*
4. *Garlotta D.A. // J. Polym. Environ. 2001. V. 19. P. 63; https://doi.org/10.1023/A:1020200822435*
5. *Jimenez A., Peltzer M., Ruseckaite R. Poly(lactic acid) Science and Technology Processing, Properties, Additives and Applications. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015; https://doi.org/10.1039/9781782624806-FP005*
6. *Zhang M., Ding X., Zhan Y., Wang Y., Wang X. // J. Hazard. Mater. 2020. V. 384. P. 121260; https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121260*
7. *Tawiah B., Bin Y., Richard K.K. Y. et al. // Carbon. 2019. V. 150. P. 8; https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.002*
8. *Rogovina S.Z., Gasymov M.M., Lomakin S.M., Kuznetsova O.P. et al. // Mech. Compos. Mater. 2023. V. 58. P. 845; https://doi.org/10.1007/s11029-023-10073-2*
9. *Rogovina S.Z., Lomakin S.M., Usachev S.V. et al. // Polym. Cryst. 2022. V. 2022. P. 1; https://doi.org/10.1155/2022/4367582*
10. *Hideito T., Hiroaki S., Yoshihiro S. // J. Polym. Environ. 2012. V. 20. P. 706; https://doi.org/10.1007/s10924-012-0424-7*
11. *Angelin T.S., Ananthi V., Abhispa B., Nallathambi S. et al. // Int. J. Biol. Macromol. 2023. V. 234. P. 123703; https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123703*
12. *Olewnik-Kruszkowska E., Koter I., Skopińska-Wisniewska J. et al. // J. Photochem. Photobiol. A. Chem. 2015. V. 311. P. 114; http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jphotochem.2015.06.029*
13. *Smykovskaya R.S., Kuznetsova O.P., Medintseva T.I. et al. // Russ. J. Phys. Chem. 2022. V. 41. P. 1.*
14. *Sasov A., Van Dyck D. // J. Microscopy. 1998. V. 191. P. 151; https://doi.org/10.5772/32264*
15. *Medintseva T.I., Sergeev A.I., Shilkina N.G. et al. // Russ. J. Phys. Chem. 2023. V. 42. P. 61; https://doi.org/10.31857/S0207401X23050096*
16. *Rogovina S.Z., Lomakin S.M., Usachev S.V. et al. // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 3920; https://doi.org/10.3390/app13063920*
17. *Rogovina S.Z., Lomakin S.M., Usachev S.V. et al. // J. Appl. Polym. Sci. 2019. V. 136. P. 47598; https://doi.org/10.1002/app.47598*
18. *Jonscher A.K. // Nature. 1977. V. 267. P. 673; https://doi.org/10.1038/267673a0*
19. *Rogovina S.Z., Lomakin S.M., Gasymov M.M. et al. // Polym. Sci. Ser. D. 2022. V. 6. P. 11; https://doi.org/10.31044/1994-6260-2022-0-6-11-19*