

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 541.64:678.742.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-5-433-440>

Поступило в редакцию 06.03.2023
Received 06.03.2023

В. М. Шаповалов¹, Д. Л. Подобед², С. В. Зотов¹, А. А. Бойко³

¹*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук
Беларуси, Гомель, Республика Беларусь*

²*Институт профессионального образования Университета гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Гомель, Республика Беларусь*

³*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
Гомель, Республика Беларусь*

**О МЕХАНИЗМЕ УПРОЧНЕНИЯ СМЕСЕЙ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ
В ПРИСУТСТВИИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ**

Аннотация. Целью работы было получение и исследование полимерных композиционных материалов на основе смесей вторичных полиолефинов и модифицированной полидисперсной бентонитовой глины. Проведены исследования особенностей структурообразования смесей вторичных полиолефинов в присутствии наполнителя этого типа. Представлены данные об изменениях механической прочности смесевых композитов, а также результаты физико-химических исследований. Для смесей на основе вторичных полимеров в присутствии высокодисперсных частиц модифицированного полидисперсного бентонита характерно улучшение прочности композитов вследствие усиления в них межфазного взаимодействия и формирования структурной однородности материала. Это в некоторой степени компенсирует потерю когезионной прочности вторичных полимеров из-за термодеструкционных процессов. Сделаны следующие выводы: на границах раздела фаз происходит уменьшение молекулярной подвижности полимерных цепей, что ведет к изменению условий кристаллизации и к возникновению неравновесного напряженного состояния; введение бентонита обуславливает рост кристалличности за счет инициирования физико-химического взаимодействия; рост прочности происходит вследствие усиления межфазного взаимодействия и структурной однородности; механизм формирования комплекса свойств композитов состоит в двухуровневой адсорбции – модификатора на частицах наполнителя и активных групп полимера на поверхности модифицированного наполнителя.

Ключевые слова: композиты, полиолефины, бентонит, модифицирование, механическая прочность, межфазные взаимодействия

Для цитирования. О механизме упрочнения смесей вторичных полиолефинов в присутствии модифицированной бентонитовой глины / В. М. Шаповалов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 5. – С. 433–440. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-5-433-440>

Victor M. Shapovalov¹, Denis L. Podobed², Sergey V. Zotov¹, Andrei A. Boyko³

¹*V. A. Bely Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus,
Gomel, Republic of Belarus*

²*Institute of Professional Education of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations
of the Republic of Belarus, Gomel, Republic of Belarus*

³*Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus*

**HARDENING MECHANISM OF WASTE POLYOLEFIN MIXTURES IN THE PRESENCE
OF MODIFIED BENTONITE CLAY**

Abstract. The aim of the work is to obtain and study polymer composite materials based on mixtures of secondary polyolefins and modified polydisperse bentonite clay. The formation features of the structure of mixtures of waste polyolefins in the presence of this-type filler are studied. The data on the changes in the mechanical strength of mixed composites, as well as the results of physico-chemical studies are presented. Mixtures based on waste polymers in the presence of highly dispersed particles of modified polydisperse bentonite are characterized by the improvement of the strength of composites due to increased interfacial interaction in them and by the formation of structure uniformity of the material. This to some extent compensates for the loss of cohesive strength of secondary polymers due to thermal degradation processes. The following conclu-

sions are made: at the phase boundaries, the molecular mobility of polymer chains decreases, which leads to changing the crystallization conditions and to appearing a nonequilibrium stress state; introducing bentonite increases crystalline due to the initiation of physico-chemical interaction; the strength grows due to increased interfacial interaction and structure uniformity; the formation mechanism of a complex of properties of composites consists of two-level adsorption – a modifier on filler particles and active polymer groups on the modified filler surface.

Keywords: composites, polyolefins, bentonite, modification, mechanical strength, interfacial interactions

For citation. Shapovalov V. M., Podobed D. L., Zotov S. V., Boyko A. A. Hardening mechanism of waste polyolefin mixtures in the presence of modified bentonite clay. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 5, pp. 433–440 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-5-433-440>

Введение. Уникальность смесей полимеров заключается в том, что они зачастую не только сохраняют свойства исходных компонентов смеси, но и могут приобретать новые свойства, которыми не обладает ни один из исходных компонентов [1]. Характерной особенностью полимеров разного химического состава является их неудовлетворительная термодинамическая и/или технологическая взаимная совместимость, что влечет за собой невозможность сформировать однофазные смеси при большинстве известных вариантов совместной переработки. Известно, что полимерные отходы во многих случаях представляют собой произвольно сформировавшиеся механические смеси полимеров в самых разных сочетаниях – примером являются отходы многослойных пленок, применявшихся в качестве упаковочных материалов [2]. Во вторичных полимерах всегда присутствуют разнообразные структурные дефекты, возникшие в результате протекания окислительных и механодеструкционных процессов при их переработке и эксплуатации. С одной стороны, дефектность структуры негативно влияет на уровень технологичности повторной переработки (рециклинга) полимерных отходов и физико-механические характеристики получаемых из них материалов. С другой – наличие дефектов (таких, как кислородсодержащие группы или свободнорадикальные осколки макромолекул) в некоторой степени придает вторичным полимерам повышенную физико-химическую активность. Справедливо предположить, что данный феномен может быть продуктивно использован при совмещении таких полимеров друг с другом и с некоторыми модифицирующими добавками путем провоцирования дополнительных физических и в ряде случаев химических взаимодействий между компонентами создаваемого композиционного материала. В результате таких взаимодействий следует ожидать своего рода вторичного структурного упорядочения за счет возникновения межфазных слоев, способных внести вклад в механическое упрочнение композиций. Управляемая реализация данного эффекта позволит получить конструкционные композиционные материалы с улучшенными свойствами, расширить их области применения и одновременно внести вклад в решение экологических проблем за счет организации рециклинга полимерных отходов.

Целью работы явилось получение и исследование полимерных композиционных материалов на основе смесей вторичных полиолефинов и модифицированной полидисперсной бентонитовой глины.

Материалы и методы исследований. В качестве полимерной матрицы использовали смеси полиолефинов (ПО) – вторичного полиэтилена низкого и высокого давления (ВПЭНД и ВПЭВД), вторичный полипропилен (ВПП, ТУ РБ 37391633.001–2000) при соотношении 1 : (1–0,5) соответственно. В качестве наполнителя использовали бентонитовую глину. Наполнитель предварительно модифицировали кремнийорганической жидкостью ПМС-200 и гудроном соапстока с последующим измельчением в планетарной мельнице. Целевой технологической добавкой служил стеарат кальция. Отходы ПО предварительно сушили при температуре 70 °С до влажности 0,25 %. Наполнитель вводили в количестве 1,0–6,0 % от массы полимера. Из подготовленных составов получали образцы ленты на экструзиографе «RHEOCORD 90» (НААКЕ, Германия) путем экструзии через щелевую головку с последующим каландрированием. Механическую прочность образцов определяли по ГОСТ 11262–80 на измерительном комплексе «INSTRON 5567» (INSTRON, Великобритания). Физико-химические исследования проводили с помощью ИК-спектрометра с фурье-преобразованием «NEXUS E.S.P.» (Thermo Nicolet, США) и рентгеновского дифрактометра «GNR APD 2000 PRO» (G.N.R. S.r.l., Италия). Микроструктурные исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа «VEGA II» LSH (TESCAN, Чехия).

Результаты и их обсуждение. В [3; 4] показано, что при использовании в полимерах ультра-нанодисперсных частиц наполнителя достигается увеличение значения прочности композитов. Ранее также показано [5], что при введении в смесь вторичных ПО полидисперсной бентонитовой глины в пределах 2,0–4,0 мас. % наблюдается повышение показателя разрушающего напряжения при растяжении (в 1,3–2,0 раза) материала по сравнению с исходным композитом, что указывает на формирование в композиционной системе более однородной структуры. Было высказано предположение о том, что в составе полидисперсного бентонита основополагающую роль в активации межмолекулярных и межфазных взаимодействий играют частицы с дисперсностью 40 мкм и менее, обладающие развитой поверхностью и высокой поверхностной активностью, реализуемой на границах раздела «полимер–наполнитель». Для подтверждения этого предположения проведены исследования влияния фракционного состава полидисперсного бентонита на прочностные свойства исследуемых композитов. Установлено, что наилучший комплекс физико-механических свойств композитов достигается при использовании частиц бентонита с дисперсностью в пределах 25–40 мкм. При снижении размера частиц менее 25 мкм наблюдается ухудшение прочности композита: это можно связать с тем, что поверхностная активность мелких частиц настолько высока, что ведет не столько к активации взаимодействий с полимерной матрицей, сколько к взаимной агломерации и, вследствие этого, к неравномерности распределения частиц бентонита в материале. Для фракций частиц бентонита с дисперсностью более 40 мкм прослеживается монотонное снижение прочностных свойств композита, а при дисперсности более 150 мкм – их интенсивное падение (на 38–49 %). В то же время при использовании модифицированного полидисперсного бентонита прочность композита незначительно уступает ранее изготовленным образцам (на 10–14 %). Учитывая, что в полидисперсном бентоните на долю частиц с размером в диапазоне 25–40 мкм приходится от 42,0 до 53,0 % от всей массы, можно утверждать об их основополагающей роли в упрочнении материала.

Для достижения указанной размерности частиц бентонита предложено проводить предварительное модифицирование частиц бентонита кремнийорганической жидкостью ПМС-200 и гудроном соапстока с последующим диспергированием в планетарной мельнице. Установлено, что интенсификация процесса диспергирования частиц бентонита при воздействии на его поверхность смеси ПМС-200 и гудрона соапстока связана со способностью полярных групп ПМС-200 к адсорбции на поверхности частиц наполнителя и обусловлена изменением ее физико-химической активности путем реализации эффекта Ребиндера при адсорбции поверхностно-активного вещества на развитой поверхности твердых частиц [6]. Схема, представленная на рис. 1, демонстрирует наиболее вероятный процесс адсорбции молекул на поверхности частиц бентонита. За счет адсорбции может возникнуть возможность некоторого уменьшения поверхностной энергии частиц бентонита до величин, препятствующих агломерации, но достаточных для обеспечения межфазных взаимодействий с полимерной матрицей.

Механизм повышения прочностных характеристик композитов с использованием модифицированного бентонита обусловлен комплексом межфазных процессов, протекающих в исследуемой системе. Известно [7; 8], что одним из условий получения высокопрочного композиционного материала является обеспечение прочного адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз и равномерное распределение частиц ультра- и нанодисперсного наполнителя в композиционной системе. Инициирование физико-химического взаимодействия макромолекул вторичных ПО в смеси в присутствии модифицированного бентонита возможно путем интенсификации окислительных реакций и реализации активирующего эффекта сдвига под давлением (эффект Ениколопова). Физико-химическая активность на границе раздела фаз способствует усилению адгезионного взаимодействия по-

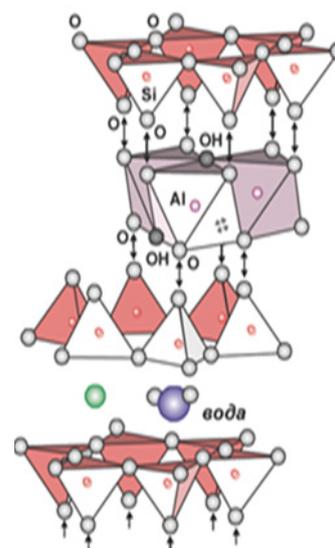


Рис. 1. Возможный процесс адсорбции молекул на поверхности частиц бентонита
Fig. 1. Possible process of adsorption of molecules on the surface of bentonite particles

лимера и наполнителя. Это сказывается на величине прочности при сдвиге образцов из пластин ПЭНД: так, данный показатель для образцов с использованием модифицированного бентонита составил 0,9–1,2 МПа, в то время как для исходных образцов – 0,6–0,7 МПа (рис. 2). На это указывают микроскопические исследования структуры композита, где видны фрагменты частицы бентонита с полимерным слоем на поверхности.

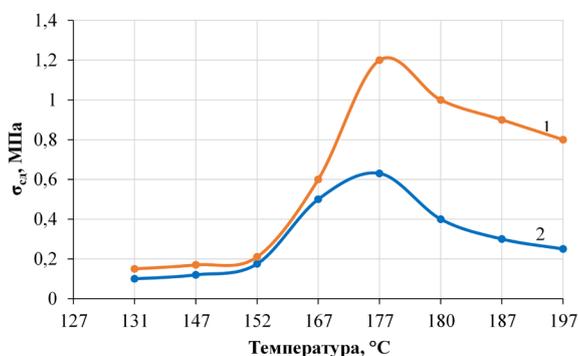


Рис. 2. Прочность при сдвиге образцов склеенных пластин из ПЭНД: 1 – смесь ПЭНД и модифицированного бентонита; 2 – смесь ПЭНД и чистого бентонита

Fig. 2. Shear strength of samples of glued HDPE plates: 1 – mixture of HDPE and modified bentonite; 2 – mixture of HDPE and pure bentonite

Одним из процессов, который способствует реализации данного механизма, предполагается взаимодействие окислившихся групп макромолекул полимеров с бентонитом. При анализе ИК-спектров (рис. 3) смеси вторичных ПЭ и чистого бентонита наблюдается появление пика в области 1000 см^{-1} , свидетельствующего об образовании кислородосодержащих групп в результате термоокислительной деструкции. В то же время после введения в материал модифицированного бентонита возникают как характерные для вышеизложенного процесса пики в области $900\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, так и пик вблизи 1500 см^{-1} , ассоциируемый с карбонильными группами, что указывает на возможное участие окислившихся групп полимера во взаимодействии с активированной поверхностью частиц бентонита.

На упрочнение материала оказывают влияние условия формирования кристаллической структуры [4; 9]. Следует отметить большую роль в этом температурной предыстории полимера, которой обычно пренебрегают. Количество и размер агрегатов макромолекул, служащих зародышами кристаллизации, зависят от времени пребывания материала в экструдере, температуры переработки и условий, в которых происходил предыдущий цикл кристаллизации [7].

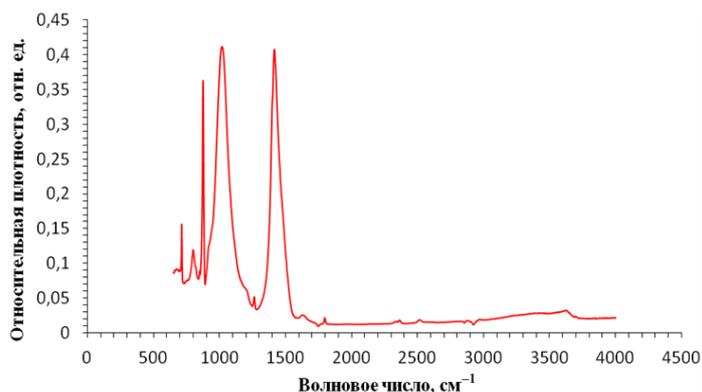


Рис. 3. ИК-спектр композиции на основе вПЭВД + вПЭНД в соотношении 50 : 50 соответственно +2,5 мас. % бентонита, модифицированного ПМС-200

Fig. 3. IR spectrum of a composition based on waste PEVD + waste PEND in the ratio 50 : 50 respectively +2.5 wt. % bentonite modified by PMS-200

На дифрактограмме (рис. 4) бентонит имеет рефлексы (три порядка отражения) $2,2^\circ$, $5,8^\circ$ и $8,8^\circ$ (*), соответствующие органомодифицированному монтмориллониту [10]. При этом положение основного рефлекса ($2,2^\circ$) одинаково для чистой глины и глины, введенной в композит, т. е. интеркаляция полимерных цепей в межплоскостное пространство незначительна [11; 12]. Рефлексы $9,8^\circ$ и $13,7^\circ$ (o) соответствуют органомодифицированному монтмориллониту, связанному, как правило, с технологическими особенностями получения бентонита [12]. Рефлекс $19,7^\circ$ (o) соответствует кристаллической фазе бентонита (001) [13]. Присутствие рефлексов $20,8^\circ$ и $26,6^\circ$ (x) соответствует мелкодисперсной примеси кварца [11] в форме α -квисталлита [14]. Рефлексы в области $17\text{--}18^\circ$ и $22\text{--}23^\circ$ на кривой 1 соответствуют остаткам модификатора ПМС-200. На всех дифрактограммах композитов ПП + ПЭ, наполненных бентонитом и монтмориллонитом, присутствуют интенсивные пики с близкими дифракционными углами. Рефлексы в области $8,8^\circ$ и $13,8^\circ$, соответствующие пикам ПЭ и ПП, по-видимому, накладываются на линии бентонита, соответствующие органомодифицированному монтмориллониту, усиливая их.

Области когерентного рассеяния (размеры нанокристаллитов) определяли, используя классическую формулу Дебая–Шеррера

$$D_p = kl/(B\cos q),$$

где D_p – средний размер кристаллитов (нм); k – константа Шеррера (меняется от 0,68 до 2,08, для сферических кристаллитов с кубической симметрией $k = 0,94$); l – длина волны рентгеновских лучей ($\text{Cu}_{\text{Ka}} = 1,54178 \text{ \AA}$); B – интегральная ширина рефлексов на дифрактограмме; $\cos q$ – косинус угла дифракции рентгеновских лучей.

Результаты расчета среднего размера кристаллитов приведены в табл. 1 и 2. Анализ дифрактограмм с сопоставлением расчетов размера кристаллитов позволил установить, что аморфных гало на дифрактограммах не наблюдается, что говорит о высокой степени кристалличности исследованных образцов. Линии, соответствующие ПП, для композита, наполненного монтмориллонитом, уширены сильнее, чем для композита, наполненного модифицированным бентонитом, что свидетельствует о меньшем размере областей когерентного рассеяния и о меньших размерах кристаллических областей (1739 и 1999 нм). При этом для ПЭ картина противоположная (1231 и 987 нм). Это может говорить о более высокой жесткости композитов ПП + ПЭ с модифицированным бентонитом. Ранее полученный композит, содержащий монтмориллонит [11], является более пластичным.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что на границе раздела в смеси ПЭ (как первичных, так и вторичных) происходит существенное уменьшение молекулярной под-

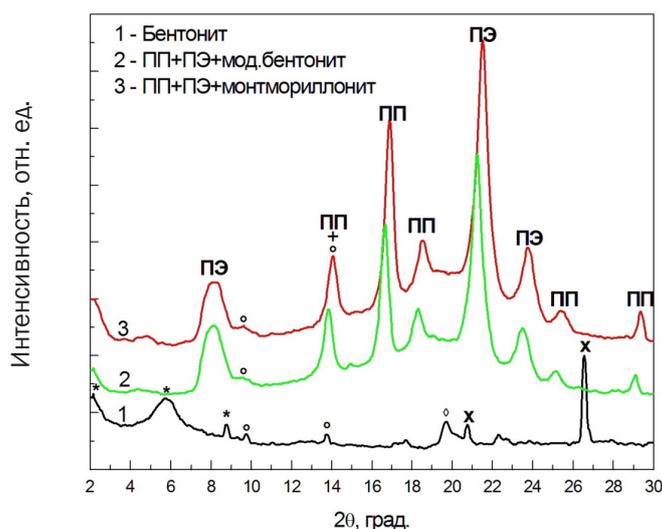


Рис. 4. Дифрактограмма смеси вторичных ПП и ПЭ с ультрадисперсными наполнителями – бентонитом и монтмориллонитом

Fig. 4. Diffractogram of a mixture of waste PP and PE with ultrafine fillers – bentonite and montmorillonite

Т а б л и ц а 1. Средний размер кристаллитов в композите ПП + ПЭ + 3 % модифицированного бентонита

T a b l e 1. Average size of crystallites in composite PP + PE + 3 % modified bentonite

2 θ -угол сканирования, ° 2 θ scanning angle, °	Интегральная ширина рефлексов, В° Integral width of reflections, V°	Средний размер кристаллитов, D _p , нм Average crystallite size, D _p , nm	D _p , средний, нм D _p , average, nm
2,20	–	–	987 (ПЭ) 1999 (ПП)
4,85	–	–	
8,12 (ПЭ)	1,19	733	
9,60	–	–	
13,8 (ПП)	0,41	2102	
16,65 (ПП)	0,45	1939	
18,30 (ПП)	0,45	1958	
21,25 (ПЭ)	0,40	648	
23,50 (ПЭ)	0,60	1580	
25,15	–	–	
29,10	–	–	

Т а б л и ц а 2. Средний размер кристаллитов в композите ПП + ПЭ + 3 % монтмориллонита

T a b l e 2. Average size of crystallites in composite: PP + PE + 3 % montmorillonite

2 θ -угол сканирования, ° 2 θ scanning angle, °	Интегральная ширина рефлексов, В° Integral width of reflections, V°	Средний размер кристаллитов, D _p , нм Average crystallite size, D _p , nm	D _p , средний, нм D _p , average, nm
2,20	–	–	1231 (ПЭ) 1739 (ПП)
4,85	–	–	
8,12 (ПЭ)	1,05	813	
9,72	–	–	
14,10 (ПП)	0,50	1719	
16,92 (ПП)	0,50	1742	
18,55 (ПП)	0,50	1757	
21,52 (ПЭ)	0,70	1298	
23,77 (ПЭ)	0,57	1583	
25,42	–	–	
29,32	–	–	

вижности полимерных цепей, что ведет к изменению условий температурных переходов. Прежде всего это сказывается на температуре стеклования, определяющей изменение условий кристаллизации и релаксационного поведения полимера в межфазных слоях. Ограничение молекулярной подвижности в межфазных зонах при формировании смеси полимеров приводит к торможению релаксационных процессов и возникновению неравновесного напряженного состояния в сравнении с состоянием гомополимера [15]. При введении в смесь из вторичных ПО модифицированного бентонита наблюдается рост кристалличности, связанный с иницированием частицами бентонита физико-химического взаимодействия макромолекул двух различных полимеров в смеси, а также с отсутствием агломератов и равномерным распределением наполнителя в объеме материала. Об этом свидетельствует также возрастание молекулярной массы материала на 21 % (оценивали по изменению эффективной вязкости смеси). Увеличение вязкости смеси при температуре кристаллизации снижает сегментальную подвижность и инициирует гетерогенный линейный рост одномерных кристаллов. Такая картина обусловлена тем, что частицы модифицированного бентонита выступают центрами кристаллизации, способствующими образованию более совершенной мелкокристаллической структуры в материале, обеспечивая формирование более высокой однородности, и, как следствие, улучшение физико-механических характеристик композита.

Заключение. Для смесей на основе вторичных полимеров в присутствии высокодисперсных частиц модифицированного полидисперсного бентонита характерно улучшение прочности композитов вследствие усиления в них межфазного взаимодействия и формирования структурной однородности материала. Это в некоторой степени компенсирует потерю когезионной прочности вторичных полимеров из-за термодеструкционных процессов и позволяет сформировать на их основе полимерные композиты с улучшенными физико-механическими свойствами.

Представляется, что механизм формирования комплекса свойств композитов основан на ступенировании двухуровневой адсорбции: 1) модификатора на частицах наполнителя и 2) активных групп полимера на поверхности модифицированного наполнителя. В совокупности с процессами кристаллизации такая адсорбция обеспечивает улучшение условий для адгезии полимера к частицам наполнителя. Результатом таких взаимодействий представляется достижение максимально возможной деагломерации частиц, а также повышение эффективности физико-механической (за счет интенсивности размола и роста напряжений сдвига в ходе двухшнековой экструзии), физической (за счет близкодействующих взаимодействий и поверхностных сил) и физико-химической (за счет химического контакта реакционноспособных групп с поверхностью) активации частиц наполнителя. Следует отметить, что для композиционных систем исследуемого типа большое значение приобретают электрофизические свойства компонентов композиции, оказывающие влияние на межмолекулярное взаимодействие, где определенный вклад в упрочнение композитов вносит поляризационный механизм структурирования микрообъемов связующего вблизи частиц активированного ультрадисперсного наполнителя. Данное предположение по отношению к исследуемым композиционным системам требует экспериментального подтверждения, что определяет актуальность дальнейших исследований.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Научное обоснование технологий получения и рециклинга многофункциональных полимерных композитов со специальными свойствами на основе отечественного сырья для базовых отраслей промышленности» на 2021–2025 годы, тема 4.2.2, НИР 2.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the SSRP “Materials Science, New Materials and Technologies”, subprogram “Scientific substantiation of technologies for the production and recycling of multifunctional polymer composites with special properties based on domestic raw materials for basic industries” for 2021–2025, topic 4.2.2, SRW 2.

Список использованных источников

1. Белый, В. А. Создание и исследование новых материалов и конструкций на основе полимеров и металлов: автореферат. ... д-ра техн. наук / В. А. Белый. – Рига, 1970. – 64 с.
2. Шаповалов, В. М. Многокомпонентные полимерные системы на основе вторичных материалов / В. М. Шаповалов, З. Л. Тартаковский; под общ. ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель, 2003. – 252 с.
3. Песецкий, С. С. Нанокompозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров / С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Н. К. Мышкин // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 7–37.
4. Polymer composite materials: from macro, micro to nanoscale: selected, peer reviewed papers from the Conference on Multiphase Polymers and Polymer Composites Systems: Macro to Nano Scales, June 7–10, 2011, Paris, France / ed. A. Boudenne. – Switzerland, 2012. – 300 p.
5. Подобед, Д. Л. Улучшение эксплуатационных свойств композиционных материалов на основе вторичных полиолефинов с использованием дисперсных наполнителей и антипиреновых добавок / Д. Л. Подобед, В. М. Шаповалов // Вестн. Гродненского гос. ун-та им. Я. Купалы. Сер. 6. Техника. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 6–13.
6. Малкин, А. И. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера / А. И. Малкин // Коллоидный журн. – 2012. – Т. 74, № 2. – С. 239–256.
7. Песецкий, С. С. К оценке влияния модификатора на межфазное взаимодействие в полимерных смесях / С. С. Песецкий // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 1992. – № 1. – С. 105–110.
8. Износостойкие полимерные композиционные материалы с улучшенным межфазовым взаимодействием в системе «полимер–волокно» / С. Н. Данилова [и др.] // Вестн. Северо-Восточного фед. ун-та им. М. К. Аммосова. – 2016. – № 5 (55). – С. 80–92.
9. Козлов, Г. В. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозитов / Г. В. Козлов // Успехи физ. наук. – 2015. – Т. 185, № 1. – С. 35–64. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0185.201501c.0035>
10. Герасин, В. А. Совместная обработка бентонитов неорганическими полиэлектролитами и катионами ПАВ для облегчения эксфолиации органоглин / В. А. Герасин, В. В. Куренков // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технология. – 2019. – Т. 62, вып. 5. – С. 71–77. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196205.5746>
11. Полиэтилен-алюмосиликатные нанокомпозиты для защитных покрытий магистральных трубопроводов / В. В. Куренков [и др.] // Пластические массы. – 2015. – № 7–8. – С. 53–60.
12. Влияние структуры слоя модификатора на совместимость полимеров с модифицированным монтмориллонитом / В. А. Герасин [и др.] // Инж.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 5. – С. 35–40.
13. Алексеева, О. В. Термическое поведение композиционных материалов на основе полистирола / О. В. Алексеева, А. В. Носков, С. С. Гусейнов // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 227–230. <https://doi.org/10.31857/s0044185620030043>
14. Физико-химические свойства сорбентов на основе бентонитовых глин, модифицированных полигидроксо-катионами железа (III) и алюминия методом «соосаждения» / Н. В. Никитина [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 191–199.
15. Заикин, А. Е. Совместимость полимеров в присутствии нанонаполнителей / А. Е. Заикин // Вестн. технол. ун-та. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 53–66.

References

1. Belyi V. A. *Creation and research of new materials and structures based on polymers and metals*. Riga, 1970. 64 p. (in Russian).
2. Shapovalov V. M., Tartakovsky Z. L. *Multicomponent polymer systems based on secondary materials*. Gomel, 2003. 262 p. (in Russian).
3. Pesetskiy S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Nanocomposites obtained by dispersion of layered silicates in polymer melts. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 7–37 (in Russian).
4. Boudenne A., ed. *Polymer composite materials: from macro, micro to nanoscale: selected, peer reviewed papers from the Conference on Multiphase Polymers and Polymer Composites Systems: Macro to Nano Scales, June 7–10, 2011, Paris, France*. Switzerland, 2012. 300 p.
5. Podobed D. L., Shapovalov V. M. Improvement of the performance properties of composite materials based on secondary polyolefins using dispersed fillers and flame retardants. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika* [Bulletin of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science], 2020, vol. 10, no. 2, pp. 6–13 (in Russian).
6. Malkin A. I. Regularities and mechanisms of the Reh binder's effect. *Colloid Journal*, 2012, vol. 74, no. 2, pp. 223–238. <https://doi.org/10.1134/s1061933x12020068>
7. Pesetskiy S. S. On the assessment of the effect of a modifier on interfacial interaction in polymer blends. *Vestni Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 1992, no. 1, pp. 105–110 (in Russian).
8. Danilova S. N., Okhlopko A. A., Gavriliyeva A. A., Okhlopko T. A., Borisova R. V., Dyakonov A. A. Wear resistant polymer composite materials with improved interfacial interaction in the system “polymer–fiber”. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta imeni M. K. Ammosova = Vestnik of the North-Eastern Federal University*, 2016, no. 5(55), pp. 80–92 (in Russian).
9. Kozlov G. V. Structure and properties of particulate-filled polymer nanocomposites. *Physics-Uspekhi*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 33–60. <https://doi.org/10.3367/ufne.0185.201501c.0035>
10. Gerasin V. A., Kurenkov V. V. Joint treatment of bentonites with inorganic polyelectrolytes and cationic surfactants in order to promote organoclay exfoliation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya tekhnologiya = ChemChemTech*, 2015, vol. 62, no. 5, pp. 71–77 (in Russian). <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196205.5746>
11. Kurenkov V. V., Gerasin V. A., Korolev Yu. M., Piryazev A. A., Mendeleev D. I., Dyachuk S. V. Polyethylene-alumino-silicate nanocomposites for pipeline protection coatings. *Plasticheskie massy*, 2015, no. 7–8, pp. 53–60 (in Russian).
12. Gerasin V. A., Bakhov F. N., Merekalova N. D., Korolev Yu. M., Zubova T. L., Antipov E. M. Influence of the structure of a modifier layer on the compatibility of polymers with a modified montmorillonite. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005, vol. 78, no. 5, pp. 871–877. <https://doi.org/10.1007/s10891-006-0006-4>
13. Alekseeva O. V., Noskov A. V., Guseynov S. S. Thermal behavior of polystyrene-based composite materials. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 469–472. <https://doi.org/10.1134/s2070205120030041>
14. Nikitina N. V., Komov D. N., Kazarinov I. A., Nikitina N. V. Physical and chemical properties of sorbents based on bentonite clay, modified with iron (III) and aluminum polyhydroxocations by the “coprecipitation”. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy = Sorption and Chromatography Processes*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 191–199 (in Russian).
15. Zaikin A. E. Compatibility of polymers in the presence of nano-fillers. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 53–56 (in Russian).

Информация об авторах

Шаповалов Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: v.shapovalov@tut.by.

Подобед Денис Леонидович – магистр техн. наук, преподаватель. Институт профессионального образования Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Речицкий пр., 35а, 246023, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: F_Heart_@mail.ru.

Зотов Сергей Валентинович – канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: zotov-1969@mail.ru.

Бойко Андрей Андреевич – д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе. Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (пр. Октября, 48, 246746, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: boiko@gstu.by.

Information about the authors

Shapovalov Victor M. – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department. V. A. Bely Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: v.shapovalov@tut.by.

Podobed Denis L. – Master (Engineering), Lecturer. Institute of Professional Education of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus (35a, Rechitsky Ave., 246023, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: F_Heart_@mail.ru.

Zotov Sergey V. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher. V. A. Bely Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: zotov-1969@mail.ru.

Boika Andrei A. – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Vice Rector for Research. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: boiko@gstu.by.