

Изучение возможности повышения физико-механических характеристик смесей вторичных полимеров

Study of the possibility of increasing the physico-mechanical properties of recycled polymers blends

*Н.Г. ДАВИДЬЯНЦ¹, И.Ю. ГОРБУНОВА¹, Т.П. КРАВЧЕНКО¹,
К.В. КРАСНОВ², О.В. ЖИЛИНА¹, Н.М. ЧАЛАЯ^{1,3}*

*N.G. DAVIDYANTS¹, I.YU. GORBUNOVA¹, T.P. KRAVCHENKO¹,
K.V. KRASNOV², O. V. ZHILINA¹, N.M. CHALAYA^{1,3}*

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

² ООО Поликом, Московская область, Россия

³ АО «Межотраслевой институт переработки пластмасс – НПО «Пластик»», Москва, Россия

¹ Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

² LLC Polykom, Moscow Region, Russia

³ JSC «MIPP-NPO Plastic», Moscow, Russia

kravchenkopolimer@gmail.com

В работе изучено влияние компатибилизатора – стирол-этилен-бутилен-стирольного термоэластопласта – на совместимость смеси вторичного полистирола и вторичного полиэтилена с целью повышения ее физико-механических характеристик. Показано, что введение 2,5 масс.% компатибилизатора в изученную смесь полимеров в соотношении 50/50 масс.% улучшает комплекс физико-механических и технологических свойств.

Ключевые слова: полистирол, полиэтилен, полимерная смесь, компатибилизация, переработка, термостабильность, физико-механические свойства

The effect of a compatibilizer – styrene-ethylene-butylene-styrene thermoplastic elastomer – on the compatibility of a mixture of recycled polystyrene and recycled polyethylene is studied to improve its physical and mechanical characteristics. It is shown that the introduction of 2.5 wt.% compatibilizer into the studied polymer blend (50/50 wt.%) improves its complex of physical, mechanical and technological properties.

Keywords: polystyrene, polyethylene, polymer blend, compatibilization, processing, thermostability, physical and mechanical properties

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-05-22-26

В последнее время представляет большой интерес совмещение нескольких вторичных полимеров с целью создания нового материала с улучшенным комплексом свойств для применения в некоторых отраслях техники. Особый интерес представляет модификация смесей дешевых коммерческих полимеров [1–3].

Повсеместное использование полимеров приводит к ежегодному значительному росту их отходов, большая часть которых состоит из смесей полимеров, в результате чего после утилизации и переработки таких отходов образуются промышленные смеси из двух или более видов полимеров. В связи с проблемами сортировки и ограниченной совместимостью большинства коммерческих полимеров, технический потенциал полимерных смесей часто остается неиспользованным, а их переработка может представлять особую трудность [4].

Выделяют следующие категории пригодных для вторичной переработки полимерных смесей [5]:

- смеси полимеров с одинаковой химической структурой, которые позволяют получить удовлетворительные физико-механические свойства без обеспечения совместимости или же с ограниченной совместимостью (полистиролы, полиолефины, сложные полиэфиры и пр.);
- смеси полимеров с различной химической структурой, для которых требуется повышение совместимости и ударопрочности;
- смеси полимеров, в которых присутствуют биоразлагаемые полимеры, например, полилактид, который смешивают с другими полимерами для устранения его недостатков – ограниченного удлинения при разрыве и ударопрочности, низкой устойчивости к

термическому разложению при переработке, особенно при повышенной температуре и в присутствии влаги.

Использование новых материалов для производства может быть сокращено за счет переработки вышедших из употребления полимерных изделий, что позволит бороться с экологическим загрязнением нашей планеты и поможет сохранить ее природные ресурсы [6].

Полистирол (ПС) и полиэтилен (ПЭ) являются наиболее распространенными полимерами, изделия из которых используются во многих отраслях промышленности. Основным недостатком полистирола является его хрупкость и низкая ударная вязкость, а полиэтилен, в свою очередь, характеризуется прочностью и высокой ударной вязкостью при низких температурах [7]. Следовательно, за счет синергического эффекта смесь данных полимеров может найти более широкое применение в отдельных отраслях техники. Однако из-за низкой межфазной адгезии между компонентами данная смесь является несовместимой, что выражается в ее низких физико-механических показателях [8].

Для повышения совместимости различных полимерных пар чаще всего прибегают к использованию компатибилизаторов – специальных добавок, которые улучшают межфазную адгезию и комплекс свойств несовместимых смесей [9].

Цель работы состоит в исследовании физико-механических и технологических свойств композиций на основе смесей вторичного полистирола и вторичного полиэтилена с применением стирол-этилен-бутилен-стирольного блок-сополимера (СЭБС) в качестве компатибилизатора для определения области применения разработанного материала.

Отходы полистирола (ПСвт) марки 30FEB от ПАО «Нижнекамскнефтехим» в виде дробленой пленки были получены после термоформования пищевой упаковки на предприятии ЗАО «ИН-ЛАЙН-Р». Вторичный полиэтилен (ПЭвт) был получен измельчением отходов трубной продукции, произведенной из PE HD03490 PE компании СИБУР.

Для выбранной пары полимеров в качестве компатибилизатора был выбран привитый малеиновым ангидридом стирол-этилен-бутилен-стирольный термоэластопласт (мСЭБС) марки Globalprene 9901 компании Lee Chang Yung Chemical Industry Corp., Китай. Прививка малеинового ангидрида к СЭБС способна дополнительно повысить совместимость полимеров за счет реакций с полимерами, которые имеют реакционноспособные группы [10].

Смеси получали следующим образом: компоненты (вторичный полистирол, вторичный полиэтилен и малеинизированный СЭБС) в разных соотношениях сначала перемешивали механическим образом, после чего композиции загружали в двухшнековый экструдер SINO ALLOY MACHINERY INC. PSM 30 (Тайвань) (диаметр шнека 31,2 мм, $L/D = 40$, скорость вращения шнека 250 об/мин). Экструдирование проводилось при температуре 230°C, полученные стренги, выходящие из головки экструдера, охлаждались в ванне с последующей грануляцией и сушкой.

Образцы для физико-механических испытаний (брусочки без надреза для ударной вязкости, лопатки для испытаний на растяжение) были получены на литьевой машине МиниТПА-100 (Россия), температуры по зонам составили 122, 183 и 220°C соответственно.

Определение показателей физико-механических свойств образцов композиций при растяжении проводилось в соответствии с ГОСТ 11262–2017 на разрывной машине 50 ST компании Tinius Olsen (Норвегия) на образцах в форме лопаток типа 2. Скорость испытания составляла 50 мм/мин, расстояние между захватами – 60 мм.

Ударную вязкость образцов по Изоду определяли в соответствии с ГОСТ 19109–2017 с использованием маятникового копра Gotech GT-7045-MDL (Тайвань) на брусках без надреза размерами 63,5×12,7×6,4 мм. Начальная скорость и энергия составляет 3,46 м/с и 5,5 Дж соответственно.

Показатель текучести расплава (ПТР) определяли по ГОСТ 11645–2021 на пластометре ИИРТ-М при температурах 190°C (для ПЭ) и 200°C (для ПС и смесей полимеров), нагрузке 5 кг на капилляре длиной $8 \cdot 10^{-3}$ м с диаметром отверстия $2,09 \cdot 10^{-3}$ м. Для сравнения значений ПТР полиэтилена, полученных при нестандартной температуре, рассчитывали коэффициент перерасчета ($K_{пер}$) по формуле (1) [11]:

$$K_{пер} = \frac{F_1}{F_2} \exp \left[\frac{E_H}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right], \quad (1)$$

где F , T – нагрузка и температура значений ПТР, E_H – энергия активации вязкого течения ПЭВП (35 кДж/моль).

После чего значения ПТР при других условиях пересчитывали по уравнению (2) [11]:

$$ПТР_{(T_1, F_1)} = K_{пер} \cdot ПТР_{(T_2, F_2)} \quad (2)$$

Термостабильность расплава определяли реологическим методом на пластометре ИИРТ-М при температуре 200°C и нагрузке 5 кг. Испытания проводили при времени выдержки полимеров в камере пластометра 5, 10, 15 и 20 минут. За нормируемый показатель принимали время термостабильности расплава полимера, при котором изменение ПТР или вязкости расплава составляет 15%. Термостабильность расплавов характеризуется продолжительностью нахождения термопласта выше температуры плавления без снижения его свойств [11].

Для исследования морфологии поверхности образцов применялся метод сканирующей электронной микроскопии. Снимки были сделаны в Центре коллективного пользования Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова Российской Академии Наук. Брусочки полимера с сечением 4×6 мм охлаждались в течение 30 мин в жидком азоте. Для стока заряда образцы помещали на углеродный скотч и напыляли на них слой золота толщиной 10 нм (Q150R ES, Quorum Technologies, Великобритания). Морфологию сколов исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа Prisma E (Thermo Scientific,

Чехия) в режиме высокого вакуума с ускоряющим напряжением 2–5 кВ. Образцы закрепляли на Г-образном держателе перпендикулярно оптической оси микроскопа.

Перед введением компатибилизатора в смесь необходимо было выявить оптимальное соотношение полимеров, при котором физико-механические свойства будут более высокими. В работе была рассмотрена смесь ПСвт + ПЭвт при трех соотношениях полимеров: 80/20, 50/50 и 20/80 масс.% соответственно.

Показатель текучести расплава является важной технологической характеристикой, которая позволяет подобрать оптимальный режим переработки материала: необходимую температуру, предпочтительный метод переработки и другие параметры. Значения ПТР композиций без компатибилизатора представлены на рис. 1. Стандартное отклонение значений ПТР составило не более 0,2 г/10 мин.

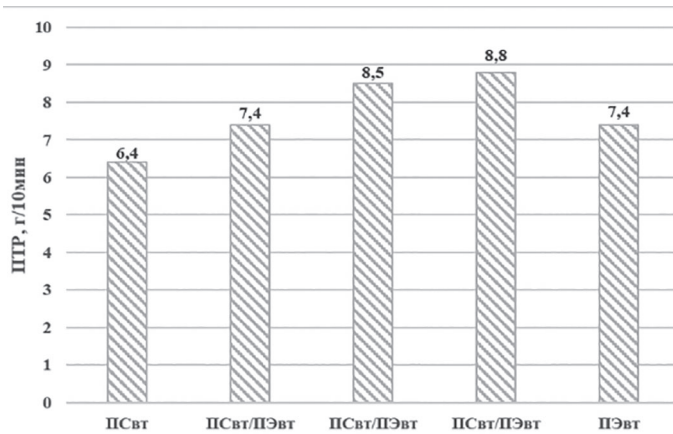


Рис. 1. Значения показателя текучести расплава композиций.

Как видно из полученных данных, введение вторичного полиэтилена во вторичный полистирол приводит к повышению текучести смеси. При увеличении содержания полиэтилена в полистироле наблюдается дальнейшее увеличение ПТР с максимальным его значением при соотношении ПСвт + ПЭвт 20/80 (повышение ПТР с 7,4 до 8,8 г/10 мин). Повышение текучести, вероятно, связано с наличием рыхлого межфазного слоя из-за недостаточной совместимости компонентов, т.е. большей долей свободного объема в смеси, приводящей к снижению вязкости композиций.

Термостабильность, характеризуемая временем термостабильности, оценивалась по коэффициенту термостабильности (K), который равен отношению ПТР при длительной выдержке материала в камере пластометра к значению ПТР при стандартном времени выдержки (за стандартное время было выбрано 5 мин в соответствии с ГОСТ 11645–2021). На рис. 2 представлены значения полученных коэффициентов термостабильности вторичных полимеров и смесей на их основе.

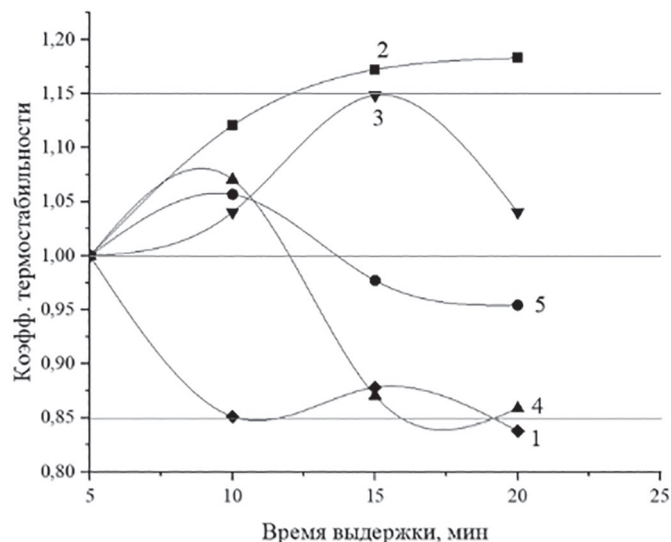


Рис. 2. Зависимость коэффициента термостабильности расплава смесей от времени выдержки в пластометре: 1 – ПСвт; 2 – ПЭвт; 3 – ПСвт + ПЭвт 80/20; 4 – ПСвт + ПЭвт 50/50; 5 – ПСвт + ПЭвт 20/80.

За время термостабильности (τ_T) композиций принимали время, в течение которого значения ПТР при заданной температуре эксперимента изменялись не более, чем на 15%. Таким образом, композиция, у которой коэффициент термостабильности находится в диапазоне 0,85–1,15, считается термостабильной, согласно универсальной методике оценки термостабильности, подходящей под многие методы переработки полимерных материалов [11]. Исходя из полученных данных, было получено время термостабильности для всех композиций и исходных вторичных полимеров (таблица 1).

Таблица 1. Время термостабильности расплава вторичных полимеров и смесей на их основе.

Композиции	τ_T , мин
ПСвт	10
ПЭвт	11
ПСвт + ПЭвт 80/20	15
ПСвт + ПЭвт 50/50	16,5
ПСвт + ПЭвт 20/80	> 20

Из полученных данных видно, что время термостабильности вторичного полистирола – наименьшее среди всех композиций (10 минут). Введение ПЭвт в ПСвт приводит к повышению времени термостабильности, а у смеси ПСвт + ПЭвт с соотношением компонентов 20/80 время термостабильности составляет более 20 минут, что позволяет использовать более высокую температуру переработки при получении изделий из данной смеси.

Вторичные полимеры и смеси на их основе обладают пониженными физико-механическими свойствами, в связи с чем повышение их прочностных характеристик до удовлетворительного уровня показателей, приближающегося к уровню исходных полимеров, является первостепенной задачей для получения коммерчески востребованных полимеров. В таблицах 2, 3 и на рис. 3 представлены физико-механические характеристики исследованных смесей вторичных термопластов.

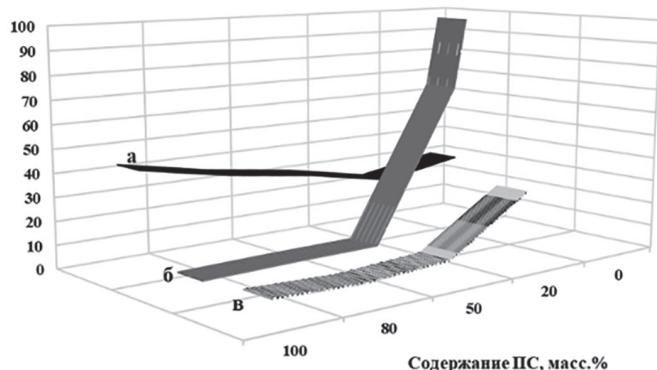


Рис. 3. Зависимости прочности при растяжении (а), относительного удлинения при разрыве (б) и ударной вязкости по Изоду (в) смеси ПСвт + ПЭвт от содержания ПСвт.

Как видно из полученных результатов, при увеличении содержания ПСвт в смеси ПСвт + ПЭвт наблюдается повышение прочности при растяжении, при этом относительное удлинение снижается, а при содержании ПС выше 50 масс.% – выходит на плато. Модуль упругости смесей ПСвт + ПЭвт повышается при увеличении содержания ПСвт.

Широко известно [12], что при смешении хрупкого ПС с пластичным ПЭВП прочность смеси не улучшается, а значения удлинения при разрыве минимальны. Полученные показатели физико-механических свойств вызваны слабой межфазной адгезией между ПС и ПЭ за счет их несовместимости.

Таблица 2. Физико-механические свойства полученных композиций при растяжении.

Композиция	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при пределе текучести, %	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости при растяжении, МПа
ПЭвт	30 ($\pm 0,5$)	16,6 (± 1)	269 (± 20)	78 (± 4)
ПСвт + ПЭвт 20/80	24 ($\pm 0,4$)	10,1 ($\pm 1,5$)	70,6 (± 15)	377 (± 10)
ПСвт + ПЭвт 50/50	31 ($\pm 0,4$)	6,8 (± 12)	6,8 (± 12)	738 (± 12)
ПСвт + ПЭвт 80/20	36 ($\pm 0,5$)	6,6 (± 9)	6,6 (± 9)	1301 (± 15)
ПСвт	43 ($\pm 0,2$)	6,0 ($\pm 1,5$)	6,0 ($\pm 1,5$)	1677 (± 25)

Значения прочностных характеристик смеси вторичных полимеров при соотношении 50/50 масс.% близки к характеристикам при соотношении 80/20 масс.%.

Результаты испытания на ударную вязкость образцов композиций по Изоду представлены в таблице 3.

Таблица 3. Ударная вязкость по Изоду композиций.

Композиция	Ударная вязкость по Изоду, кДж/м ²
ПЭвт	Без разрушения
ПСвт + ПЭвт 20/80	31 ($\pm 0,5$)
ПСвт + ПЭвт 50/50	8,5 ($\pm 0,4$)
ПСвт + ПЭвт 80/20	8,0 ($\pm 0,2$)
ПСвт	6,5 ($\pm 0,2$)

По данным таблицы мы видим, что образец вторичного полиэтилена не разрушился (тип разрушения N), а при его введении во вторичный полистирол наблюдается повышение ударной вязкости. При этом тип разрушения образца меняется на тип С, а наибольшее значение ударной вязкости наблюдается при введении 80 масс.% ПЭвт – 31 кДж/м².

Исходя из полученных результатов, модификация хрупкого полистирола полиэтиленом без использования compatibilizatora не приводит к образованию материала с лучшей деформируемостью, что также подтвердили полученные результаты определения относительного удлинения образцов при разрыве. Возможно, это может быть связано со слабой адгезией на поверхности раздела и недостаточной дисперсностью компонентов, характерной для смесей несовместимых полимеров.

Полученные результаты позволили нам предположить, что compatibilizator предпочтительнее вводить в смесь ПСвт + ПЭвт при соотношении полимеров 50/50 масс.%. Данное соотношение обеспечивает усредненные физико-механические характеристики и позволяет перерабатывать большее количество полимерных отходов обоих полимеров – как полистирола, так и полиэтилена. В смесь с данным соотношением компонентов вводился мСЭБС в четырех разных концентрациях: 2,5, 5, 7,5 и 10 масс.%, которые были выбраны с целью определения оптимального содержания compatibilizatora для достижения удовлетворительных эксплуатационных свойств без удорожания конечной смеси полимеров.

На рис. 4 приведены данные по ПТР смесей ПСвт + ПЭвт 50/50 с разным содержанием compatibilizatora.

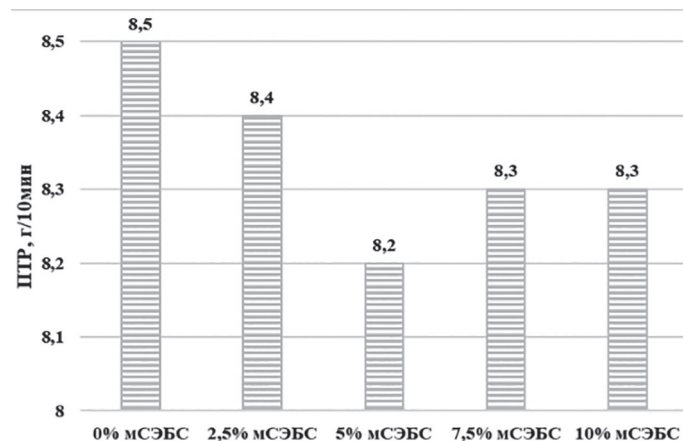


Рис. 4. Значения ПТР смеси ПСвт + ПЭвт 50/50 при введении compatibilizatora.

Обнаружено незначительное изменение текучести композиций при введении compatibilizatora.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициентов термостабильности расплавов компатибилизированных смесей вторичных полимеров от времени выдержки, а в таблице 4 приведено полученное время термостабильности расплава для данных смесей.

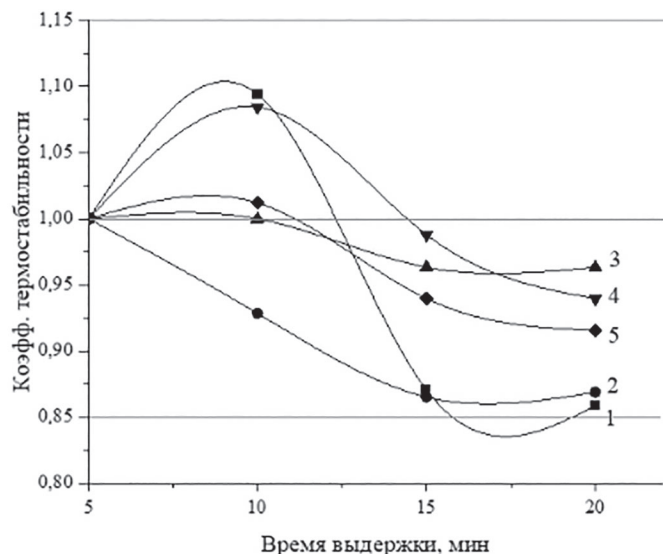


Рис. 5. Зависимость коэффициента термостабильности расплава от времени прогрева смесей ПСвт + ПЭвт 50/50 с содержанием мСЭБС, масс. %: 1 – без мСЭБС; 2 – 2,5; 3 – 5,0; 4 – 7,5; 5 – 10.

Введение компатибилизатора в смесь вторичных термопластов позволило получить время термостабильности более 20 минут, что говорит о возможности их переработки при более высоких температурах основными методами, такими как экструзия и литье под давлением.

Таблица 4. Время термостабильности композиций, содержащих компатибилизатор.

Композиция	$\tau_{\text{т}}$, мин
ПСвт + ПЭвт 50/50	16,5
ПСвт + ПЭвт + мСЭБС 50/50/2,5	> 20
ПСвт + ПЭвт + мСЭБС 50/50/5	> 20
ПСвт + ПЭвт + мСЭБС 50/50/7,5	> 20
ПСвт + ПЭвт + мСЭБС 50/50/10	> 20

Физико-механические свойства компатибилизированных смесей вторичных полимеров представлены на рис. 6 и в таблице 5.

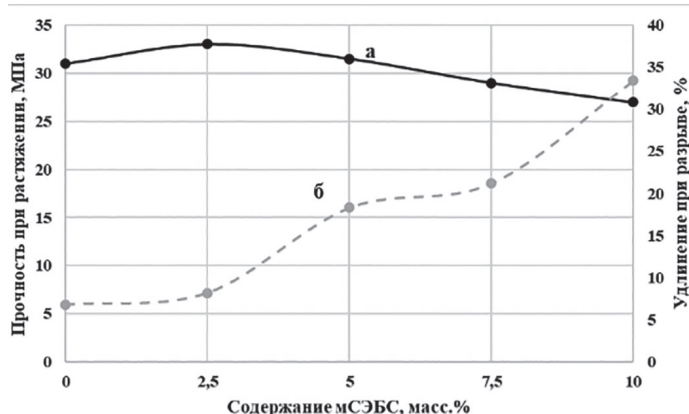


Рис. 6. Зависимости прочности при растяжении (а) и относительного удлинения при разрыве (б) и смеси ПСвт + ПЭвт 50/50 от содержания мСЭБС.

Таблица 5. Физико-механические свойства композиций ПСвт + ПЭвт 50/50, компатибилизированных мСЭБС.

Композиция	Содержание мСЭБС, масс. %	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Относительное удлинение при пределе текучести, %	Модуль упругости при растяжении, МПа
ПСвт + ПЭвт	0	31 ($\pm 0,4$)	6,8 (± 12)	6,8 (± 12)	738 (± 12)
ПСвт + ПЭвт + мСЭБС	2,5	33 ($\pm 0,4$)	8,2 (± 1)	8,1 (± 1)	926 ($\pm 9,5$)
	5,0	31,5 ($\pm 0,6$)	18,3 (± 3)	7,3 ($\pm 0,3$)	711 (± 10)
	7,5	29 ($\pm 0,5$)	21,2 (± 5)	7,0 ($\pm 0,5$)	591 (± 13)
	10,0	27 ($\pm 0,4$)	33,4 (± 3)	7,0 ($\pm 0,2$)	537 (± 20)

При введении стирольного термоэластопласта в смесь полимеров до 5 масс. % наблюдается небольшое повышение прочности при растяжении. При этом максимальное значение прочности – 33 МПа – достигается при введении всего 2,5 масс. % мСЭБС в смесь ПСвт/ПЭвт. Начиная с 7,5 масс. % мСЭБС, значение прочности уменьшается и становится ниже значения прочности некомпатибилизированной смеси (31 МПа). Относительное удлинение постепенно увеличивается с ростом содержания термоэластопласта в составе смеси. Снижение прочности, вероятно, может быть связано с тем, что получаемая более тонкая морфологическая структура композиции вызывает изменение типа разрушения материала с хрупкого на пластическое.

При введении стирольного термоэластопласта в смесь ПСвт + ПЭвт 50/50 модуль упругости при растяжении достигает своего максимума при 2,5 масс. %, а затем резко снижается. В составе стирольного блок-сополимера присутствует этилен-бутиленовый блок, который приводит к повышению эластичности композиций и, как следствие, к снижению модуля упругости.

С целью изучения влияния компатибилизатора на совместимость смесей вторичных полимеров в работе методом сканирующей электронной микроскопии была изучена морфология смесей. На рис. 7 представлены СЭМ снимки смеси ПСвт + ПЭвт 50/50 с разным содержанием компатибилизатора.

На снимке смеси без компатибилизатора (рис. 7а) можно видеть грубое разделение фаз, вызванное, возможно, низкой адгезией компонентов. При этом наблюдается вырыв дисперсных частиц размером 4–6 мкм, произошедший, вероятно, во время криогенного разлома образца. Все это указывает на несовместимость данных полимеров, которая, как считается [13], связана с высоким межфазным натяжением между компонентами во время смешения.

При введении 2,5 масс. % мСЭБС (рис. 7б) заметно снижение размера частиц до 0,7–1,2 мкм, вероятно, за счет снижения межфазного натяжения при взаимодействии мСЭБС с каждым компонентом смеси. Когда мСЭБС располагается в межфазном слое, его стирольные блоки диффундируют в полистирольную фазу, а этилен-бутиленовый блок – в полиэтиленовую.

Дальнейшее увеличение содержания мСЭБС до 5,0 масс. % (рис. 7в) приводит к образованию однородной непрерывной фазы смеси и снижению размеров частиц дисперсной фазы до 0,9 мкм.

Полученные результаты показали, что при модификации мСЭБС смеси ПСвт + ПЭвт улучшается совместимость компонентов в результате того, что маленинизированный термоэластопласт, располагаясь на границе раздела фаз, снижает межфазное натяжение. При этом предотвращается коалесценция частиц, и это, в свою очередь, приводит к образованию более стабильной морфологии смешанного материала.

Ударная вязкость композиций является важнейшей характеристикой при использовании изделий из смесей вторичных полимеров. Результаты испытаний ударной вязкости по Изоду образцов композиций представлены в таблице 6.

Таблица 6. Ударная вязкость по Изоду композиций ПСвт + ПЭвт 50/50, компатибилизированных мСЭБС.

Композиция	Содержание мСЭБС, масс. %	Ударная вязкость по Изоду, кДж/м ²
ПСвт + ПЭвт	0	8,5 ($\pm 0,4$)
ПСвт + ПЭвт + мСЭБС	2,5	24 ($\pm 0,3$)
	5,0	29 ($\pm 0,3$)
	7,5	32 ($\pm 0,2$)
	10,0	37 ($\pm 0,3$)

Введение до 5 масс.% мСЭБС в смесь ПСвт + ПЭвт 50/50 обеспечивает существенного повышения ударостойкости. Она остается ниже 31 кДж/м², что соответствует показателю смеси ПСвт + ПЭвт 20/80. При увеличении содержания мСЭБС от 5 до 10 масс.% ударная вязкость композиции повышается до 37 кДж/м².

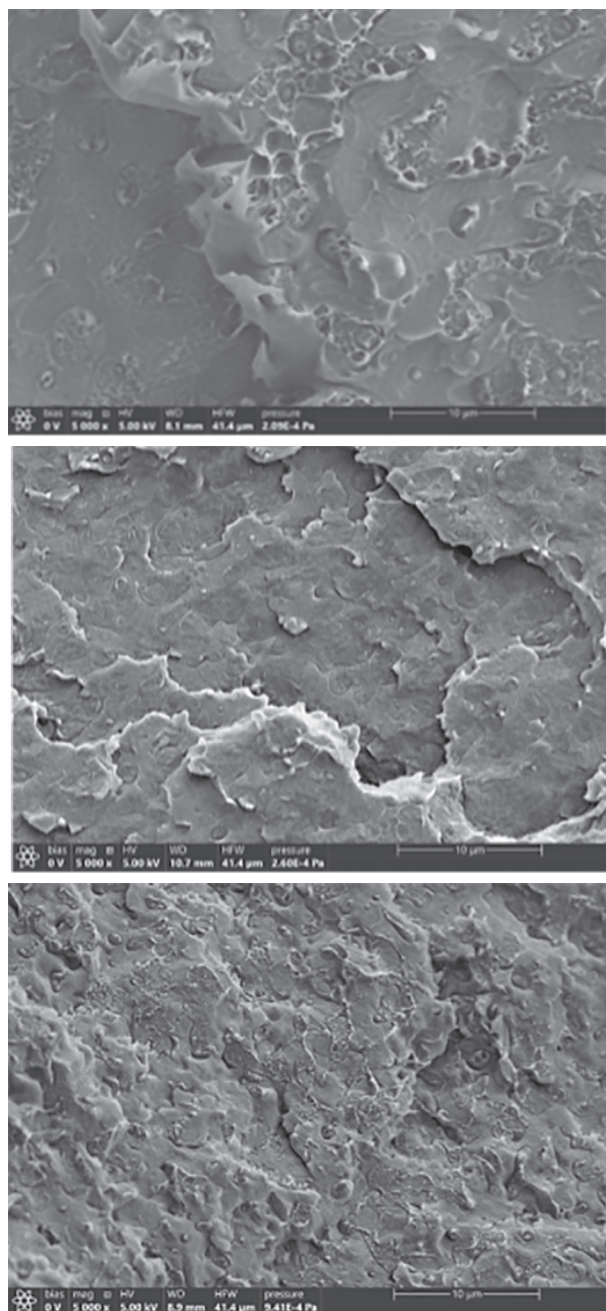


Рис. 7. СЭМ снимки смесей: а – ПСвт + ПЭвт 50/50; б – ПСвт + ПЭвт + мСЭБС 50/50/2,5; в – ПСвт + ПЭвт + мСЭБС 50/50/5. Увеличение $\times 5000$.

В присутствии стирольного compatibilizатора полиэтилен в смеси с полистиролом выступает в качестве пластичного компонента, что ведет к повышению уровня ударной вязкости, и, предположительно, может быть объяснено тем, что присутствие compatibilizатора способно замедлять образование трещин вокруг частиц полистирола в смеси и их распространение вдоль поверхности раздела фаз.

Выводы

В работе был изучен комплекс физико-механических и технологических свойств композиционных материалов на основе модифицированной смеси вторичных полистирола и полиэтилена.

Показано, что введение всего 2,5 масс.% мСЭБС в смесь ПСвт + ПЭвт 50/50 позволяет повысить физико-механические показатели смеси. Маленинизированный СЭБС, выступая в роли compatibilizатора, повышает совместимость компонентов, что подтверждается изменением в морфологии смесей.

Разработанные композиционные материалы могут быть использованы для изготовления неответственных бытовых изделий методами экструзии, литья под давлением или прессования.

Литература

- Horak Zdenek, Fortelny Ivan, Kolarik Jan, Hlavata Drahomira, Sikora Antonin. Polymer blends. In book: Encyclopedia of Polymer Science and Technology, // John Wiley & Sons, Inc. 2005. 59 p.
- Лавров Н.А., Белухичев Е.В. Теоретические основы и механизмы совмещения полимеров // Пластические массы. 2023. №5–6. с. 8–11. DOI:10.35164/0554-2901-2023-5-6-8-11.
- Каблов В.Ф., Новопольцева О.М. Смесии полимеров. Термодинамика, получение, применение: учебное пособие. ВПИ (филиал) ВолгГТУ. Волжский, 2018. 142 с.
- Mekhzoum Mohamed El Mehdi, Hanane Benzeid, Rodrigue Denis, Qaiss Abou, Bouhfid Recent Rachid. Advances in Polymer Recycling: A Short Review // Current Organic Synthesis. 2017. N14. PP. 171–185. DOI:10.2174/1570179413666160929095017.
- Andrea Dorigato. Recycling of polymer blends // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. N4. PP. 53–60. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.02.005.
- Валиуллина А.М. Загрязнение окружающей среды полимерными отходами. Методы утилизации полимеров // Научно-практические исследования. 2020. №8/7(31). С. 7–9.
- Karrer Mahdi Alghazali. Influence of Polymer Blending on Mechanical and Thermal Properties // Modern Applied Science. 2010. N4(9). PP. 157–161. DOI:10.5539/mas.v4n9p157.
- Shi-Ai Xu, Chi Ming Chan Polystyrene/High Density Polyethylene Blends Compatibilized by a Tri-Block Copolymer I. Properties and Morphology. // Polymer Journal. 1998. N30(7). PP. 552–558. DOI:10.1295/polymj.30.552.
- Utracki L.A. Compatibilization of Polymer Blends // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2002. Vol. 80. PP. 1008–1016. DOI:10.1002/cjce.5450800601.
- Dobrovzsky Karoly, Ronkay Ferenc. Investigation of compatibilization effects of SEBS-g-MA on polystyrene/polyethylene blend with a novel separation method in melted state // Polymer Bulletin. 2016. N73. PP. 2719–2739. DOI:10.1007/s00289-016-1618-2.
- Калинчев Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. – Л.: Химия. 1983. 288 с.
- Shi Ai Xu, Sie Ching Tjong. Effect of Compatibilizer Content on the Tensile Properties and Fracture Toughness of High Density Polyethylene / Polystyrene Blends // Polymer Journal. 2000. Vol. 32. N3. PP. 208–214. DOI:10.1295/polymj.32.208.
- Utracki L.A., Wilkie C.A. Polymer Blends Handbook. Second Edition. // Springer Dordrecht. 2014. 2378 p.