

НАНОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 542.87+543.422.3-74

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ ПРОЧНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ЛАТЕКСНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАН/ОКСИД ГРАФЕНА

© 2023 г. С. А. Баскаков^а, Ю. В. Баскакова^а, Е. В. Дворецкая^а, С. С. Красникова^а,
В. А. Лесничая^а, Ю. М. Шульга^а, В. Н. Василец^{б, *}

^аФГБУН Институт проблем химической физики РАН, пр. Академика Семёнова 1,
Черноголовка, Московская обл., 1142432 Россия

^бФГБУН Филиал Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН,
пр. Академика Семёнова 2/10, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

*E-mail: vnyasilets@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.10.2022 г.

После доработки 08.11.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

Синтезированы и охарактеризованы нанокompозиты, полученные на основе водного полиуретанового латекса и оксида графена. Структура и состав нанокompозитов исследованы методами элементного анализа, оптической микроскопии, ИК-спектроскопии, ДСК и термогравиметрии. Нанокompозиты показали более высокую термическую устойчивость и повышенную механическую прочность по сравнению с исходным полимером. Установлено, что модуль Юнга пленок латекса после введения оксида графена в количестве 2 вес. % увеличивается почти в шесть раз. При этом напряжение при разрыве снижается незначительно на 10–15%. Обнаружено влияние размера частиц оксида графена на механические свойства композитов, а именно: композиты с более “крупными” частицами оксида графена имеют более высокое значение модуля Юнга, а их относительное удлинение при разрыве уменьшается.

Ключевые слова: полиуретан, оксид графена, нанокompозиты, ИК спектры, ТГА, ДСК, механические свойства

DOI: 10.31857/S0023119323020043, **EDN:** NGNGZA

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие использование графеновых материалов (графеновые нанопластины, оксид графена (ОГ), восстановленный оксид графена (ВОГ) и др.) для приготовления полимерных композитов открыло новую интересную область в материаловедении. Графенсодержащие полимерные композиционные материалы (ПКМ) демонстрируют значительное улучшение механических, физико-химических свойств и эксплуатационных характеристик, которые обычно не могут быть достигнуты при использовании чистых полимеров [1–4]. Полиуретаны (ПУ) – благодаря разнообразию своих структур применяются практически во всех сферах промышленности. Для изготовления уплотнительных изделий, защитных абразивостойких покрытий, эластичных форм для производства элементов декора, лакокрасочных материалов (ЛКМ), адгезивов, герметиков, деталей машин и станков (валов, роликов, ремней и т.п.), различных резино-технических изделий бытового (подошвы обуви, искусственная кожа) и про-

мышленного назначения [5]. Полиуретаны среди других полимерных материалов выделяются высокой механической прочностью, широким интервалом эластичности, высокой стойкостью к истиранию, превосходными ударно-вязкостными характеристиками. Кроме того, свойствами полиуретана довольно легко управлять, путем изменения химической структуры изоцианата и полиола, поверхностно-активных веществ и наполнителей [6, 7]. Многие свойства обычного ПУ могут быть также значительно улучшены при добавлении в качестве наномодификаторов оксида графена, что открывает новые возможности для расширения области применения ПУ.

Известно, что изменение свойств ПКМ связано непосредственно с их микроструктурой, которая существенно зависит от средства фаз и методов введения нанонаполнителя. Основной задачей при разработке нанокompозитов с улучшенными характеристиками является максимальное диспергирование нанонаполнителя в полимерной матрице. Хорошая дисперсия наночастиц и их достаточное

расслоение, позволяет достичь значительного улучшения свойств при низких содержаниях наполнителя в полимере. Несовместимость фаз и/или недостаточное расслаивание графена перед смешиванием с полимером может привести к образованию крупных агломератов даже при использовании однослойного графена.

Одним из основных способов введения графенового модификатора в ПУ является замешивание с одним из компонентов ПУ системы перед полимеризацией. Мономером ПУ, как правило, служат алифатические или ароматические диизоцианаты (ДИ). Здесь следует учитывать, то, что ДИ очень чувствительны к влаге и имеют высокую вязкость, поэтому введение ОГ в ДИ или в его производные может в итоге отрицательно повлиять на свойства композита при недостаточном уровне диспергирования ОГ и возможного попадания влаги. Вторым компонентом является полиол — продукт полимеризации этиленоксидов небольшого молекулярного веса (до 0.6 кДа). Полиолы обладают низкой вязкостью и более подходят для введения графеновых материалов [8]. ОГ вводится иногда непосредственно в смесь двух компонентов в виде порошка, как, например, в работе [9] или в виде раствора [10].

В последние годы производители полиуретанов сместили акцент в сторону производства высококачественных, специализированных и экологически чистых полиуретанов. Среди них полиуретан на водной основе (ВПУ или латекс) привлек многих исследователей и представителей промышленности в стране и за рубежом из-за его нетоксичности, отсутствия запаха, удобного хранения, безопасности использования [11].

Помимо экологических преимуществ, латексы ПУ сочетают в себе другие полезные свойства: они обладают высоким содержанием ПУ в эмульсии, высокой молекулярной массой, пониженной вязкостью, а также обладают низкой температурой пленкообразования, что важно при использовании в качестве основы ЛКМ, герметиков и т.п. [12]. Но ВПУ также присущи определенные недостатки: медленная скорость высыхания и высокая стоимость по сравнению с растворами ПУ, высокая чувствительность к pH. Чтобы расширить область применения ВПУ, необходимо улучшить его комплексные характеристики за счет соответствующего модифицирования. Анализ литературных источников показал, что модифицирование полиуретановых латексов графеновым материалами изучено недостаточно полно.

В настоящей работе описаны способы получения смесей ПУ-латекса с суспензией ОГ, которая устойчива во времени, т.е. ее хранение не сопровождается расслоением компонентов или образованием осадка. Были получены смеси ПУ-ОГ с содержанием ОГ от 0.1 до 2.0 вес. %. Полученные

смеси использовали для получения нанокompозитных пленок ПУ-ОГ. Нанокompозитные пленки были аттестованы методами элементного анализа, термогравиметрии, ДСК и ИК спектроскопии. Были также изучены их механические свойства и измерены основные механические характеристики: модуль Юнга, напряжение при разрыве, относительное удлинение при разрыве.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве источника полиуретана использовали алифатическую анионную полиуретановую дисперсию Bayhydrol® UN 340/1 (производитель COVESTRO, Германия) Данный материал используется в качестве связующего в рецептуре высокоэластичных водоразбавляемых составов для дерева, металла, пластика и минеральных оснований, а также в качестве комбинированного связующего для улучшения эластичности и гибкости таких покрытий.

Оксид графита был получен модифицированным методом Хаммерса по процедуре, описанной в [13]. В качестве сырья были использованы карандашный графит марки ГК-1 и специальный малозольный графит ГСМ-2, отличающиеся размером чешуек. Распределение размера частиц для ГК-1 90% 30 мкм и менее, для ГСМ-2 75% 210 мкм и менее. Суспензию ОГ заданной концентрации готовили ультразвуковой обработкой суспензии оксида графита с последующим центрифугированием при 3000 g для удаления крупных нерасслоенных частиц.

Композитные пленки ПУ-ОГ готовили следующим образом. В дисперсию ВПУ при перемешивании вводили по каплям рассчитанный объем суспензии ОГ. Перемешивание после введения ОГ продолжали в течение 10 мин. Затем смесь заливали в форму, представляющую собой стеклянную пластину, по краю окантованную бортом для препятствия растекания смеси. Форму предварительно выравнивали по брусковому уровню 200-0.1 (ГОСТ 9392-75) для получения пленки без существенного отклонения толщины. После высыхания смеси пленку отделяли от формы и проводили необходимые испытания.

Термогравиметрический анализ (ТГ) образцов выполняли с помощью прибора STA 449 F3 Jupiter (Зельб, Бавария, Германия). Для тарирования весов камера прибора была вакуумирована (10^{-2} бар) и заполнена газом He марки 6.0 (99.9999%). После чего в рабочую камеру прибора на держатель устанавливали два пустых корундовых (Al_2O_3) тигля и производили запись базовой линии. Затем в один из пустых тиглей помещали образец, камеру прибора снова вакуумировали и заполняли гелием. Измерения проводили в диапазоне температур 20–400°C со скоростью 10°C/мин в потоке He 50 мл/мин.

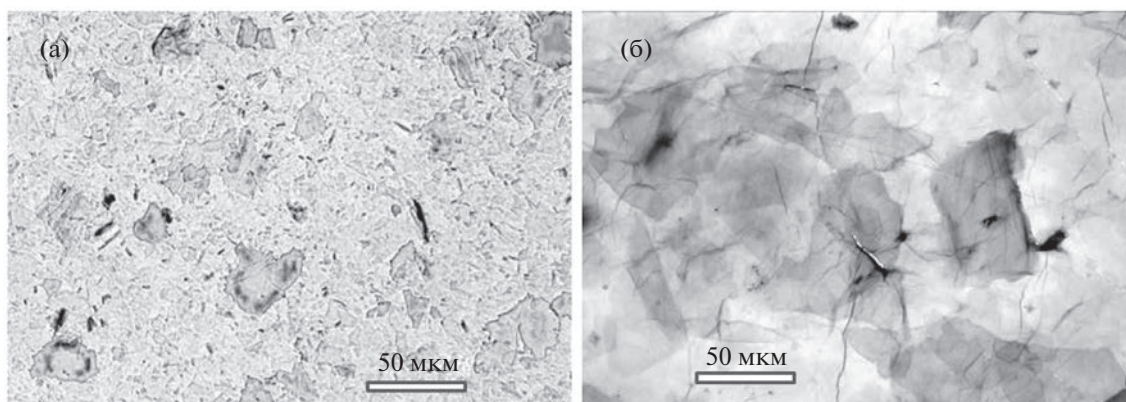


Рис. 1. Оптические микрофотографии частиц оксида графита, полученных из графитов ГК-1 (а) и ГСМ-2 (б).

Кривые ДСК регистрировали на приборе DSC 822 (Mettler-Toledo, Испания). Образцы массой 7–10 мг помещали в алюминиевую ампулу, которая в процессе измерения находилась в атмосфере азота при скорости потока 50 мл/мин. Тепловыделение измеряли в диапазоне температур от -35 до $+200^{\circ}\text{C}$ при скорости нагрева $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Температуру стеклования (T_g) с экспериментальной ошибкой $\pm 1^{\circ}\text{C}$ рассчитывали с использованием программного обеспечения Mettler-Toledo.

ИК спектры нарушенного полного внутреннего отражения (ИК НПВО) образцов регистрировали при комнатной температуре в диапазоне $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ на ИК – Фурье-спектрометре “Perkin Elmer Spectrum Two” с алмазной приставкой НПВО.

Зависимость напряжение σ –деформация ϵ получены на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z010 в соответствии со стандартом ASTM 882 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet. Все образцы были прямоугольной формы размером $100 \times 10\text{ мм}$. Длина между двумя захватами была равна 50 мм. Удлинения при разрыве (ϵ_b), максимальное напряжения растяжения (σ_{max}) и стандартные отклонения для этих величин были оценены из данных по десяти испытываемым образцам для каждой из пленок.

Оптические микрофотографии частиц оксидов графена были получены на оптическом микроскопе Olympus BX43 в светлом поле и с применением фазового контраста. Увеличение от $200\times$ до $400\times$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оптические фотографии

Для оценки влияния размера частиц оксида графена на свойства пленок ПУ–ОГ в работе использовали оксиды графена, полученные из графитов марок ГСМ-2 и ГК-1, отличающихся средним размером чешуек. На рис. 1 представлены микрофотографии, иллюстрирующие отличия в латеральных размерах частиц ОГ, полученных из разных графитов. Видно, что размеры частиц ОГ коррелируют с размером чешуек исходного графита. Далее, оксид графена, полученный из мелкозернистого графита ГК-1, обозначается как ОГ1, а из крупнозернистого графита ГСМ-2 – как ОГ2.

Элементный анализ

В табл. 1 представлены результаты элементного состава исследуемых оксидов графена. Видно, что образцы по содержанию С, О и Н сравнимы между собой. Стоит отметить, что содержание серы в ОГ1 заметно больше, чем в образце ОГ2. Это связано с тем, что ОГ1 имеет более мелкие частицы, что затрудняет их очистку от сернистых остатков центрифугированием. Также видно, что оба образца не содержат азота.

ИК спектроскопия

ИК-спектры оксида графена ОГ1, пленки ПУ и композитов на их основе представлены на рис. 2. На ИК-спектре ОГ1 (рис. 2, кривая 7) в диапазоне $3700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ присутствует ряд перекрываю-

Таблица 1. Химический состав оксидов графена, полученных из разных графитов, вес. %

Образец	С, вес. %	О, вес. %	Н, вес. %	N, вес. %	S, вес. %
ОГ1	46.28	51.30	2.72	0.00	2.30
ОГ2	45.32	50.82	3.03	0.00	0.83

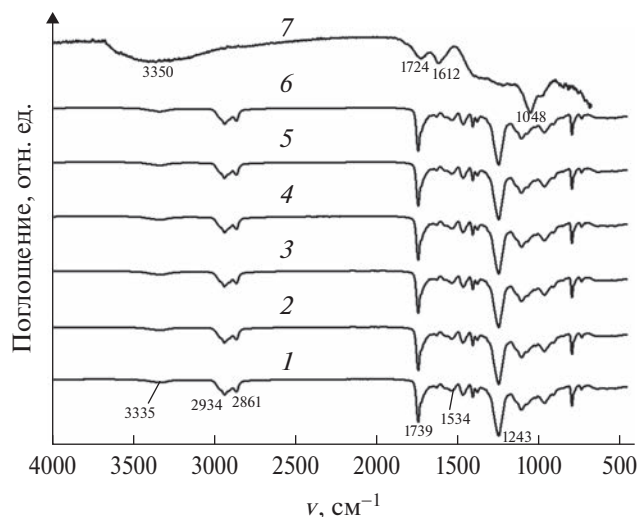


Рис. 2. ИК-спектры образцов пленок чистого ПУ (1), композитов ПУ+ОГ1 с содержанием ОГ1 0.1% (2), 0.5% (3), 1.0% (4), 1.5% (5), 2.0% (6) и чистого ОГ1 (7).

щихся полос поглощения, которые, в соответствии с литературными данными [14–16], можно приписать валентным колебаниям связей О–Н групп и молекул воды. Полоса поглощения при 1724 см^{-1} обусловлена колебаниями связей $\text{C}=\text{O}$ в карбонильных группах и/или кетонах. Полосы поглощения при 1612 см^{-1} соответствуют как колебаниям двойных связей $\text{C}=\text{C}$ [17], так и деформационным колебаниям молекул воды. Полоса поглощения при 1048 см^{-1} обусловлена колебаниями связей $\text{C}-\text{O}$ в эпоксидных группах [18].

Полоса поглощения в спектре чистой ПУ-пленки при $\sim 3335\text{ см}^{-1}$ отвечает за валентные колебания связей $\text{N}-\text{H}$ уретанового блока, а колебаниям связи $\text{C}=\text{O}$ соответствует полоса поглощения

при 1739 см^{-1} . Два пика при 1544 и 1232 см^{-1} соответствуют валентным колебаниям связи $\text{N}-\text{H}$ в плоскости и связи $\text{C}-\text{N}$ соответственно. Полосы валентных колебаний при 2934 и 2861 см^{-1} отнесены к колебаниям связей $\text{C}-\text{H}$ в алифатических группах [19, 20]. Все полосы в немодифицированной полиуретановой матрице также встречаются в модифицированных нанокompозитах ПУ + ОГ. Более того, мы не нашли существенного влияния добавок оксида графена ОГ1 или ОГ2 на ИК-спектр ПУ-композитов. Не было зафиксировано каких-либо существенных сдвигов полос поглощения в ту или иную сторону.

Термогравиметрический анализ

На рис. 3 показаны кривые ТГА образцов пленок ПУ и ПУ-ОГ1 (а) и ПУ-ОГ2 (б). Как видно из кривых ТГА, для всех образцов наблюдается одинаковая тенденция потери массы. Небольшая потеря массы при 100°C обусловлена потерей воды, низкомолекулярных органических растворителей и примесей. Далее на кривых ТГА чистого ПУ имеются два участка в диапазоне от 280 до 460°C с наибольшей потерей массы. Эти два участка связаны с термической деградацией гибкого сегмента (полиольных цепочек) в диапазоне $280\text{--}350^\circ\text{C}$ и разложением жесткого сегмента ПУ (уретановых групп (NHCO)) в диапазоне $350\text{--}460^\circ\text{C}$. Таким образом, термическая деградация чистого ПУ и композитов ПУ + ОГ происходит в две стадии, что соответствует термодинамической несовместимости двух сегментов матрицы ПУ [20, 21].

Введение оксида графена в полимерную матрицу ПУ приводит к увеличению термической стабильности полимера. Это можно объяснить наличием большого количества кислородсодержащих групп, которые играют эффективную роль в про-

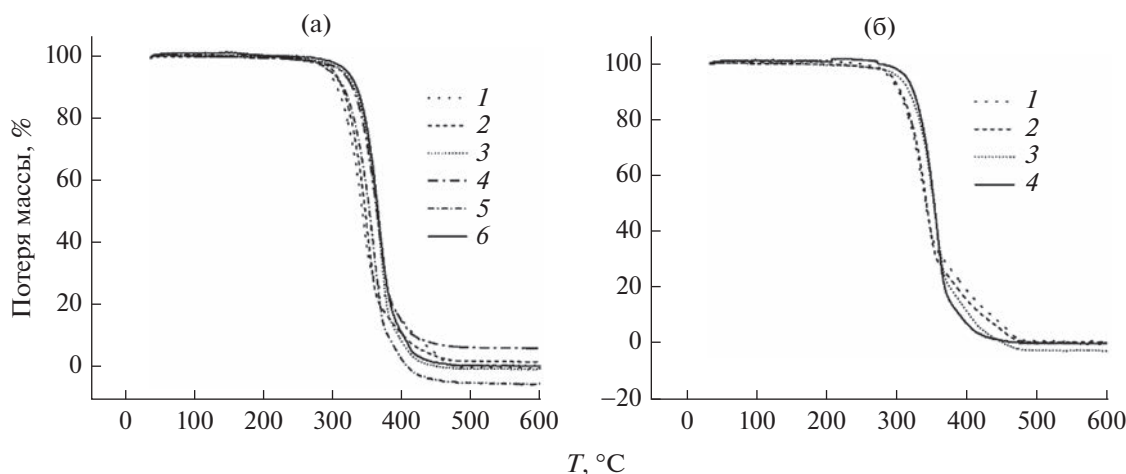


Рис. 3. Кривые термогравиметрического анализа (ТГА) образцов: (а) ПУ (1) и ПУ + ОГ1 (2 – 0.1% ОГ, 3 – 0.5% ОГ, 4 – 1.0% ОГ, 5 – 1.5% ОГ, 6 – 2.0% ОГ); (б) ПУ (1) и ПУ + ОГ2 (2 – 0.1% ОГ, 3 – 0.5% ОГ, 4 – 1.0% ОГ).

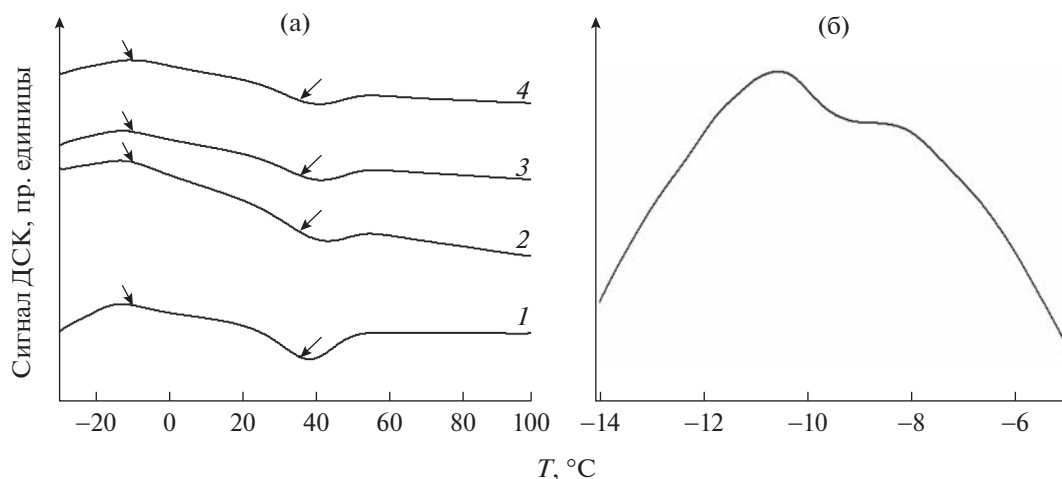


Рис. 4. (а) Кривые ДСК исходных пленок — чистого ПУ (1) и ПУ + ОГ1 композитов 1% (2), 1.5% (3), 2% (4). (б) Область низкотемпературного стеклования для исходной пленки ПУ.

течении химических реакций и межмолекулярных взаимодействий с матрицей. ОГ образует пространственные связи с полимерным каркасом, ограничивающие движение молекулярных цепочек полиуретана. На кривых ТГА композитов ОГ1 и ОГ2 обнаружено сокращение участка кривой, отвечающего за деструкцию жестких сегментов ПУ-молекул. Значения начальной температуры разложения при 5%-й потере массы зависят от содержания ОГ в композитах и увеличиваются с 293 до 320°C для ПУ + ОГ1 2.0% и до 313°C для ПУ + ОГ2 2.0%. Таким образом, максимальное значение начальной температуры разложения достигается при добавке ОГ с меньшими латеральными размерами частиц.

Дифференциальная сканирующая калориметрия

Молекулы латексных полиуретанов, как уже упоминалось, состоят из жестких сегментов, связанных с уретановыми 4,4-метиленидифенилдиизоцианатными группами, и гибких сегментов, связанных с полиольными группами. В исходном состоянии пленки ПУ и ПУ–ОГ представляли собой однофазную однородную систему, в которой при исследовании методом ДСК, согласно литературным данным [22–24], наблюдаются фазовые переходы типа стеклования т.е. перехода из стеклообразного в аморфное состояние, отвечающие жестким и гибким фрагментам. На рис. 4 представлены кривые ДСК исходных пленок — чистого ПУ и ПУ–ОГ1 композитов. Во всех образцах наблюдаются две области стеклования. Стрелками отмечены температуры стеклования, отвечающие гибким сегментам ($-10 \pm 1^\circ\text{C}$) и температуры стеклования, отвечающие жестким сегментам ($+36 \pm 1^\circ\text{C}$) полимерной цепи. Видно, что значения обеих температур стеклования практически не за-

висят от содержания ОГ1 в композитах в пределах 0–2 вес. %. Т.е. присутствие оксида графена в таких количествах не влияет на фазовую структуру композита. Кривые ДСК композитов, содержащих ОГ1 и ОГ2, были неразличимы по форме.

Механические свойства

Механические свойства ПУ/ОГ с различным содержанием ОГ исследовали с помощью испытания на растяжение. Результаты испытаний представлены на рис. 5 и в табл. 2. Результаты показывают существенный рост модуля Юнга для ПУ пленок при добавлении ОГ обоих видов, в то же время прочность на разрыв у композитных пленок имеет тенденцию к снижению. Добавка ОГ в целом снижает относительное удлинение при разрыве всех нанокомпозитов, причем чем больше ОГ в составе композита, тем меньше относительное удлинение при разрыве. Пленка ПУ + 2% ОГ1 имеет самое высокое среди полученных композитов ПУ/ОГ1 среднее значение модуля Юнга, равное 42.95 МПа, что соответствует увеличению на 569% по сравнению с чистым ПУ (7.55 МПа).

В работах [25, 26] также было обнаружено значительное улучшению механических свойств нанокомпозитов латексного полиуретана при добавлении графит содержащих наночастиц. Так, для композита, латексного полиуретана, содержащего 1 мас. % ГО, модуль упругости Юнга увеличился примерно в 14 раз по отношению к чистому полимеру. Авторы данной работы связывают такое увеличение модуля Юнга с образованием ковалентных связей изоцианатных групп $-\text{N}=\text{C}=\text{O}$ полиуретана с периферийными группами OH , принадлежащими наночастицам оксида графена и, как результат, с появлением межфазного сцепления полиуретанового матрикса с частицами на-

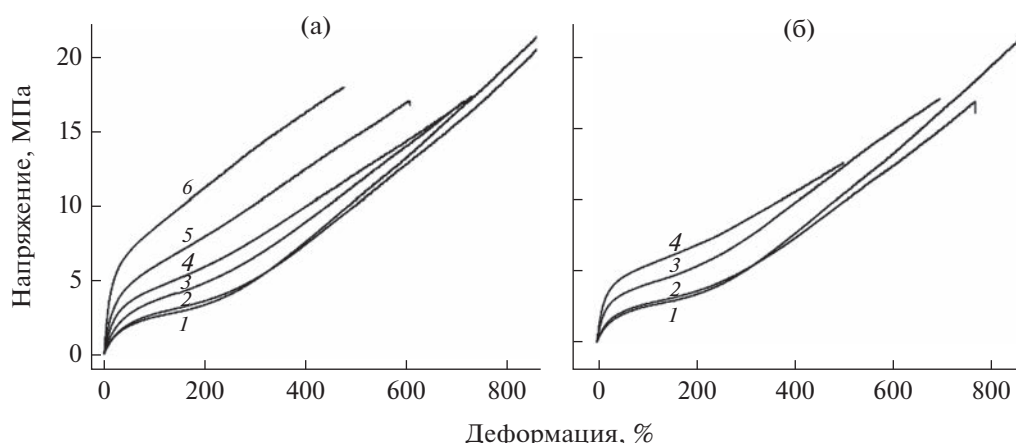


Рис. 5. Зависимости напряжения от деформации для образцов: (а) ПУ (1) и ПУ + ОГ1 (2 – 0.1% ОГ, 3 – 0.5% ОГ, 4 – 1.0% ОГ, 5 – 1.5% ОГ, 6 – 2.0% ОГ); (б) ПУ (1) и ПУ + ОГ2 (2 – 0.1% ОГ, 3 – 0.5% ОГ, 4 – 1.0% ОГ).

полнителя ГО. То есть присутствие наночастиц ГО вызывает своего рода “сшивание” полимерного латексного каркаса. Данные механических испытаний показывают также существенное влияние размера частиц ОГ на механические свойства композитов. Так для ПУ + 1% ОГ1 рассчитанный модуль Юнга составляет 18.23 МПа, а для образца содержащего 1% ОГ2 этот параметр возрастает до 30.15 МПа. Аналогичная зависимость для модуля Юнга наблюдается для всех образцов с одинаковыми концентрациями ОГ1 и ОГ2. Показатель предела прочности на разрыв увеличивается с 18.94 до 21.63 МПа при добавке 1% ОГ1.

ВЫВОДЫ

В данной работе синтезированы нанокомпозиты, полученные на основе водного полиуретанового латекса и двух видов ОГ, отличающихся средним размером частиц. Методами оптической микроскопии, элементного анализа, ИК-спектроскопии, ДСК и термогравиметрического анализа исследованы структура, состав и теплофизические свойства нанокомпозитов. Полученные композиты

показали более высокую термическую устойчивость по сравнению с исходным полимером. Значения начальной температуры разложения при 5%-й потере массы зависят от содержания ОГ в композитах и увеличиваются с 293°C до 320°C для ПУ + ОГ1 2.0% и до 313°C для ПУ + ОГ2 2.0%. Было установлено, что введение ОГ в матрицу ПУ существенно изменяет его механические свойства. Модуль упругости увеличивается почти шестикратно, т.е. пленки становятся механически более прочными, при этом наблюдается уменьшение относительного удлинения почти на 200%, что, по-видимому, связано с появлением межфазного сцепления полиуретанового матрикса с частицами ГО вследствие образования ковалентных связей изоцианатных групп $-N=C=O$ полиуретана с периферийными группами OH, принадлежащими наночастицам оксида графена. Напряжение при разрыве снижается при этом незначительно (на 10–15%). Обнаружено влияние размерного эффекта частиц ОГ на механические свойства композитов. В целом композиты с более крупными частицами ОГ имеют более высокое значение модуля Юнга, а их относительное удлинение уменьшается.

Таблица 2. Средние числовые данные механических испытаний пленок ПУ и композитов ПУ–ОГ

Содержание ОГ	Модуль Юнга, МПа		Напряжение при разрыве, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %	
	ПУ + ОГ1	ПУ + ОГ2	ПУ + ОГ1	ПУ + ОГ2	ПУ + ОГ1	ПУ + ОГ2
0%	7.55	7.55	18.94	18.94	790	790
0.1%	8.69	9.9	21.63	17.44	894	772
0.5%	11.96	18.52	15.66	16.07	678	680
1%	18.23	30.15	16.65	12.05	700	501
1.5%	25.42	—	16.66	—	640	—
2%	42.95	—	15.81	—	433	—

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий (номера государственной регистрации АААА-А19-119032690060-9 и 122040500074-1). С.А.Б. также выражает благодарность за поддержку со стороны Российского научного фонда (проект 22-13-00410).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Itapu B.M., Jayatissa A.H.* // Chem. Sci. Int. J. 2018. V. 23. Article no. CSIJ.41031.
2. *Sreenivasulua B., Ramji B.R., Nagaral M.* // Mater. Today: Proc. 2018. V. 5. P. 2419.
3. *Al Faruque M.A., Syduzzaman M., Sarkar J. et al.* // Nanomaterials. 2021. V. 11. P. 2414.
4. *Razaq A., Bibi F., Zheng X. et al.* // Materials. 2022. V. 15. P. 1012.
5. *Akindoyo J.O., Beg M.D.H., Ghazali S. et al.* // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 114453.
6. *Tian S.* // Polymers. 2020. V. 12. P. 1996.
7. *Alizadegan F., Mirabedini S.M., Pazokifard S. et al.* // Prog. Org. Coatings. 2018. V. 123. P. 350.
8. *Pokharel P., Lee D.S.* // Chemical Engineering Journal 2014. V. 253. P. 356.
9. *Akram N., Saeed M., Usman M. et al.* // Polymers. 2021. V. 13. P. 444.
10. *Sinh L.H., Luong N.D., Seppälä J.* // Plast. Rubber Compos. 2019. V. 48. P. 466.
11. *Santamaria-Echart A., Fernandes I., Barreiro F. et al.* // Polymers. 2021. V. 13. P. 409.
12. *Bao L.H., Lan Y.J., Zhang S.F.* // J. Polym. Res. 2006. V. 13. P. 507.
13. *Shulga Y.M., Baskakov S.A., Baskakova Y.V. et al.* // J. Power Sources. 2015. V. 79. P. 722.
14. *Si Y., Samulski E.T.* // Nano Lett. 2008. V. 8. P. 1679.
15. *Jeong H.K., Lee Y.P., Jin M.H. et al.* // Chem. Phys. Lett. 2009. V. 470. P. 255.
16. *Cote L.J., Cruz-Silva R., Huang J.* // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 11027.
17. *Karthika P., Rajalakshmi N., Dhathathreyan K.S.* // Soft Nanosci. Lett. 2012. V. 2. P. 59.
18. *Fu M., Jiao Q., Zhao Y., Li H.* // J. Mater. Chem. A. 2014. V. 2. P. 735.
19. *Strankowski M.B., Bodarczyk D.W., Piszczek A. et al.* // J. Spectrosc. 2016. Article ID 7520741.
20. *Wu G., Xu X., He X. et al.* // Polymers. 2018. V. 10. P. 133.
21. *Liu X., Xu K., Liu H. et al.* // Prog. Org. Coat. 2011. V. 72. P. 612.
22. *Yu D., Wang L., Sun B.* // Fibers and Polymers. 2014. V. 15. P. 208.
23. *Lu Y., Xia Y., Larock R.C.* // Progress in Organic Coatings. 2011. V. 71. P. 336.
24. *Tian C., Zhou Q., Li C. L. et al.* // Journal of Applied Polymer Science 2012. V. 124. P. 5229.
25. *Spasevska D., Daniloska V., Leal G.P. et al.* // RSC Adv. 2014. V. 4. P. 24477.
26. *Lia H., Yuan D., Lia P. et al.* // Composites Part A. 2019. V. 121. P. 411.