

5. Synthesis and optical characterization of copper oxide nanoparticles / S. Amrut [et al.] // *Advances in Applied Science Research*. – 2010. – N 1 (2). – P. 36–40.
6. Thickness-dependent bending modulus of hexagonal boron nitride nanosheets / S. Barth [et al.] // *Nanotechnology*. – 2009. – N 20. – P. 1–6.
7. Коршунов, А. В. Особенности окисления нанопорошков меди при нагревании в воздухе / А. В. Коршунов, А. П. Ильин // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2008. – Т. 313, № 3. – С. 5–13.
8. Naddaf, M. Characterization of nanostructured copper-porous silicon matrix formed on copper-coated silicon substrate via electrochemical etching / M. Naddaf, O. Mrad, A. Al-Zier // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2014. – Vol. 115, N 4. – P. 1345–1353.

УДК 541.64:678.742.2

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВ
И МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕНТОНИТА**

Д. Л. Подобед

*Филиал «Институт профессионального образования» Университета
гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель*

В. М. Шаповалов

*Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Показано, что для смеси вторичных полиолефинов и диспергированного в планетарной мельнице бентонита, модифицированного кремнийорганической жидкостью и гудроном сап-стока, разрушающее напряжение при растяжении по сравнению с исходным композитом увеличивается в 1,5–2,0 раза. Для содержания в композите модифицированного бентонита в пределах 2,5–4,5 мас. % характерны стабильные показатели его прочности, что указывает на формирование в этих условиях более однородной структуры композиционной системы. Выдвинуто предположение о том, что при содержании до 42,5 мас. % частиц бентонита с дисперсностью 40 мкм и менее активируется межмолекулярное взаимодействие на границе раздела «полимер – наполнитель». Рассмотрен механизм повышения прочностных характеристик композитов с модифицированным бентонитом, обусловленный комплексом адгезионных взаимодействий и физико-химических превращений на межфазных границах.

Ключевые слова: композиционный материал, смеси вторичных полиолефинов, модификация, бентонит, прочностные свойства, рециклинг.

**COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF SECONDARY
POLYOLEFINS AND BENTONITE**

D. L. Podobed

*Branch “Institute of Professional Education”
of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations
of Belarus, Gomel*

V. M. Shapovalov

*Institute of Mechanics of Metal Polymer Systems named after V. A. Bely
of the National Academy of Sciences of Belarus”, Gomel*

It is shown that for a mixture of secondary polyolefins and bentonite dispersed in a planetary mill, modified with organosilicon liquid and soapstock tar, the destructive tensile stress increases

by 1.5–2.0 times compared to the initial composite. For the content of modified bentonite in the composite in the range of 2.5–4.5 wt. % is characterized by stable indicators of its strength, which indicates the formation of a more homogeneous structure of the composite system under these conditions. It has been suggested that with a content of up to 42.5 by weight. % of bentonite particles with a dispersion of 40 microns or less, the intermolecular interaction at the polymer-filler interface is activated. The mechanism of increasing the strength characteristics of composites with modified bentonite due to a complex of adhesive interactions and physico-chemical transformations at the interphase boundaries is considered.

Keywords: composite material, mixtures of secondary polyolefins, modification, bentonite, strength properties, recycling.

Проблема переработки полимерных отходов приобретает актуальное значение не только с позиций необходимости охраны окружающей среды, но и вследствие образования дефицита полимерного сырья, в результате чего полимерные отходы становятся мощным вторичным сырьевым ресурсом, в том числе в машиностроении [1]. Определенный интерес в качестве активных наполнителей полимеров представляет класс бентонитовых глин, которому применительно к композитам на основе первичных полимеров (ПЭТФ, полиолефины, полиамиды ПА и др.) уделено огромное внимание [2, 3]. В то же время композиты на основе вторичных термопластов, содержащих данный перспективный наполнитель, исследованы недостаточно.

Цель работы – получение и исследование композиционных полимерных материалов на основе смесей вторичных полиолефинов и модифицированного бентонита.

Материалы и методы исследований. В качестве наполнителей использовали бентонитовую глину, предварительно модифицированную кремнийорганической жидкостью ПМС-200 и гудроном soapстока, с последующим измельчением полученной массы в планетарной мельнице. В качестве полимерной матрицы использовали смеси полиолефинов (ПО) – вторичного полиэтилена низкого и высокого давления (вторичный ПЭНД и ПЭВД) и вторичный полипропилен (ТУ РБ 37391633.001–2000) при соотношении 1 : (1–0,5) соответственно. Композиции готовили смешиванием компонентов без кондиционирования проб. Из подготовленных составов методом литья под давлением на литьевой машине получали образцы в виде лопаток. Образцы ленты получали на экструзиографе «RHEOCORD 90 НААКЕ» путем экструдирования композиции через щелевую головку и каландры. Механическую прочность образцов определяли на комплексе «INSTRON 5567» (ГОСТ 11262–80). Состав анализировали с помощью ИК-спектрометра с Фурье-преобразованием фирмы NEXUS E.S.P. (Thermo Nicolet, США). Для определения степени кристалличности использовали метод дифференциальной сканирующей калориметрии (микрокалориметр ДСМ–10М). Микроструктурные исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа «VEGA II» LSH (TESCAN, Чехия).

Результаты и их обсуждение. Установлено, что при введении в смесь вторичных полиолефинов высокодисперсного наполнителя (модифицированная бентонитовая глина в концентрации 2,0–4,0 мас. %) достигается повышение разрушающего напряжения при растяжении по сравнению с исходным композитом в 1,5–2,0 раза. При этом для содержания в композите модифицированного бентонита в пределах 2,5–4,5 мас. % характерны стабильные показатели его прочности, что указывает на формирование в этих условиях более однородной структуры композиционной системы. Улучшение свойств обусловлено интенсификацией процесса диспергирования частиц бентонита при воздействии на поверхность бентонита смеси ПМС-200 и гудрона soapстока, что связано со способностью полярных групп ПМС-200 к адсорбции на поверхности наполнителя вследствие изменения ее физико-химической активно-

сти путем реализации эффекта Ребиндера. Показано, что в наполнителе объем частиц с размером 40 мкм и менее составляет около 42,5 %, что представляется достаточным для активирования межмолекулярных взаимодействий на границе раздела «полимер – наполнитель».

Механизм повышения прочности композитов, содержащих модифицированный бентонит, обусловлен комплексом процессов, протекающих в исследуемой композиционной системе. Физико-химическая активность на границе раздела фаз путем интенсификации в них окислительных реакций и реализации активирующего эффекта сдвига под давлением (Эффект Ениколопова) способствует усилению адгезионного взаимодействия полимера и наполнителя, о чем свидетельствуют результаты исследования прочности при сдвиге образцов из пластин ПЭНД. Так, этот 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.

Предполагается, что одним из процессов, способствующих реализации механизма повышения прочности композитов, является взаимодействие окислившихся групп макромолекул полимеров с бентонитом, о чем свидетельствует (рис. 1) появление полос поглощения в области $900\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, указывающих на наличие в структуре вторичного полимера кислородосодержащих групп (например, гидроксильных), а также полосы поглощения около 1500 см^{-1} (карбонильная группа). По-видимому, эти группы способны к взаимодействию с активированной поверхностью частиц бентонита по механизмам образования ван-дер-ваальсовых, водородных и донорно-акцепторных связей, что вносит основной вклад в адгезию. Также частицы модифицированного бентонита выступают центрами кристаллизации, способствующими образованию более совершенной мелкокристаллической структуры, что обеспечивает формирование более высокой однородности, и, как следствие, улучшение физико-механических характеристик композита. На это указывает структура композитов с внедренными в ее состав включениями модифицированного бентонитового наполнителя (рис. 2).

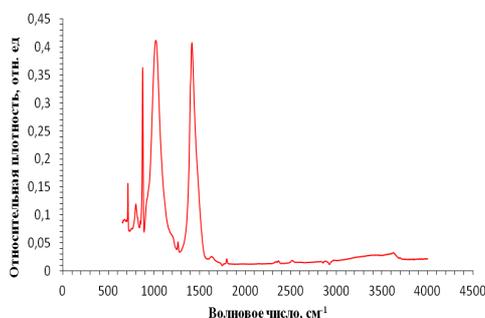


Рис. 1. ИК-спектр композиции на основе ПЭВД_{вт} + ПЭНД_{вт} в соотношении 50 : 50 соответственно + 2,5 мас. % модифицированного ПМС-200 бентонита

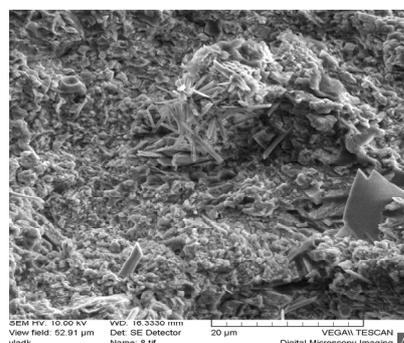


Рис. 2. Структура бентонитонаполненного композита

Для смесей на основе вторичных полимеров в присутствии высокодисперсных частиц модифицированного полидисперсного бентонита характерно улучшение прочности композита вследствие усиления в них межфазного взаимодействия и формирования структурной однородности материала. Представляется, что механизм улучшения свойств композитов основан на стимулировании адсорбции модифика-

тора на частицах наполнителя и активных групп полимера на активированной поверхности модифицированного наполнителя. В совокупности эти процессы улучшают условия для адгезии полимера к частицам активированного наполнителя.

Литература

1. 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. Гродн. гос. ун-та им. Я. Купалы. Сер. 6. Техника. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 6–13.
2. Песецкий, С. С. Нанокompозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров (обзор) / С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Н. К. Мышкин // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 7–37.
3. Заикин, А. Е. Совместимость полимеров в присутствии нанонаполнителей / А. Е. Заикин // Вестн. технол. ун-та. – 2020. – Т. 23. – № 3. – С. 53–66.

УДК 537.531:678.073:678.046

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИТОВ**

В. А Банний

Учреждение образования «Гомельский государственный медицинский университет», Республика Беларусь

И. В. Царенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Дана характеристика материалов, применяемых в качестве электромагнитных экранов. Установлены основные технологические параметры формирования методом аэродинамического диспергирования расплава волокнистого композиционного радиопоглощающего материала на основе полиэтиленовой матрицы, наполненной магнитомягким ферритом. Методом электронной микроскопии изучены структурные особенности волокнистого радиопоглощающего материала, модифицированного мягкомагнитным ферритом.

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы, волокнистые композиционные полимерные материалы, метод аэродинамического диспергирования расплава.

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF RADIOABSORBING FIBROUS
POLYMER COMPOSITES FORMATION**

V. A. Bannyi

*Educational Institution “Gomel State Medical University”,
the Republic of Belarus*

I. V. Tsarenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Characterization of materials for electromagnetic screens was done. Basic technological parameters for formation of fibrous polymer radioabsorbing materials based on modified by soft ferrite polyethylene using the melt blowing technique. Structural features of fibrous soft ferrite containing radio-absorbing material were investigated by electron microscopy technique.

Keywords: radioabsorbing materials, fibrous polymer composites, melt blowing technique.