

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

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 678:536.46
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-513-520>

Поступило в редакцию 29.10.2025
Received 29.10.2025

Ю. М. Кривогуз

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

**РОЛЬ КОМПАТИБИЛИЗИРУЮЩЕГО АГЕНТА В ФОРМИРОВАНИИ
СТРУКТУРЫ, ОГНЕЗАЩИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

(Представлено академиком Н. К. Мышкиным)

Аннотация. Настоящая работа посвящена исследованию влияния компатибилизирующего агента на основе функционализованного полиэтилена марки ПФ-1, разработанного и выпускаемого в ИММС НАН Беларуси, на формирование структуры, огнезащитные свойства и механические характеристики полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), содержащего азотфосфорсодержащий антипирен (АФА). С помощью ИК-спектроскопии установлено образование межфазных взаимодействий между ПФ-1 и АФА, что обуславливает повышение совместимости компонентов в матрице ПЭВП. Анализ микрофотографий, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), показал, что введение ПФ-1 в композит ПЭВП/АФА приводит к существенной модификации морфологии, характеризующейся уменьшением среднего размера частиц диспергированного АФА и улучшением адгезии между частицами АФА и полимерной матрицей. Дифференциальная сканирующая калориметрия выявила снижение энтальпии плавления и кристаллизации композита ПЭВП/ПФ-1/АФА, что свидетельствует об усилении межфазного взаимодействия компонентов. Показано, что антипиренированная ПЭВП композиция, содержащая АФА совместно с ПФ-1, обладает пониженной скоростью горения, что связано с более равномерным распределением антипирена в полимерной матрице. Результаты механических испытаний указывают на увеличение модуля упругости при растяжении и предела текучести для композита ПЭВП/АФА при добавлении компатибилизатора ПФ-1.

Ключевые слова: полиэтилен высокой плотности, азотфосфорсодержащий антипирен, компатибилизатор, совместимость, огнестойкость

Для цитирования. Кривогуз, Ю. М. Роль компатибилизирующего агента в формировании структуры, огнезащитных и механических свойств полиэтилена высокой плотности / Ю. М. Кривогуз // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 6. – С. 513–520. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-513-520>

Yuri M. Krivoguz

*V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel,
Republic of Belarus*

**THE ROLE OF COMPATIBILIZING AGENT IN THE FORMATION OF STRUCTURE,
FIRE-RETARDANT AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE**

(Communicated by Academician Nikolay K. Myshkin)

Abstract. The present work is devoted to the study of the influence of a compatibilizing agent based on functionalized polyethylene grade PF-1, developed and produced at the MPRI of NAS of Belarus, on the formation of the structure, fire-retardant properties and mechanical characteristics of high-density polyethylene (HDPE) containing a nitrogen-phosphorus flame retardant (NPFR). Using IR spectroscopy, the formation of interfacial interactions between PF-1 and NPFR was established, which causes an increase in the compatibility of components in the HDPE matrix. Analysis of micrographs obtained by scanning electron microscopy (SEM) showed that the introduction of PF-1 into the HDPE/NPFR composite leads to a significant modification of the morphology, characterized by a decrease in the average particle size of the dispersed NPFR and an improvement in the adhesion between the NPFR particles and the polymer matrix. Differential scanning calorimetry revealed a decrease in the enthalpies of melting and crystallization of the HDPE/PF-1/NPFR composite, indicating an increase in the interfacial interaction of the components. It was shown that the flame-retardant HDPE composition containing NPFR

together with PF-1 has a reduced combustion rate, which is due to a more uniform distribution of the flame retardant in the polymer matrix. The results of the mechanical tests indicate an increase in the tensile modulus and yield strength for the HDPE/NPFR composite with the addition of the PF-1 compatibilizer.

Keywords: high density polyethylene, nitrogen-phosphorus-containing flame retardant, compatibilizer, compatibility, fire resistance

For citation. Krivoguz Yu. M. The role of compatibilizing agent in the formation of structure, fire-retardant and mechanical properties of high-density polyethylene. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 6, pp. 513–520. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-513-520>

Введение. Полиэтилен (ПЭ), как и другие полиолефины (ПО), характеризуется высокой горючестью, обусловленной его склонностью к самостоятельному горению и быстрому распространению пламени. Высокая теплота сгорания ПЭ (около 46 кДж/г) и отсутствие карбонизации, приводящее к разложению конденсированной фазы с образованием газообразных продуктов [1; 2], делают необходимым введение антипиренов для снижения горючести ПЭ [3].

Традиционно для придания огнестойкости ПЭ используются галогенсодержащие соединения, гидроксиды металлов и гидратированные наполнители. Однако применение галогенов вызывает опасения в связи с их токсичностью и токсичностью продуктов горения, представляющими угрозу для здоровья человека и окружающей среды. В свою очередь, использование высоких концентраций гидроксидов металлов и гидратированных наполнителей негативно сказывается на деформационно-прочностных свойствах полиолефиновых композитов [4], что ограничивает их применение.

В связи с этим перспективным направлением является использование азотфосфорсодержащих антипиренов (АФА) [5; 6], обладающих эффективными антипиреирующими свойствами и повышенной экологической безопасностью.

Ключевой проблемой при создании огнестойкого ПЭ является плохая совместимость между полярными АФА и неполярной полиэтиленовой матрицей [7]. Это приводит к ухудшению свойств ПЭ композитов, содержащих антипирены, которые в значительной степени зависят от характера взаимодействия на границе «полимер–антипирен». Для решения этой проблемы необходимы новые подходы, среди которых наиболее перспективным является компатибилизация, представляющая собой комплекс приемов, направленных на улучшение совместимости компонентов. Компатибилизация может достигаться как посредством оптимизации условий смешения, так и путем введения в состав композита специальных компатибилизаторов.

В [8; 9] показано, что одним из подходов к улучшению огнестойкости и совместимости полимеров с антипиренами является микрокапсулирование антипиренов перед их введением в композит, которое позволяет изолировать частицы антипирена от окружающей среды, сохраняя при этом его ингибирующие свойства. Этот метод способствует улучшению совместимости антипирена с полимером, предотвращению его «выпотевания» и повышению физико-механических свойств материала. Однако микрокапсулирование является сложным, трудоемким и дорогостоящим процессом.

В последние годы все большее внимание уделяется компатибилизирующим агентам на основе функционализированных полиолефинов (ФПО) [10–12]. ФПО, получаемые путем прививки мономеров с активными функциональными группами к неполярным полимерам (ПП, ПЭ и т. д.), способны образовывать прочные связи с наполнителями (или антипиренами) благодаря взаимодействию функциональных групп. Образующиеся связи на границе полимер–наполнитель способствуют улучшению совместимости компонентов и повышению комплекса физико-механических свойств.

Поскольку гетерогенные системы «полимер–антипирен» представляют собой частный случай наполненных полимеров, применение ФПО в качестве компатибилизирующих агентов при создании антипирированных композитов на основе ПО является перспективным подходом. Тем не менее, фундаментальное понимание влияния компатибилизации на свойства огнестойких полимерных композитов, в особенности с использованием ФПО на основе полиэтилена, остается недостаточно изученным.

Настоящая работа направлена на изучение влияния компатибилизатора на основе функционализованного ПЭ на структуру, огнезащитные и механические свойства композитов полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), содержащих антипирен.

Материалы и методы исследования. В качестве полимерной матрицы использовали ПЭВП марки 276-73 производства ОАО «Казаньоргсинтез» (Российская Федерация). Для придания огнестойких свойств применяли АФА марки Melapur 200 (BASF, Германия) с массовым содержанием фосфора 13,0 %. С целью улучшения совместимости антипиренов с полиэтиленовой матрицей в качестве компатибилизатора использовали функционализированный ПЭ марки ПФ-1 (производство ИММС НАН Беларуси, ТУ РБ 03535279.015-97, изв. об изм. № 7 от 17.05.2019).

Композиционные материалы получали методом смешения компонентов в двухшнековом экструдере TSSK-35/40 (Zhangjiagang Jorbin Machinery, КНР) с последующей грануляцией. Концентрация антипирена (АФА) в исследуемых композициях достигала 23,0 мас. %, а содержание компатибилизатора ПФ-1 составляло порядка 15 мас. %.

ИК-спектры с фурье-преобразованием регистрировали на спектрометре Nicolet 5700 (Thermo Fisher Scientific, США) в диапазоне частот $400\text{--}5000\text{ см}^{-1}$. Параметры записи спектров: разрешение 4 см^{-1} , количество сканирований 30. Для анализа использовали пленочные образцы толщиной 30–40 мкм. Обработку ИК-спектров проводили с использованием программного обеспечения OMNIC (версия 7.1, Thermo Fisher Scientific).

Морфологию композиционных материалов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сколах, полученных после криогенного разрушения брусков размером $80 \times 10 \times 4\text{ мм}$, охлажденных в жидком азоте (время выдержки 30 мин). Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan/OXFORD Instruments Analytical, Чехия/Великобритания).

Анализ кристаллической структуры материалов проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе DSC 214 Polyma (Netzsch – Gerätebau GmbH, Германия). В качестве образцов использовали поперечные срезы, взятые из средней части брусков, предназначенных для определения ударной вязкости. Для исключения влияния термической предыстории проводили двухкратный цикл нагрева–охлаждения в атмосфере азота. Температуры плавления ($T_{\text{пл}}$) и кристаллизации ($T_{\text{кр}}$) определяли по результатам второго цикла нагрева. Масса образца составляла 7 мг, скорость нагрева и охлаждения – $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Кристалличность ПЭВП в композитах оценивали по индексу кристалличности ($\Delta I_{\text{кр}}$), рассчитываемому по формуле

$$\Delta I_{\text{кр}} = \frac{\Delta H_{\text{пл}}}{\Delta H_{\text{пл}}^0 \alpha},$$

где $\Delta H_{\text{пл}}$ – теплота плавления ПЭВП в композите; $\Delta H_{\text{пл}}^0$ – теплота плавления ПЭВП в индивидуальном состоянии; α – массовая доля ПЭВП в композите.

Огнестойкость композитов оценивали по скорости горения (v) горизонтально закрепленных образцов в соответствии с методом А стандарта ГОСТ 28157-2018. Скорость горения рассчитывали по формуле

$$v = \frac{60L}{t},$$

где L – длина сгоревшей части, мм; t – время горения, с.

Механические свойства материалов определяли при испытаниях на растяжение в соответствии с ГОСТ 11260. Образцы имели форму лопаток с размером рабочей части $45 \times 5 \times 2\text{ мм}$. Определяли следующие параметры: модуль упругости при растяжении (E_p), предел текучести (σ_T) и относительное удлинение при разрыве (ϵ_p). Испытания проводили на универсальной испытательной машине Instron 5567 (Instron, Великобритания) при скорости деформации 50 мм/мин. Результаты представляли как среднее значение по результатам 5–7 параллельных испытаний.

Результаты и их обсуждение. Известно, что компатибилизаторы, такие как ПФ-1, способствуют активации межфазных взаимодействий на границе раздела между полимерной матрицей и наполнителем (или антипиреном) [7]. Для изучения этих взаимодействий в полимерных композитах широко применяется метод ИК фурье-спектроскопии. В ИК-спектрах физически смешанных, несовместимых компонентов композита, как правило, не наблюдаются существенные изменения по сравнению со спектрами отдельных компонентов. Однако при наличии совмести-

мости между компонентами могут возникать специфические межмолекулярные взаимодействия (водородные связи, диполь-дипольные взаимодействия и др.), что приводит к изменениям в ИК-спектрах конечного композита, проявляющимся в виде сдвигов, уширений или изменения интенсивности полос поглощения.

На рис. 1, *a* представлены ИК-спектры исходного ПЭВП, ПФ-1, а также антипирированных композитов ПЭВП/АФА и ПЭВП/ПФ-1/АФА в диапазоне $400\text{--}5000\text{ см}^{-1}$.

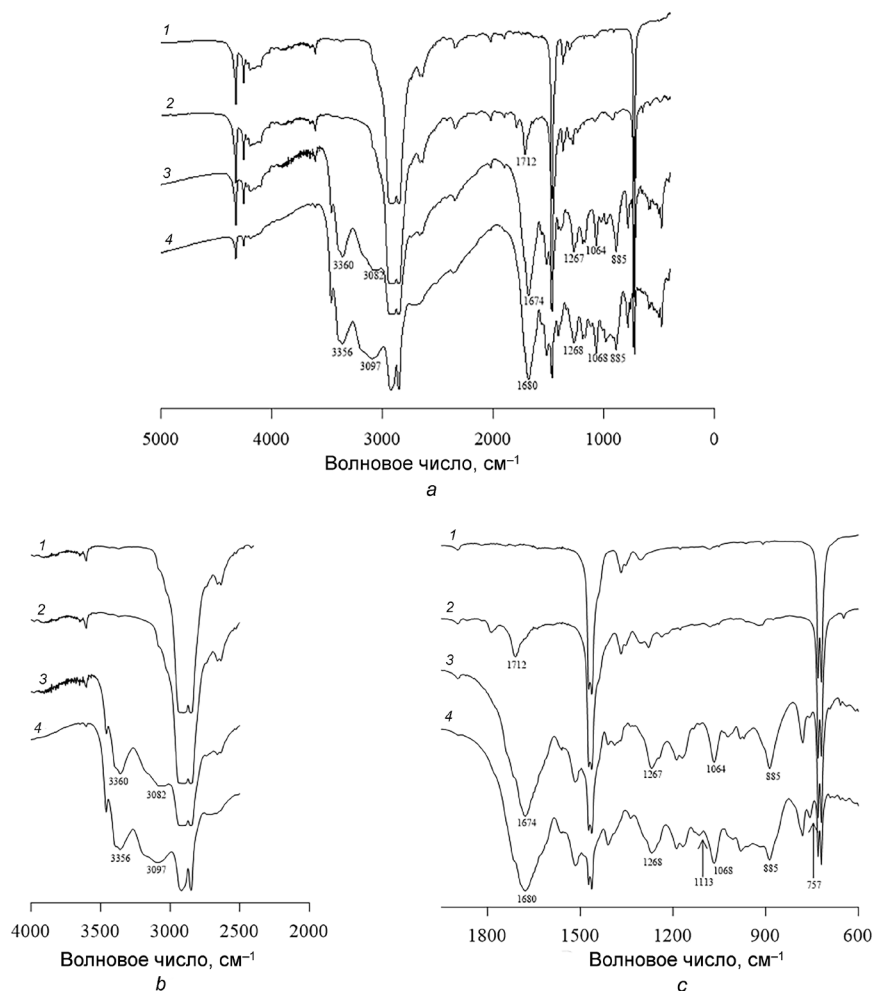


Рис. 1. ИК-спектры исходного ПЭВП, ПФ-1, ПЭВП/АФА и ПЭВП/ПФ-1/АФА в диапазоне волновых чисел $400\text{--}5000\text{ см}^{-1}$ (*a*); $2000\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ (*b*); $600\text{--}1900\text{ см}^{-1}$ (*c*): 1 – ПЭВП; 2 – ПФ-1; 3 – ПЭВП/АФА; 4 – ПЭВП/ПФ-1/АФА

Fig. 1. IR spectra of the original HDPE, PF-1, HDPE/APA and HDPE/PF-1/APA in the wavenumber range of $400\text{--}5000\text{ см}^{-1}$ (*a*); $2000\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ (*b*); $600\text{--}1900\text{ см}^{-1}$ (*c*): 1 – HDPE; 2 – PF-1; 3 – HDPE/APA; 4 – HDPE/PF-1/APA

В отличие от спектра ПЭВП, в спектре ПФ-1 наблюдается полоса карбонильного поглощения в области $1600\text{--}1900\text{ см}^{-1}$ с максимумом при 1712 см^{-1} , что подтверждает наличие привитых карбоксильных групп. ИК-спектр огнестойкого композита ПЭВП/АФА содержит как полосы, характерные для ПЭВП, так и полосы, соответствующие функциональным группам АФА. К наиболее значимым полосам АФА относятся: полоса при 3360 см^{-1} (валентные колебания О–Н); полоса при 3082 см^{-1} (валентные колебания NH^{3+}); полоса при 1674 см^{-1} (деформационные колебания N–H); полоса при 1267 см^{-1} (P=O); полоса при 1064 см^{-1} (P–O) и полоса при 885 см^{-1} (P–O–P) (рис. 1, *a*) [13].

Сравнительный анализ ИК-спектров композитов ПЭВП/АФА и ПЭВП/ПФ-1/АФА показывает, что введение ПФ-1 приводит к существенным изменениям в ИК-спектре композита ПЭВП/ПФ-1/АФА. Наиболее выраженные изменения наблюдаются в области $2500\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ и $600\text{--}1900\text{ см}^{-1}$. Детальный анализ изменений в области $2500\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ (рис. 1, *b*) выявил уширение полосы поглощения NH^{3+} -группы (максимум при 3097 см^{-1}) при добавлении ПФ-1 к композиту ПЭВП/АФА.

Одновременно наблюдается сдвиг полосы при 3356 см^{-1} в область меньших волновых чисел. В диапазоне $600\text{--}1900\text{ см}^{-1}$ (рис. 1, *с*) в спектре системы ПЭВП/ПФ-1/АФА регистрируются изменения формы полос поглощения, а также появление новых полос при 1113 и 757 см^{-1} , которые предположительно соответствуют колебаниям связей С–О и С–О–Р соответственно [14].

Полученные результаты свидетельствуют о возможном взаимодействии между ПФ-1 и АФА на границах раздела фаз. Это взаимодействие может способствовать улучшению межфазной адгезии между матрицей ПЭВП и антипиреном АФА в композите ПЭВП/ПФ-1/АФА, а также оказывать влияние на его структуру и свойства.

На рис. 2 представлены микрофотографии сколов, полученных в жидком азоте, для образцов исходного ПЭВП и композитов ПЭВП с 23 мас. % АФА, изготовленных как без, так и с добавлением компатибилизатора ПФ-1. Анализ микрофотографий, полученных методом СЭМ (рис. 2, *б* и *с*), подтверждает, что ПЭВП формирует непрерывную матрицу, в которой диспергированы частицы АФА.

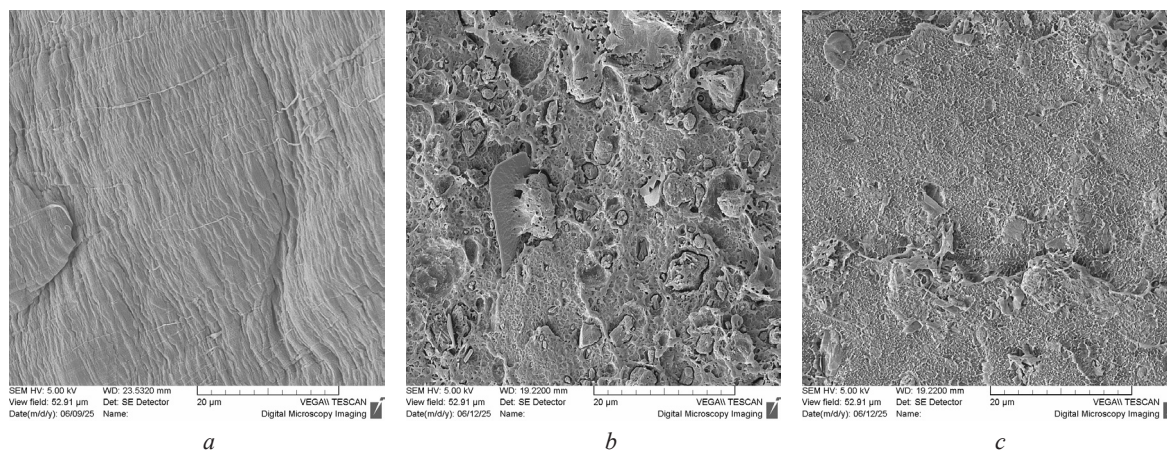


Рис. 2. СЭМ микрофотографии поверхностей скола исходного ПЭВП и ПЭВП, содержащего АФА в количестве 23 мас. % как без компатибилизатора ПФ-1, так и с его добавлением:
а – ПЭВП; *б* – ПЭВП + АФА; *с* – ПЭВП + АФА + ПФ-1

Fig. 2. SEM micrographs of the cleavage surfaces of the initial HDPE and HDPE containing APA in an amount of 23 wt. % both without the compatibilizer PF-1 and with its addition: *a* – HDPE; *b* – HDPE + APA; *c* – HDPE/PF-1/APA

В композите ПЭВП + АФА, полученном без использования ПФ-1 (рис. 2, *б*), наблюдается агрегация частиц антипирена в крупные сферические агломераты размером 2–8 мкм. Характерной особенностью данного композита является слабая адгезия между матрицей ПЭВП и дисперсной фазой АФА, что проявляется в формировании четкой границы раздела между этими компонентами. Низкое межфазное взаимодействие приводит к практически полному отделению частиц АФА от матрицы ПЭВП при формировании скола в жидком азоте, что свидетельствует об отсутствии эффективного адгезионного контакта между поверхностью АФА и ПЭВП.

Введение компатибилизатора ПФ-1 оказывает значительное влияние на морфологию композита ПЭВП + АФА. В антипирированных композициях с добавлением ПФ-1 (рис. 2, *с*) отдельные частицы АФА становятся менее различимыми, что указывает на интенсификацию межфазного взаимодействия. Структура композита приобретает более однородный характер. Добавление компатибилизатора способствует уменьшению размеров частиц дисперсной фазы, увеличению их удельной поверхности и формированию прочных связей между компонентами, что в конечном итоге приводит к улучшению адгезии между частицами АФА и матрицей ПЭВП.

В табл. 1 представлены значения температуры плавления ($T_{пл}$), температуры кристаллизации ($T_{кр}$), энтальпии плавления ($\Delta H_{пл}$) и энтальпии кристаллизации ($\Delta H_{кр}$), определенные методом ДСК для исходного ПЭВП и исследуемых огнестойких композиций.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что введение АФА в матрицу ПЭВП, как с использованием компатибилизатора, так и без него, приводит к незначительному снижению температуры плавления ($T_{пл}$) по сравнению с исходным ПЭВП. В то же время для всех ком-

Т а б л и ц а 1. Теплофизические параметры плавления и кристаллизации исходного ПЭВП, компатибилизатора ПФ-1 и антипирированных ПЭВП композитов

Table 1. Thermophysical parameters of melting and crystallization of the initial HDPE, compatibilizer PF-1 and antipyreric HDPE composites

Образец Sample	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$ $T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{пл}, \text{Дж/г}$ $\Delta H_m, \text{J/g}$	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$ $T_{cr}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{кр}, \text{Дж/г}$ $\Delta H_{cr}, \text{J/g}$	$\Delta I_{кр}$ ΔI_{cr}
ПЭВП	136,5	248,0	112,7	254,0	1
ПФ-1	133,0	250,0	117,4	244,8	1
ПЭВП/АФА–23 %	135,0	213,0	116,3	212,0	1,1
ПЭВП/ПФ-1–15 %/АФА–23 %	134,0	196,3	117,0	192,3	1,03

позиций наблюдается повышение температуры кристаллизации ($T_{кр}$) и индекса кристаллизации ($\Delta I_{кр}$) относительно чистого ПЭВП. Это, вероятно, связано с нуклеирующим эффектом антипирена АФА, частицы которого могут выступать в качестве центров кристаллизации для макромолекул ПЭВП.

Кроме того, следует отметить, что для композиции ПЭВП, содержащей АФА в сочетании с компатибилизатором ПФ-1, наблюдается снижение значений энтальпий плавления ($\Delta H_{пл}$) и кристаллизации ($\Delta H_{кр}$) по сравнению с композицией, содержащей только АФА. Данное изменение, по-видимому, обусловлено интенсификацией межфазных взаимодействий в присутствии компатибилизатора ПФ-1. Это может приводить к увеличению доли аморфной фазы как за счет расширения межфазного слоя на границе раздела ПЭВП–АФА, так и вследствие увеличения суммарной площади поверхности частиц АФА при их диспергировании.

Оценка стойкости к горению исходного ПЭВП, компатибилизатора ПФ-1 и антипирированных композитов ПЭВП проводилась на основе измерения скорости горения (v) горизонтально закрепленных образцов. Анализ данных, представленных в табл. 2, демонстрирует значительное снижение линейной скорости горения для полученных композитов по сравнению с исходным ПЭВП и ПФ-1, что свидетельствует об их пониженной горючести.

Т а б л и ц а 2. Скорость горения (v) исходного ПЭВП, компатибилизатора ПФ-1 и антипирированных ПЭВП композитов

Table 2. Burning rate (v) of the original HDPE, compatibilizer PF-1 and flame-retardant HDPE composites

Образец Sample	$v, \text{мм/мин}$ $v, \text{mm/min}$	Каплепадение Dropping point
ПЭВП	25,0	Да
ПФ-1	29,6	Да
ПЭВП/АФА–23 %	22,0	Нет
ПЭВП/ПФ-1–15 %/АФА–23 %	20,0	Нет

Горение исходного ПЭВП и ПФ-1 характеризуется быстрым распространением пламени по поверхности образца и интенсивным образованием горящих капель расплава. В отличие от этого, композит, содержащий антипирен АФА, демонстрирует значительно более низкую скорость горения и отсутствие каплеобразования (табл. 2). Предполагается, что уменьшение скорости горения и подавление каплепадения в антипирированном композите обусловлено формированием коксового слоя на поверхности материала. Этот слой выполняет двоякую функцию: во-первых, он препятствует выходу летучих горючих продуктов в газовую фазу, и, во-вторых, ограничивает диффузию горючих газов к зоне пламени.

Введение компатибилизатора ПФ-1 в композицию ПЭВП/АФА приводит к дальнейшему снижению скорости горения (табл. 2). Предположительно, наблюдаемый эффект обусловлен улучшением дисперсии и более равномерным распределением антипирена АФА в матрице ПЭВП в присутствии ПФ-1. В результате этого, в процессе горения композита ПЭВП/ПФ-1/АФА формируется более структурированный и однородный коксовый слой, обеспечивающий более эффективное замедление скорости горения и подавление каплеобразования.

Как известно, применение антипиренов зачастую сопряжено с ухудшением комплекса механических характеристик полимерных материалов. В связи с этим для оценки влияния антипирена АФА и компатибилизатора ПФ-1 на механические свойства исследуемых композитов был проведен комплекс механических испытаний. Результаты представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Механические характеристики исходного ПЭВП, компатибилизатора ПФ-1 и антипирированных ПЭВП композитов

Table 3. Mechanical characteristics of the original HDPE, compatibilizer PF-1 and flame-retarded HDPE composites

Образец Sample	E_p , ГПа E_b , GPa	σ_T , МПа σ_y , MPa	ε_p , % ε_b , %
ПЭВП	0,80	27,5	353,0
ПФ-1	0,96	30,4	84,0
ПЭВП/АФА–23 %	1,20	29,7	21,6
ПЭВП/ПФ-1–15 %/АФА–23 %	1,32	36,5	9,0

Анализ данных, представленных в табл. 3, демонстрирует, что введение АФА в ПЭВП матрицу приводит к повышению модуля упругости при растяжении (E_p) и предела текучести (σ_T) по сравнению с исходным ПЭВП. Однако наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве (ε_p) антипирированного композита относительно чистого полимера.

Сравнение механических свойств композитов ПЭВП/АФА и ПЭВП/ПФ-1/АФА выявило существенное влияние добавки ПФ-1 на механические характеристики материала. Введение ПФ-1 в композицию ПЭВП/АФА приводит к значимому увеличению значений E_p и σ_T , сопровождающемуся снижением ε_p . Предполагается, что наблюдаемый рост E_p и σ_T обусловлен улучшением межфазной адгезии между матрицей ПЭВП и частицами антипирена АФА, вызванным присутствием компатибилизатора ПФ-1. Как было показано ранее в данном сообщении, ПФ-1 способствует возникновению межфазных взаимодействий на границе раздела «полимер–антипирен», что приводит к более эффективному диспергированию АФА в полимерной матрице. В результате АФА может проявлять свойства дисперсного наполнителя, повышая жесткость и прочность композита, но снижая его пластичность.

Заключение. В рамках проведенных исследований установлено, что введение компатибилизатора ПФ-1 в композиты на основе полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), содержащие антипирен АФА, позволяет существенно улучшить комплекс эксплуатационных характеристик, в частности, повысить огнестойкость, прочность и жесткость материала.

Методом ИК-спектроскопии (в диапазоне 400–5000 см⁻¹) было подтверждено наличие межфазных взаимодействий между компатибилизатором ПФ-1 и антипиреном АФА. Данные взаимодействия способствуют улучшению совместимости этих компонентов в составе композита ПЭВП.

Добавление ПФ-1 оказывает значительное влияние на морфологию композита ПЭВП + АФА, приводя к уменьшению размеров частиц дисперсной фазы (АФА) и увеличению их удельной поверхности. Как следствие, формируется более однородная фазовая структура, что обусловлено улучшением адгезии между частицами АФА и матрицей ПЭВП.

Результаты ДСК показали, что для композиции ПЭВП, содержащей АФА и ПФ-1, наблюдается снижение энтальпий плавления ($\Delta H_{пл}$) и кристаллизации ($\Delta H_{кр}$) по сравнению с аналогичным композитом без компатибилизатора. Это подтверждает гипотезу об интенсификации межфазных взаимодействий в присутствии ПФ-1.

Композиция ПЭВП с АФА и ПФ-1 демонстрирует наименьшую скорость горения среди всех исследованных материалов. Это связано, вероятно, с более гомогенным и равномерным распределением антипирена АФА в объеме ПЭВП и формированием более однородного по структуре коксового слоя, эффективно препятствующего распространению пламени.

Введение ПФ-1 приводит к увеличению модуля упругости при растяжении (E_p) и предела текучести (σ_T) по сравнению с композитом ПЭВП/АФА без компатибилизатора. Это свидетельствует о реализации усиливающего эффекта антипирена АФА, обусловленного улучшением межфазной адгезии благодаря ПФ-1.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т25В-005).

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. T25B-005).

Список использованных источников

1. Асеева, Р. М. Горение полимерных материалов / Р. М. Асеева, Г. Е. Зайков. – М., 1981. – 280 с.
2. Сравнительный анализ свойств полимеризационно наполненных полиэтиленовых композиций пониженной горючести / И. Н. Мешкова, А. И. Петросян, В. М. Лалаян, И. Л. Дубникова // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2008. – Т. 50, № 5. – С. 918–924.
3. Кодолов, В. И. Замедлители горения полимерных материалов / В. И. Кодолов. – М., 1980. – 242 с.
4. Boryniec, S. Polymer Combustion Processes. 3. Flame Retardants for Polymeric / S. Boryniec, W. Przygocki // Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology. – 2001. – Vol. 17. – P. 127–148.
5. Antonov, A. V. Combustion of char-forming polymeric systems / A. V. Antonov, I. S. Reshetnikov, N. A. Khalturinskij // Russian Chemical Reviews. – 1999. – Vol. 68, N 7. – P. 605–614. <https://doi.org/10.1070/rc1999v068n07abeh000408>
6. Михайлин, Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю. А. Михайлин. – СПб., 2011. – 416 с.
7. Studies on compatibilization of intumescent flame-retardant/PP composites based on etched PP / Z.-L. Ma, X.-Y. Pang, J. Zhang, H.-T. Ding // Journal of Applied Polymer Science. – 2002. – Vol. 84, N 3. – P. 522–527. <https://doi.org/10.1002/app.10261>
8. Microencapsulated fire retardants for polyolefins / I. S. Reshetnikov, N. S. Zubkova, A. V. Antonov [et al.] // Materials Chemistry and Physics. – 1998. – Vol. 52, N 1. – P. 78–82. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(98\)80010-2](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(98)80010-2)
9. Microencapsulated ammonium polyphosphate with boron-modified phenolic resin / W. Gao, Sh. Wang, F. Meng [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. – 2016. – Vol. 133, N 30. – Art. 43720. <https://doi.org/10.1002/app.43720>
10. Chung, T. C. M. Functionalization of Polyolefins / T. C. M. Chung. – San Diego, 2002. – 274 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-174651-3.X5000-9>
11. Jurkowski, B. Functionalization of olefin polymer and copolymer blends in the melt / B. Jurkowski, S. S. Pesetskii, Y. M. Krivoguz // Polyolefin Blends / eds.: D. Nwabunma, T. Kyu. – New York, 2008. – Ch. 10. – P. 273–308. <https://doi.org/10.1002/9780470199008.ch10>
12. Песецкий, С. С. Функционализация полиолефинов: тенденции и перспективы исследований / С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз // Полимерные материалы и технологии. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 5.
13. *In situ* synthesized and dispersed melamine polyphosphate flame retardant epoxy resin composites / T. Zhou, W. Chen, W. Duan [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. – 2019. – Vol. 136, N 11. – Art. 47194. <https://doi.org/10.1002/app.47194>
14. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия / А. Смит. – М., 1982. – 328 с.

References

1. Aseyeva P. M., Zaykov G. Ye. *Combustion of Polymeric Materials*. Moscow, 1981. 280 p. (in Russian).
2. Meshkova I. N., Petrosyan A. I., Lalayan V. M., Dubnikova I. L. A comparative analysis of polymerization filled polyethylene composites with reduced flammability. *Polymer Science, Series B*, 2008, vol. 50, no. 5–6, pp. 111–116.
3. Kodolov V. I. *Flame Retardants for Polymeric Materials*. Moscow, 1980. 242 p. (in Russian).
4. Boryniec S., Przygocki W. Polymer Combustion Processes. 3. Flame Retardants for Polymeric. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 2001, vol. 17, pp. 127–148.
5. Antonov A. V., Reshetnikov I. S., Khalturinskij N. A. Combustion of char-forming polymeric systems. *Russian Chemical Reviews*, 1999, vol. 68, no. 7, pp. 605–614. <https://doi.org/10.1070/rc1999v068n07abeh000408>
6. Mikhaylin Yu. A. *Heat, Thermal and Fire Resistance of Polymeric Materials*. Saint Petersburg, 2011. 416 p. (in Russian).
7. Ma Z.-L., Pang X.-Y., Zhang J., Ding H.-T. Studies on compatibilization of intumescent flame-retardant/PP composites based on etched PP. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, vol. 84, no. 3, pp. 522–527. <https://doi.org/10.1002/app.10261>
8. Reshetnikov I. S., Zubkova N. S., Antonov A. V., Potapova E. V., Svistunov V. S., Tuganova M. A., Khalturinskij N. A. Microencapsulated fire retardants for polyolefins. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, vol. 52, no. 1, pp. 78–82. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(98\)80010-2](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(98)80010-2)
9. Gao W., Wang S., Meng F., Wang Y., Ma H. Microencapsulated ammonium polyphosphate with boron-modified phenolic resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, vol. 133, no. 30, art. 43720. <https://doi.org/10.1002/app.43720>
10. Chung M. T. C. *Functionalization of Polyolefins*. San Diego, 2002. 274 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-174651-3.X5000-9>
11. Jurkowski B., Pesetskii S. S., Krivoguz Y. M. Functionalization of olefin polymer and copolymer blends in the melt. Nwabunma D., Kyu T. *Polyolefin Blends*. New York, 2008, ch. 10, pp. 273–308. <https://doi.org/10.1002/9780470199008.ch10>
12. Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M. Functionalization of polyolefins: trends and prospects for research. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2018, vol. 4, no. 2, pp. 5 (in Russian).
13. Zhou T., Chen W., Duan W., Liu Y., Wang Q. *In situ* synthesized and dispersed melamine polyphosphate flame retardant epoxy resin composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 136, no. 11, art. 47194. <https://doi.org/10.1002/app.47194>
14. Smit A. L. *Applied Infrared Spectroscopy*. New York, 1982. 328 p.

Информация об авторе

Кривогуз Юрий Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий отделом. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: yurikriv@tut.by. ORCID: 0000-0002-1182-6938.

Information about the author

Krivoguz Yuri M. – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: yurikriv@tut.by. ORCID: 0000-0002-1182-6938.