

УДК 541.64:539.3:532.135

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ ПЭНП С РАЗЛИЧНЫМИ НАНОУГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

© 2024 г. М. М. Гасымов^а, Т. И. Мединцева^а, С. З. Роговина^{а,*},
О. П. Кузнецова^а, А. В. Шапагин^б, А. А. Берлин^а

^аФедеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук
119991 Москва, ул. Косыгина, 4, Россия

^бИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук
119991 Москва, Ленинский пр., 31., стр. 4, Россия

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

Поступила в редакцию 23.01.2024 г.

После доработки 26.02.2024 г.

Принята к публикации 06.03.2024 г.

В твердой фазе под действием сдвиговых деформаций в роторном диспергаторе получены наполненные композиции полиэтилена низкой плотности с нанокремнеземными наполнителями — нанопластинами графита и восстановленным оксидом графена различного состава. Методом сканирующей электронной микроскопии показано различие структуры полученных наноконструкций. Проведено сравнительное изучение механических свойств, пористости и реологического поведения композиций. Продемонстрировано влияние природы графеновых нанонаполнителей и состава композиций на характеристики образующихся материалов.

DOI: 10.31857/S2308112024010061 EDN: NLJALJ

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы резко возрос интерес к получению наполненных композиционных материалов на основе полимеров разных классов, в частности полиэтилена, содержащих графен и его производные.

Разработка различных полимерных композиций с использованием материалов на основе графена для потенциально широких областей и возможного применения, как и совершенствование существующих методов их получения, является в настоящее время одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений современного материаловедения [1–5].

Введение жестких неорганических частиц, к которым относятся графен и его производные, в термопластичные полимеры приводит к увеличению модуля упругости, улучшению термостойкости и электропроводности материалов [6, 7], проявлению ими магнитных свойств [8, 9], снижению горючести [10], а также антибактериальной [11] и противогрибковой [12] активности. Именно с этими обстоятельствами связан постоянно возрастающий интерес к изучению

и проведению сравнительной оценки свойств полимерных композиций, содержащих различные нанокремнеземные добавки.

Помимо традиционных растворных или расплавных способов получения композиций используются и такие методы, как получение коллоидных суспензий углеродных производных или растворение полимера в их суспензии, а также твердофазное смешение под действием сдвиговых деформаций. Основной проблемой при получении наноконструкций является обеспечение хорошей дисперсности графеновых производных в полимерной матрице.

Одни из наиболее широко используемых углеродных наполнителей — нанопластины графита и восстановленный оксид графена [13–15].

Нанопластины графита представляют собой терморасширенный графит, образующийся в результате термического воздействия на интеркалированные соединения графита, имеющие пористую структуру, состоящую из нескольких графеновых слоев [16, 17]. Нанопластины графита, будучи значительно дешевле монослойного графена, могут успешно использоваться в качестве нанонаполнителей.

В то же время восстановленный оксид графена, образующийся при восстановлении оксида графена, сопровождающегося удалением содержащихся в нем различных кислородосодержащих заместителей, по своим свойствам близок к свойствам чистого графена [18].

Ранее нами в работе [19] было проведено сравнительное изучение влияния нанопластин графита и восстановленного оксида графена на механические, электрические и структурные характеристики их композиций с полилактидом, и продемонстрирована зависимость свойств композиций от природы используемых нанонаполнителей.

В то же время получение композиций ПЭНП и ПЭВП, содержащих в качестве наполнителя нанопластины графита и восстановленный оксид графена представлено в литературе относительно небольшим количеством работ.

Так, в работе [20] композиции ПЭНП–нанопластины графита были получены в двухшнековом экструдере при различных скоростях вращения шнеков. Было показано, что увеличение скорости вращения шнеков приводит к улучшению распределения наночастиц нанопластин графита в полимерной матрице, а также значительному возрастанию теплопроводности и термостабильности образующихся композиций.

В работе [21] композиции ПЭНП с терморасширяющимся графитом были получены в смесителе Брабендера. При этом его эксфолиация происходила непосредственно в расплаве ПЭНП в процессе смешения. Установлено, что введение нанонаполнителя приводит к снижению механических характеристик, за исключением модуля Юнга, и значительному увеличению термической стабильности. Аналогичные результаты были описаны в работе [22].

Теплофизические свойства композиций ПЭНП–нанопластины графита, полученных в условиях высокотемпературных сдвиговых деформаций, были изучены в работе [23]. Показано, что добавление нанопластин графита приводит к снижению температур стеклования и холодной кристаллизации, а также уменьшению степени кристалличности ПЭНП и увеличению его термостабильности.

Смешение ПЭВП с углеродными нанонаполнителями рассмотрены в статьях [24–26].

Настоящая работа является продолжением проводимых авторами исследований комплекса свойств и структурных особенностей композиций на основе ПЭНП, содержащих углеродные нанонаполнители [27].

Цель проведенных исследований – получение в твердой фазе методом высокоинтенсивных сдвиговых деформаций композиционных полимерных материалов, содержащих различные углеродные нанонаполнители, изучение механических и реологических свойств, а также пористости и структурных особенностей образующихся композиций. Преимуществами данного метода является как возможность достижения повышенной дисперсности распределения наполнителей в полимерной фазе, улучшающей его основные характеристики, так и отсутствие необходимости утилизации и удаления жидкой фазы растворителей, что способствует улучшению экологии окружающей среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования служил полиэтилен низкой плотности Riblene FC30 (“Polimeri Europa”, Италия), с $M_n = 16.3 \times 10^3$, $M_w = 82.2 \times 10^3$, $M_z = 245 \times 10^3$, плотностью 0.919 г/см^3 и показателем текучести расплава 2.1 г/10мин (190°C , 2.16 кг).

В качестве наполнителей использовали восстановленный оксид графена и нанопластины графита производства “XG Sciences” (Michigan State University, США).

Синтез восстановленного оксида графена осуществляли в несколько стадий согласно работе [28]: вначале окислением кристаллического графита раствором KMnO_4 в кислой среде по методу Хаммерса синтезировали оксид графита, из которого в дальнейшем восстановлении был получен восстановленный оксид графена.

Термическое восстановление оксида графита проводили в трубчатой печи в атмосфере аргона при температуре 900°C , где происходило взрывообразное разложение оксида графита с выделением газообразных CO , CO_2 и H_2O и образованием значительно увеличенного в объеме твердого продукта – восстановленного оксида графена [28].

Композиции ПЭНП–восстановленный оксид графена и ПЭНП–нанопластины графита получали смешением компонентов под действием сдвиговых деформаций в одношнековом роторном диспергаторе со скоростью вращения шнека 45 об./мин путем однократного пропуска смеси при температурах выше температуры плавления ПЭНП для того, чтобы уменьшить вязкость ПЭНП и облегчить его прохождение через экструдер. При этом необходимо отметить, что измельчение ПЭНП и смешение компонентов под действием сдвиговых деформаций протекает именно в твердом состоянии в охлаждаемой головке роторного диспергатора при температурах

ниже температуры плавления ПЭНП, где и происходит образование композиций. Таким образом, смешение ПЭНП с углеродными наполнителями осуществляется непосредственно в твердой фазе. Время пребывания материала в диспергаторе составляло около 5 мин, загрузку осуществляли через определенные временные интервалы. Концентрация нанонаполнителей в смесях варьировалась от 0.05 до 1.00 мас. %.

Для проведения исследований свойств полученных композиций использовали пленки образцов толщиной 0.3 мм, полученных на лабораторном прессе “Carver” (США) при температуре 190°C и давлении 10 МПа в течение 10 мин с последующим охлаждением водой до комнатной температуры со скоростью 20°C/мин.

Фазовую структуру композиций исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием сканирующего электронного микроскопа “JEOL JSM 6060A” (Япония). Во вторичных электронах при ускоряющем напряжении 15 кэВ получены СЭМ-изображения, характеризующие морфологию поверхности сколов пленок образцов. Предподготовка заключалась в магнетронном напылении золота в среде аргона на поверхность образца с целью получения токопроводящей пленки толщиной менее разрешающей способности электронного сканирующего микроскопа.

Механические испытания полученных композиций проводили на разрывной машине “Instron-3365” (Великобритания) в режиме одноосного растяжения при постоянной скорости перемещения верхней траверсы 50 мм/мин и комнатной температуре. Из диаграмм деформации определяли модуль упругости E по начальному участку кривой, предельную прочность σ_p и относительное удлинение ϵ_p . Результаты усредняли по шести–семи образцам. Погрешность измерения модуля упругости и предела прочности не превышала 10%, а удлинения при разрыве — 20%.

Методом рентгеновской микротомографии, позволяющей изучать внутренний объем объекта без разрушения образца, исследовали композиции ПЭНП с нанонаполнителями [29]. Сканирование образцов выполняли на микротомографе “Bruker SkyScan 1172” (Бельгия) в течение 3 ч. Морфометрический анализ и расчет пористости осуществляли с использованием программы STAN.

Реологическое поведение изучали при 190 °С в режиме постоянной нагрузки на капиллярном микровискозиметре, сконструированном на основе ИИРТ-5 (Россия). Были получены кривые течения, из которых рассчитывали зависимости эффективной сдвиговой вязкости η от напряже-

ния сдвига τ для исходного ПЭНП и его композиций в при течении через капилляр с отношением его длины к диаметру, равным 15. Дополнительные эксперименты показали, что в данном случае входовой поправкой можно пренебречь. Результаты экспериментов усредняли по двум–трем измерениям и обрабатывали по общепринятой методике [30]. Погрешность измерений не превышала 10%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение по размерам частиц нанонаполнителей восстановленного оксида графена и нанопластин графита было исследовано методом лазерной дифракции, описанное нами ранее в работе [19]. Определяемые этим методом эффективные размеры частиц усредняли по трем направлениям пространственных осей, и находятся для нанопластин графита в интервале от 2 до 88 мкм (средний размер ~22 мкм), а частиц восстановленного оксида графена — в интервале 0.3 до 80 мкм (средний размер ~25 мкм).

В данной работе с использованием метода СЭМ было проведено сравнительное изучение морфологии полученных композиций, содержащих 0.25 мас. % нанонаполнителей. На рис. 1 представлены микрофотографии поверхностей сколов композиций ПЭНП–нанопластины графита (рис. 1а) и ПЭНП–восстановленный оксид графена (рис. 1б).

Видно, что образец ПЭНП–нанопластины графита содержит чешуйчатые агломераты нанопластин графита размером 4–5 мкм, неравномерно распределенные в полимерной матрице (рис. 1а). В то же время в композиции ПЭНП–восстановленный оксид графена присутствуют более мелкие и однородно распределенные червеобразные частицы наполнителя с гофрированной поверхностью, диаметр поперечного сечения которых составляет ~0.2 мкм, т.е. размер частиц нанонаполнителей, распределенных в матрице термопласта, значительно меньше размера частиц порошков наполнителей.

Таким образом, при твердофазном смешении ПЭНП с нанонаполнителями в роторном диспергаторе под действием сдвиговых деформаций происходит измельчение нанопластин графита и восстановленного оксида графена.

На рис. 2 представлены зависимости деформационных характеристик исследованных композиций от содержания наполнителя.

Как видно, для обеих систем введение нанонаполнителей приводит к возрастанию модуля E и снижению предельно-прочностных параметров. Необходимо отметить, что увеличение

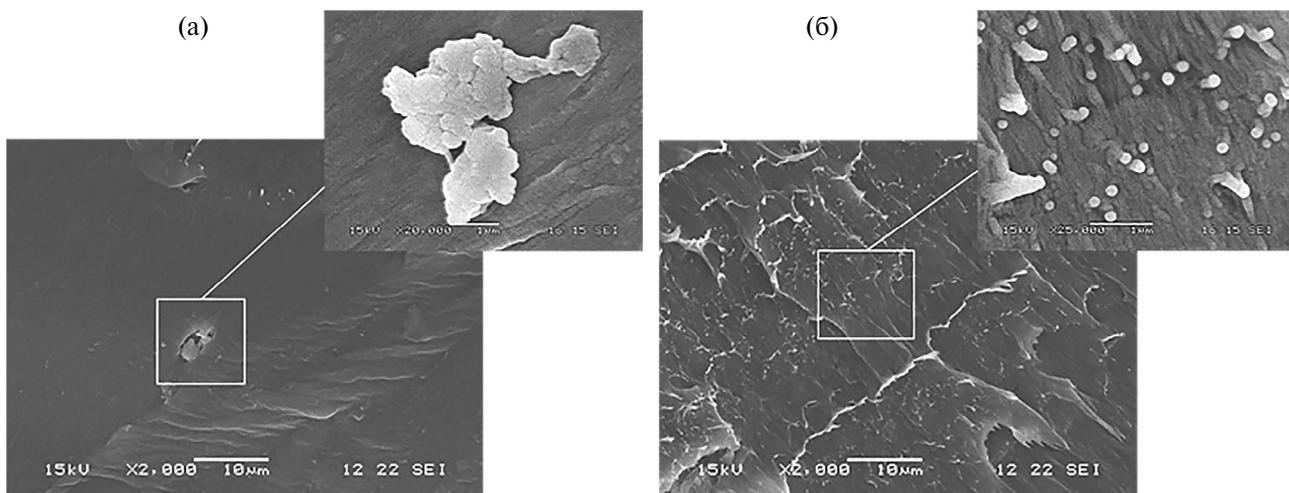


Рис. 1. Микрофотографии сколов пленок композиций ПЭНП–нанопластины графита (а) и ПЭНП–восстановленный оксид графена (б), содержащих 0.25 мас. % наполнителя. Увеличение фрагментов изображений 20000 (а) и 25000 (б).

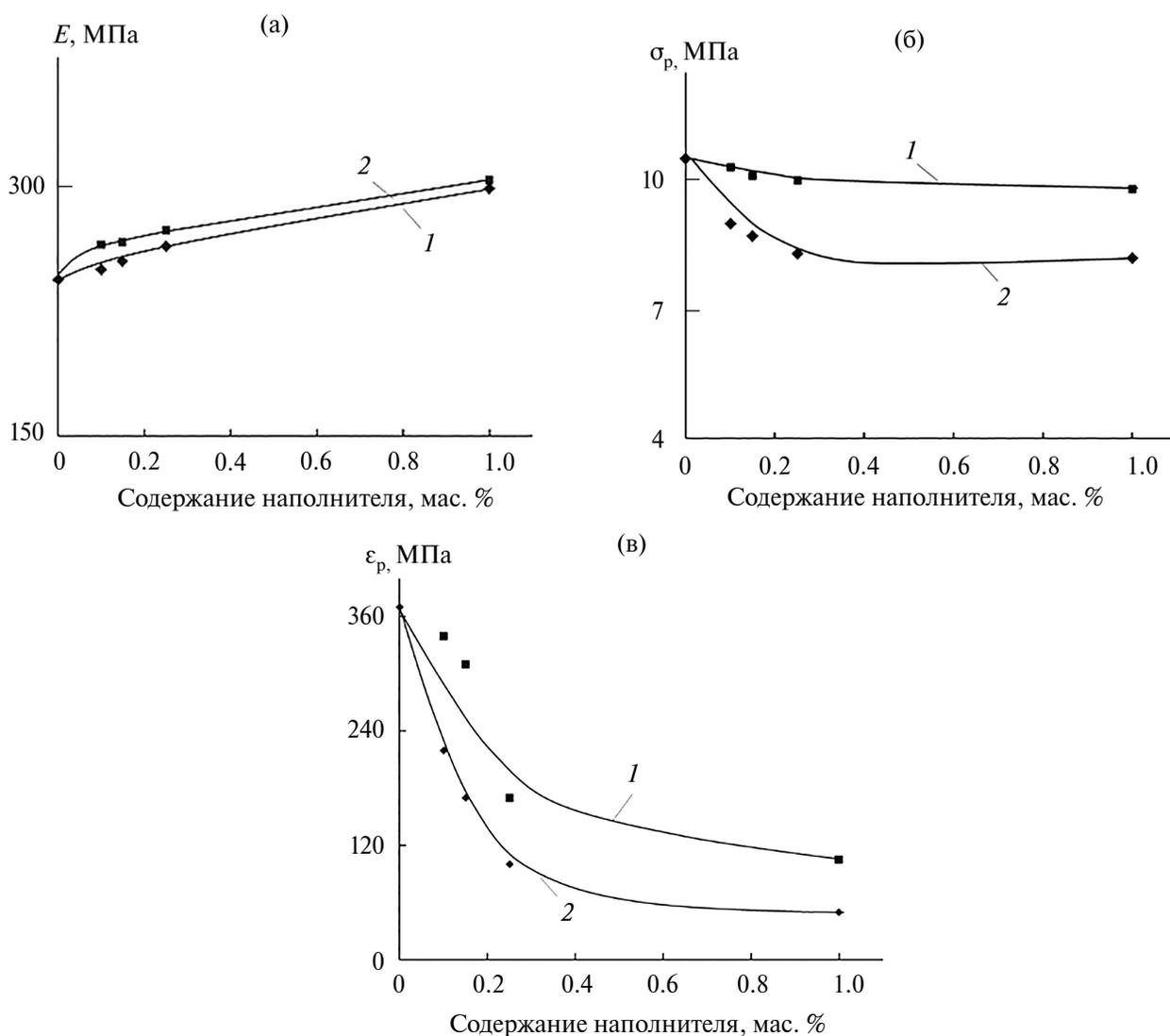


Рис. 2. Зависимости модуля упругости E (а), предела прочности σ_p (б) и удлинения при разрыве ϵ_p (в) от содержания нанопластин графита (1) и восстановленного оксида графена (2) для исследованных композиций.

содержания восстановленного оксида графена в композициях в большей степени влияет на снижение предельной прочности σ_p и удлинения при разрыве ϵ_p , чем в случае использования нанопластин графита.

Очевидно, что на значения механических параметров исследуемых композиций также влияет пористость материала.

Зависимость количества пор в композициях от содержания нанонаполнителей приведена на рис. 3.

Видно, что пористость всех исследованных композиций возрастает с увеличением содержания нанонаполнителей, причем пористость композиций, содержащих восстановленный оксид графена, выше, чем аналогичных композиций, в состав которых входит нанопластина графита.

Необходимо отметить, что, если при низких концентрациях количество пор в композициях ПЭНП–восстановленный оксид графена существенно превышает их количество в композициях ПЭНП–нанопластины графита аналогичного состава, то значения пористости композиций при содержании наполнителя выше 0.25 мас. %, близки между собой. Это может быть связано с агрегацией плоских частиц нанопластин графита при повышении их концентрации и, как следствие, возрастанием свободного объема (увеличением пористости). Таким образом, полученные результаты коррелируют с данными механических испытаний, согласно которым величины прочностных характеристик композиций ПЭНП–нанопластины графита выше для всех образцов по сравнению с композициями ПЭНП–восстановленный оксид графена. Наблюдаемые более высокие значения пористости композиций, содержащих восстановленный оксид графена, являются также причиной существенного падения значений удлинения при разрыве этих композиций.

На рис. 4 приведены зависимости эффективной сдвиговой вязкости $lg\eta$ расплавов ПЭНП, наполненных композитов ПЭНП–нанопластины графита (рис. 4а) и ПЭНП–восстановленный оксид графена (рис. 4б) от напряжения сдвига lgt .

В изученном сдвиговом диапазоне ПЭНП и его композиции с углеродными наполнителями ведут себя как неньютоновские жидкости, т.е. данные материалы демонстрируют нелинейное реологическое поведение, и их вязкость монотонно убывает с увеличением напряжения сдвига.

Снижение напряжения сдвига в области $lgt \leq 3.5$ МПа приводит к резкому возрастанию вязкости ПЭНП–восстановленный оксид графена (рис. 4б), при этом наблюдается тенденция к появлению предела текучести. Как упоминалось выше, частицы восстановленного оксида графена

имеют меньший размер и более равномерно распределяются в матрице ПЭНП. Вероятно, с увеличением содержания восстановленного оксида графена в композициях формируется трехмерный структурный каркас по сравнению с композициями ПЭНП–нанопластины графита, частицы которого крупнее и неравномерно распределены в термопластичной матрице, особенно при сверхмалых концентрациях. Недеформируемые твердые частицы гидродинамически затрудняют течение полимерной матрицы, что и приводит к появлению предела текучести [31]. Это наглядно демонстрируют композиции ПЭНП–восстановленный оксид графена.

Добавление 0.05 мас. % нанопластин графита практически не влияет на вязкость ПЭНП, однако восстановленный оксид графена в таком же количестве в большей степени повышает его реологические показатели. Вероятно, при таких сверхмалых концентрациях относительно крупные частицы нанопластин графита распределены крайне неоднородно и не влияют на течение расплава ПЭНП в отличие от восстановленного оксида графена, незначительные добавки которого структурируют композит и повышают его вязкость. Реологическое поведение композиций, содержащих от 0.10 до 0.25 мас. % нанопластин графита или восстановленного оксида графена, практически не зависит от содержания наполнителя. Исключением является ПЭНП, содержащий 0.15 мас. % восстановленного оксида графена, вязкость которого близка к вязкости самого термопласта. Дальнейшее увеличение концентрации до 1.0 мас. % приводит к существенному возрастанию эффективной сдвиговой вязкости композиций.

Количество пор, об./%

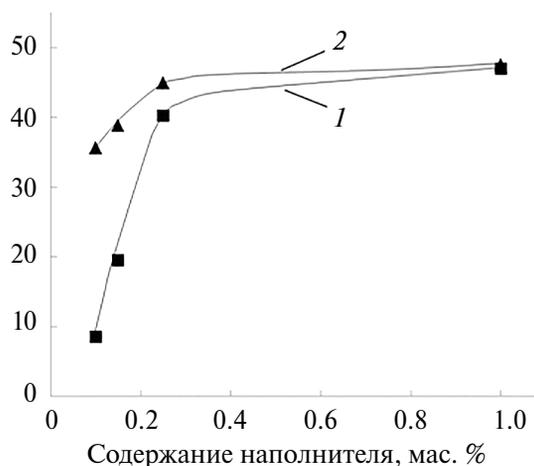


Рис. 3. Зависимость количества пор в исследованных композициях от содержания нанопластин графита (1) и восстановленного оксида графена (2).

В качестве примера на рис. 5 представлены сравнительные зависимости эффективной сдвиговой вязкости расплавов композиций ПЭНП с одинаковым содержанием нанонаполнителей.

Видно, что во всем исследованном диапазоне напряжений сдвига вязкость композиций ПЭНП–нанопластины графита ниже, чем композиций ПЭНП–восстановленный оксид графена (рис. 5а и 5в). Однако для композиций ПЭНП, содержащих 0.15 мас. % наполнителя, наблюда-

ется инверсия. Обнаружено, что в данном случае вязкость композиций ПЭНП–восстановленный оксид графена ниже, чем у композиций ПЭНП–нанопластины графита (рис. 5б). Исключение составляет начальный участок кривой, характеризующийся резким возрастанием вязкости композиций ПЭНП–восстановленный оксид графена с последующей тенденцией к достижению предела текучести. Как было отмечено выше, вязкость данной композиции практически совпадает

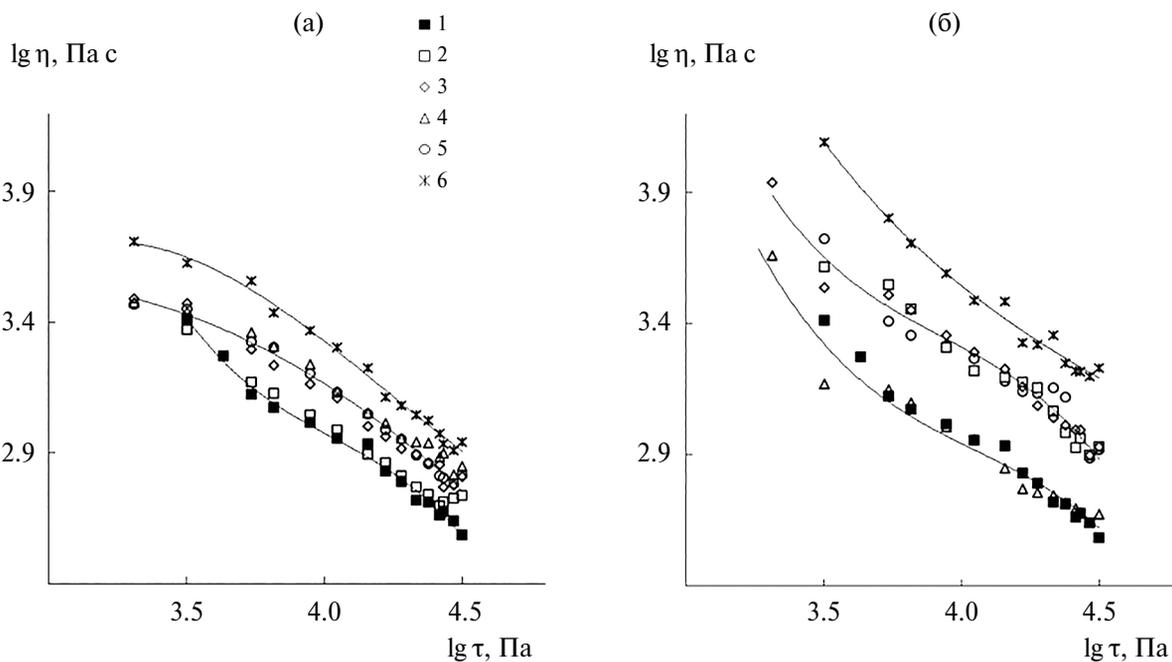


Рис. 4. Логарифмические зависимости вязкости ПЭНП, композиций ПЭНП–нанопластины графита (а) и ПЭНП–восстановленный оксид графена (б) от напряжения сдвига. Содержание наполнителя 0 (1), 0.05 (2), 0.10 (3), 0.15 (4), 0.25 (5) и 1.0 мас. % (6).

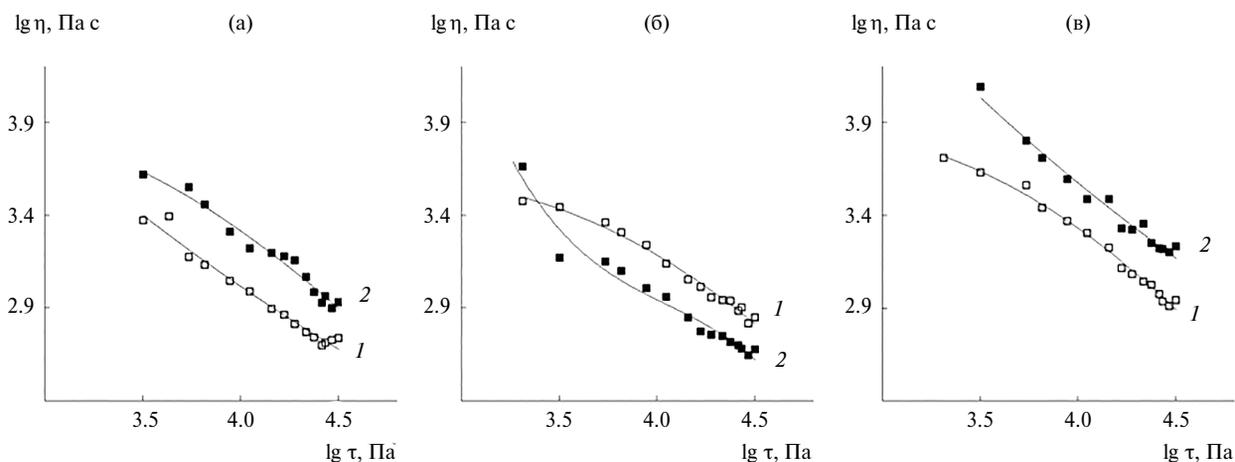


Рис. 5. Сравнительные зависимости вязкости композиций ПЭНП–нанопластины графита (1) и ПЭНП–восстановленный оксид графена (2). Содержание наполнителя 0.05 (а), 0.15 (б) и 1.0 мас. % (в).

с вязкостью исходного ПЭНП, что является исключением из всех исследованных композиций, содержащих восстановленный оксид графена.

Более наглядно зависимости эффективной сдвиговой вязкости расплавов исследованных композиций от содержания углеродных наполнителей демонстрирует рис. 6.

Видно, что вязкость композиций ПЭНП–нанопластины графита монотонно возрастает с увеличением содержания НПП (рис. 6а), в то время как на соответствующих кривых композиций ПЭНП–восстановленный оксид графена наблюдается минимум вязкости при концентрации наполнителя 0.15 мас. % (рис. 6б).

Эффект снижения вязкости композитов, содержащих малые добавки наполнителя, отмечали ранее в работах, описывающих реологическое поведение полипропилена, наполненного резиновой крошкой [32] и серебряным порошком [33]. Данный эффект, по мнению авторов, обусловлен структурой наполненных композитов ПП и особенностями механизма их течения. В работе [34] при исследовании реологического поведения расплавов ПП с модифицированным монтмориллонитом также было обнаружено снижение вязкости полимерной системы при определенной концентрации наполнителя. Необходимо отметить, что этот эффект усиливался с повышением скорости сдвига, что, по мнению авторов, объясняется снижением гидродинамического сопротивления системы ориентированных плоских анизодиаме-

тричных частиц, к которым относятся слоистые силикаты. Для объяснения такого аномального снижения вязкости наполненных полимерных материалов была исследована зависимость их реологического поведения от морфологии, формирующейся в процессе течения расплавов [35]. Установлено, что однородно распределенные частицы наполнителя в матрице полимера образуют регулярную структуру, обуславливающую особенности реологического поведения расплавов композитов.

На основе полученных результатов и анализа литературных данных можно предположить, что при течении расплава ПЭНП, содержащего 0.15 мас. % восстановленного оксида графена, происходит изменение структуры композиции. Частицы нанонаполнителя, вероятно, образуют протяженные ориентированные в потоке агломераты, что и приводит к снижению эффективной сдвиговой вязкости гетерофазной системы, содержащей 0.15 мас. % восстановленного оксида графена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под действием сдвиговых деформаций в роторном диспергаторе экологически чистым твердофазным способом в отсутствие растворителя получены композиции ПЭНП с углеродными нанонаполнителями нанопластинами графита и восстановленного оксида графена в интервале концентраций 0.05–1.0 мас. %.

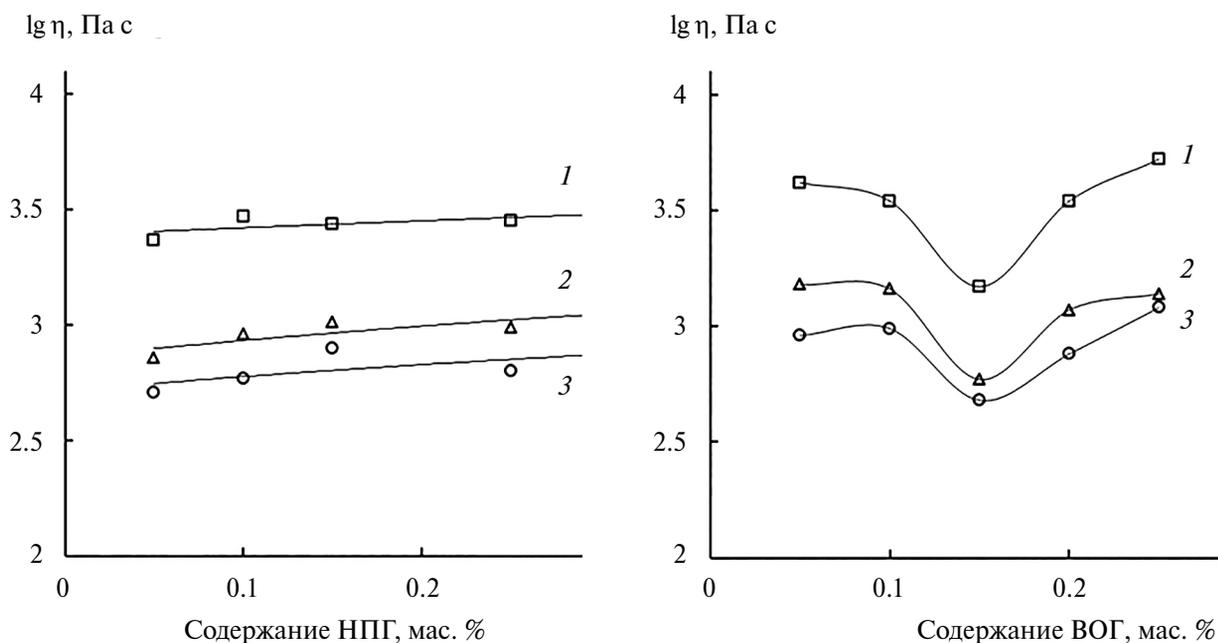


Рис. 6. Зависимость вязкости композитов ПЭНП–нанопластины графита (а) и ПЭНП–восстановленный оксид графена (б) от содержания наполнителя при напряжении сдвига $\lg \tau = 3.50$ (1), 4.22 (2) и 4.33 Па (3).

Методом СЭМ установлено, что в композициях ПЭНП–нанопластины графита присутствуют чешуйчатые агломераты нанопластин графита размером 4–5 мкм, неравномерно распределенные в полимерной матрице, тогда как в композиции ПЭНП–восстановленный оксид графена наблюдаются более мелкие и однородно распределенные частицы наполнителя с размером ~0.2 мкм, обуславливающие различия в пористости, механических характеристиках и реологическом поведении исследуемых систем.

Исследование структуры методом рентгеновской микротомографии показало, что композиции, содержащие в качестве наполнителя восстановленный оксид графена, обладают более высокими значениями пористости, по сравнению с композициями, содержащими нанопластины графита, что связано с различиями в структуре используемых нанонаполнителей.

При исследовании механических свойств композиций было показано, что введение графеновых наполнителей в термопластичный ПЭНП за счет межфазного взаимодействия приводит к увеличению модуля упругости полученных материалов. Установлено, что композиции ПЭНП–нанопластины графита обладают более высокими значениями механических параметров, чем композиции ПЭНП–восстановленный оксид графена вследствие структурных различий нанопластин графита и восстановленного оксида графена.

Исследование реологического поведения композиций ПЭНП, содержащих углеродные наполнители, показало, что их малые добавки оказывают существенное влияние на вязкость материалов, при этом важным фактором является также и природа используемого наполнителя. Установлено, что эффективная сдвиговая вязкость композиций ПЭНП–восстановленный оксид графена в исследованном диапазоне напряжений сдвига выше, чем вязкость композиций, содержащих нанопластины графита. Исключением является образец, содержащий 0.15 мас. % восстановленного оксида графена, вязкость которого несколько ниже. Эффект снижения вязкости, вероятно, определяется изменением структуры данного композита.

Полученные результаты позволяют целенаправленно регулировать свойства полученных твердофазным способом композиций на основе ПЭНП, содержащих графеновые наполнители различной природы.

Композиционные материалы на основе ПЭНП и углеродных наполнителей могут быть использованы в производстве солнечных панелей, аккумуляторов и суперконденсаторов и т.д.

Работа выполнена по Государственному заданию Федерального исследовательского центра химической физики РАН (Регистрационный номер НИОКТР 122040400099-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mohammad H., Stepashkin A.A., Tcherdyntsev V.V.* // *Polymer*. 2022. V. 14. P. 399.
2. *Teng C.-C., Ma C.-C. M., Lu C.-H., Yang S.-Y., Lee S.-H.* // *Carbon*. 2011. V. 49. P. 5107.
3. *Hofmann D., Thomann R., Mülhaupt R.* // *Macromol. Mater. Eng.* 2017. V. 303. P. 1700324.
4. *Olowojoba G.B., Kopsidas S., Eslava S., Gutierrez E.S., Kinloch A.J., Mattevi C., Rocha V.G., Taylor A.C.* // *J. Mater. Sci.* 2017. V. 52. № 12. P. 7323.
5. *Basha S.K.S., Kumar K.V., Sundari G.S., Rao M.C.* // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. V. 2018. P. 11.
6. *Abidin A.S.Z., Yusoh K., Jamari S.S., Abdullah A.H., Zulhelmi I.* // *Polym. Bull.* 2017. V. 75. № 8. P. 3499.
7. *Xing L., Wang Y., Wang S., Zhang Y., Mao S., Wang G., Liu J., Huang L., Li H., Belfiore L.A., Tang J.* // *Polymers*. 2018. V. 10. № 6. P. 613.
8. *Kashi S., Gupta R.K., Baum T., Kao N., Bhattacharya S.N.* // *Mater. Des.* 2016. V. 109. P. 68.
9. *Bagotia N., Choudhary V., Sharma D.K.* // *J. Mater. Sci.* 2018. V. 53. № 23. P. 16047.
10. *Zhang Q., Wang Y.C., Bailey C.G., Yuen R.K.K., Parkin J., Yang W., Valles C.* // *Compos. B. Eng.* 2018. V. 146. P. 76.
11. *Kang Y., Wang C., Shi X., Zhang G., Chen P., Wang J.* // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 451. P. 315.
12. *Montes S., Etxeberria A., Mocholi V., Rekondo A., Grande H., Labidi J.* // *Express Polym. Lett.* 2018. V. 12. № 6. P. 543.
13. *Potts J.R., Dreyer D.R., Bielawski C.W., Ruoff R.S.* // *Polymers*. 2011. V. 52. P. 5.
14. *Stankovich S., Dikin D.A., Dommett G.H.B., Kohlhaas K.M., Zimney E.J., Stach E.A., Piner R.D., Nguyen S.T., Ruoff R.S.* // *Nature*. 2006. V. 442. P. 282.
15. *Ramanathan T., Abdala A., Stankovich S., Dikin D., Herrera-Alonso M., Piner R., Adamson D., Schniepp H., Chen X., Ruoff R.* // *Nat. Nanotechnol.* 2008. V. 3. P. 327.
16. *Chen G., Wu D., Weng W., Culling W.* // *Carbon*. 2003. № 41. P. 619.
17. *Arslanov V.V., Kalinina M.A., Ermakova E.V., Raitman O.A., Gorbunova Y.G., Aksyutin O.E., Ishkov A.G., Grachev V.A., Tsivadze Y.A.* // *Chem. Rev.* 2019. V. 88. P. 775.
18. *Stankovich S., Dikin D.A., Piner R.D., Kohlhaas K.A., Kleinhammes A., Jia Y., Wu Y., Nguyen S.B.T., Ruoff R.S.* // *Carbon*. 2007. V. 45. P. 1558.
19. *Роговина С.З., Гасымов М.М., Ломакин С.М., Кузнецова О.П., Шевченко В.Г., Арбузов А.А., Берлин А.А.* // *Хим. физика*. 2023. Т. 42. № 11. С. 70.
20. *Khanam P.N., AlMaadeed M.A., Ouederni M., Harkin-Jones E., Mayoral B., Hamilton A., Sun D.* // *Vacuum*. 2016. V. 130. P. 63.
21. *Wu H., Lu C., Zhang W., Zhang X.* // *Mater. Des.* 2013. V. 52. P. 621.

22. *Che J., Wu K., Lin Y., Wang K., Fu Q.* // *Compos. A* 2017. V. 99. P. 32.
23. *Yusof M.A., Rahman N.H.N., Izirwan I., Desa M.S.Z.M., Ghani N.F.A.* // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 4th International Symposium on Civil and Environmental Engineering. "Development of Graphene Oxide/Polyethylene to enhance mechanical properties through melt mixing technique". Online. 2023. V. 1205. 012033.
24. *Sahu S.K., Sreekanth P.S.R.* // *Adv. Mater. Process. Technol.* 2022. V. 8. P. 2086.
25. *López-González M., Flores A., Marra F., Ellis G., Gómez-Fatou M., Salavagione H.J.* // *Polymers.* 2020. V. 12. P. 2094.
26. *Graziano A., Jaffer S., Sain M.* // *J. Polym. Eng.* 2019. V. 39. P. 85.
27. *Hari B.S., Kumar K.V.M., Krishnamurthy K., Kumar P.S., Gobinath V.K., Sachinbala R., Rajasekar R.* // *Mater. Today.* 2020. V. 39. P. 1.
28. *Арбузов А.А., Мурадян В.Е., Тарасов Б.П., Соколов Е.А., Бабенко С.Д.* // *Журн. физ. химии.* 2016. Т. 90. № 5. С. 663.
29. *Жорина Л.А., Кузнецова О.П., Роговина С.З., Владимиров Л.В., Грачев А.В., Прут Э.В., Берлин А.А.* // *Хим. физика.* 2018. Т. 37. №. 12. С. 74.
30. *Малкин А.Я., Чалых А.Е.* Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. М.: Химия, 1979.
31. *Vinogradov G.V., Malkin A.Y.* *Rheology of Polymers.* Moscow: Mir, 1980.
32. *Pрут E., Kuznetsov O.P., Karger-Kocsis J., Solomatin D.* // *J. Reinf. Plast. Compos.* 2012. V. 31. P. 1758.
33. *Ghosh K., Maiti S.N.* // *Polym. Plast. Technol. Eng.* 1997. V.36. P.703.
34. *Kulichikhin V.G., Tsamalashvili L.A., Plotnikova E.P., Barannikov A.A., Kerber M.L., H. Fischer* // *Polymer Science A.* 2003. V. 45. № 6. P. 564.
35. *Kulichikhin V.G., Semakov A.V., Karbushev V.V., Platé N.A., Picken S.J.* // *Polymer Science A.* 2009. V.51. № 11–12. P. 1303.