

Экструзионная переработка и свойства композитов на основе вторичного полипропилена наполненного сополимером стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком

Илья Ю. Васильев¹ iljanaras@ya.ru  0000-0001-8488-5907

¹ Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований, направленные на определение структурных, теплофизических, и деформационно-прочностных свойств полимерных композиционных материалов на основе вторичного полипропилена, модифицированного стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком при переработке через расплав. В соответствии с разработанными составами широкого диапазона наполнения матрицы вторичного полипропилена стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком от 1 до 10 мас. % установили, что экструзионная переработка позволяет улучшить технологическую переработку полимерных систем, которая влияет на улучшение комплекса деформационно-прочностных свойств, при которых разрушающее напряжение при растяжении увеличивается на 9 % до 7 мас. % стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука в смесях со вторичным полипропиленом вследствие более равномерного распределения первого, а также на относительное удлинение при растяжении на 13 % до 10 мас. % стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком в смесях со вторичным полипропиленом вследствие их эластичности. Отмечен положительный эффект, который проявляется при определении теплофизических свойств, указывающий на формирование однофазного характера смеси, влияющий на температурные режимы переработки смесевых составов вторичного полипропилена, наполненного стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком, что влияет на увеличение производительности экструзионного оборудования и экономии энергозатрат на их производство. Доказано, что экструзионная переработка вторичного полипропилена и стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука в пленочные композиты характеризуется физическим, а не химическим или другим типом взаимодействия, что проявляется в отсутствии пиков полос поглощения, характерных для полярных групп стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука при определении химического состава пленочных композиций методом ИК-спектроскопии. Таким образом, разработанные композиционные составы пленочных композиций на основе вторичного полипропилена, модифицированного стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком могут быть рекомендованы к практическому использованию для изготовления изделий многофункционального назначения.

Ключевые слова: экструзионная переработка, вторичный полипропилен, термоэластопласт, модификация, пленочные композиции, структура, полимерные системы.

Extrusion processing and properties of composites based on secondary polypropylene filled with styrene-ethylene-butylene- styrene rubber copolymer

Ilya Yu. Vasilyev¹ iljanaras@ya.ru  0000-0001-8488-5907

¹ Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia

Abstract. The results of studies aimed at determining the structural, thermophysical, thermal and deformation-strength properties of polymer composite film materials based on secondary polypropylene modified with styrene-ethylene-butylene-styrene rubber when processed through a melt are presented. According to the developed compositions of a wide range of filling the matrix of secondary polypropylene with styrene-ethylene-butylene-styrene rubber from 1 to 10% by weight, that extrusion processing improves the technological compatibility of polymer systems, which affects the improvement of the complex of deformation and strength properties, wherein the tensile stress increases by 9% to 7% by weight of styrene-ethylene-butylene-styrene rubber in blends with secondary polypropylene due to a more uniform distribution of the former; as well as tensile elongation by 13% to 10% by weight of styrene-ethylene-butylene-styrene rubber in mixtures with secondary polypropylene due to their elasticisation. A positive effect was noted, which is manifested when determining thermal and thermophysical properties, indicating the formation of a single-phase nature of the mixture, affecting the temperature conditions of processing mixed compositions of secondary polypropylene filled with styrene-ethylene-butylene-styrene rubber, which affects the increase in the productivity of extrusion equipment and energy savings for their production. Extrusion processing of secondary polypropylene and styrene-ethylene-butylene-styrene rubber into film composites has been shown to be characterized by physical, rather than chemical or other type of interaction, which is manifested in the absence of absorption band peaks characteristic of styrene-ethylene-butylene-styrene rubber polar groups, which are absent in determining the chemical composition of film compositions by IR-spectroscopy. Thus, the developed composite compositions of film compositions based on secondary polypropylene modified with styrene-ethylene-butylene-styrene rubber can be recommended for practical use in the manufacture of multifunctional products.

Keywords: extrusion processing, secondary polypropylene, thermoelastoplastic, modification, film compositions, structure, polymeric systems.

Для цитирования

Васильев И.Ю. Экструзионная переработка и свойства композитов на основе вторичного полипропилена наполненного сополимером стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1. С. 250–258. doi:10.20914/2310-1202-2025-1-250-258

For citation

Vasilyev Ilya Yu. Extrusion processing and properties of composites based on secondary polypropylene filled with styrene-ethylene-butylene-styrene rubber copolymer. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 250–258. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-1-250-258

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Актуальность обращения полимерных материалов и их применение во многих отраслях промышленности сопряжено с проблемой неконтролируемого возникновения полимерных отходов, которые требуют научно-обоснованных подходов к их утилизации и переработке [1–3].

Существует несколько направлений, связанных с утилизацией полимерных материалов и пластмасс: первый – захоронение, является наиболее простым, но влияет на ухудшение экологической обстановки: полимерные изделия, утилизируемые вышеуказанным способом, являются биостойкими и не разлагаются под действием факторов окружающей среды, что приводит к ее загрязнению [4–5]. Второй метод – сжигание – рентабельное производство утилизации полимерных отходов, но связано с выделением большого количества парниковых (CO₂) и токсичных газов (окислы азота, серы, соединения хлора), также стоит отметить, что данный метод является дорогостоящим, из-за чего используется ограниченно [6].

Одним из перспективных и практико-ориентированных направлений утилизации полимерных материалов и пластмасс является рециклинг [7,8], что обуславливается возможностью перерабатывать практически все виды термопластичных полимерных материалов: полиолефины [9,10], полиэфиры [11] и их производные [12–15], однако доля рециклинга вышедших после эксплуатации изделий составляет не более 20%, а изделия, полученные из вторичного полимерного сырья используют ограниченно. В этой связи является актуальным применение крупнотоннажных вторичных полиолефинов [16], в частности, вторичного полипропилена [17] для изготовления полимерных изделий различного отраслевого назначения [18].

Наряду с переработкой полимерных материалов увеличивается научный интерес к рециклингу твердых коммунальных отходов (ТКО) из резинотехнических изделий [19]. Одним из разновидностей перерабатываемых

резинотехнических изделий является стирол-этилен-бутилен-стирольный каучук [20], который используется в автомобильной промышленности, в строительстве, в сельскохозяйственной и других отраслях [21].

Создание полимерных композиций на основе вторичного полипропилена, модифицированного переработанными резинотехническими изделиями, позволит расширить область их практического применения, а использование стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука представляющего собой термоэластопласт в смесях со вторичным полипропиленом позволит направленно воздействовать на структурные и эксплуатационные свойства полимерных композиций, увеличивая их практическую значимость. Ожидается, что экструзионная переработка смесей вторичного полипропилена и термоэластопласта позволит улучшить их технологическую переработку, а использование термоэластопласта стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука придаст полимерным композициям дополнительную эластификацию, что позволит изготавливать на их основе альтернативные изделия многофункционального назначения.

Цель работы – влияние рецептурно-технологических параметров полимерных композиционных материалов на основе вторичного полипропилена, модифицированного сополимером стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком при переработке через расплав на их структурные, физико-химические и эксплуатационные свойства.

Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы в работе использовали вторичный полипропилен (ВтПП/sPP), производства компании «PlastMix», Россия.

Для модификации полимерной матрицы вторичного полипропилена использовали отечественный термоэластопласт сополимер стирол-этилен-бутилен-стирольный каучук (с добавками минеральных масел и процессионных термо-стабилизаторов) (СЭБС/SEBS), торговой марки «Masflex», производства компании «Rusplast», Россия. В табл. 1 представлены некоторые характеристики исходных компонентов.

Таблица 1.

Характеристики исходных компонентов

Table 1.

Characteristics of initial components

Показатель Indicator	ВтПП sPP	СЭБС SEBS	Метод испытания Test method
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	0.92	1.17	ISO 2781:2008
ПТР, (190° С, 2.16 кг), г / 10 мин MFR, (190° С, 2.16 kg), g / 10 min	1.9 ± 0.5	4 ± 0.2	ISO 1133–1:2011
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа Destructive tensile stress, MPa	19	7	ISO 527–3:2018
Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	210	>900	ISO 527–3:2018
Твердость по Шору D (усл. ед.) Shore D hardness (cond. units)	86	45	ISO 868:2003

Компаундирование полимерных смесей на основе вторичного полипропилена, наполненного стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком осуществляли на двухшнековом экструдере с барьерным шнеком и кольцевой фильерой фирмы «МашПласт» (Россия) при температуре переработки от 160° С (в зоне питания) до 170° С (в зоне формирующего элемента), варьируя содержание ВтПП:СЭБС от 99:1 до 90:10 мас. % и на выходе получали стренги и экструдат размером 1.7 ± 0.03 мм и 2–4 мм. Затем экструдат загружали в плоскощелевой экструдер фирмы «МашПласт» (Россия), пластицировали при тех же температурных режимах, как и в случае получения стренг, выходящий из плоскощелевой головки расплав принимали на охлаждаемые валы и получали пленочные композиции, варьируя их толщину 90 ± 3 мкм.

Определение формирования структуры ВтПП и пленочных композиций ВтПП:СЭБС изучали с помощью флуоресцентной микроскопии на приборе Биомед-4 ПР ЛЮМ. Испытания проводили при флуоресценции пленочных композиций в сине-зеленой и желто-красной области спектра от 470 до 650 нм.

Определение теплофизических свойств ВтПП и СЭБС, а также пленочных композиций разных смесевых составов на их основе определяли с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), оснащенным синхронным определением термогравиметрического анализа (ТГА) на калориметре DSC 214 PolymaNetzsch-

GerätebauGmbH (Germany) в широком интервале температур с разной скоростью сканирования и навеске образца 10 ± 1 мг согласно ISO 11357-1:2016 «Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Общие принципы».

Физико-механические свойства ВтПП и СЭБС, а также пленочных композиций разных смесевых составов на их основе определяли в соответствии с ISO 527-3:2018 «Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении».

Изучение химической структуры ВтПП, СЭБС, а также пленочных композиций на их основе в широком диапазоне смесевых составов осуществляли методом ИК-Фурье спектроскопии на приборе ФСМ-1201 (Россия) с приставкой НПВО с разрешением в $1,0 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне волновых чисел $375\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ при температуре $22 \pm 2^\circ \text{C}$ согласно ГОСТ 57939-2017 «Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Общие принципы»

Результаты и обсуждение

При изготовлении полимерных композиционных пленочных материалов на основе вторичного полипропилена, модифицированного СЭБС необходимо учитывать температуру переработки и физико-химическую стойкость исходных компонентов. Для этого определили их теплофизические свойства и стойкость к термодеструкции.

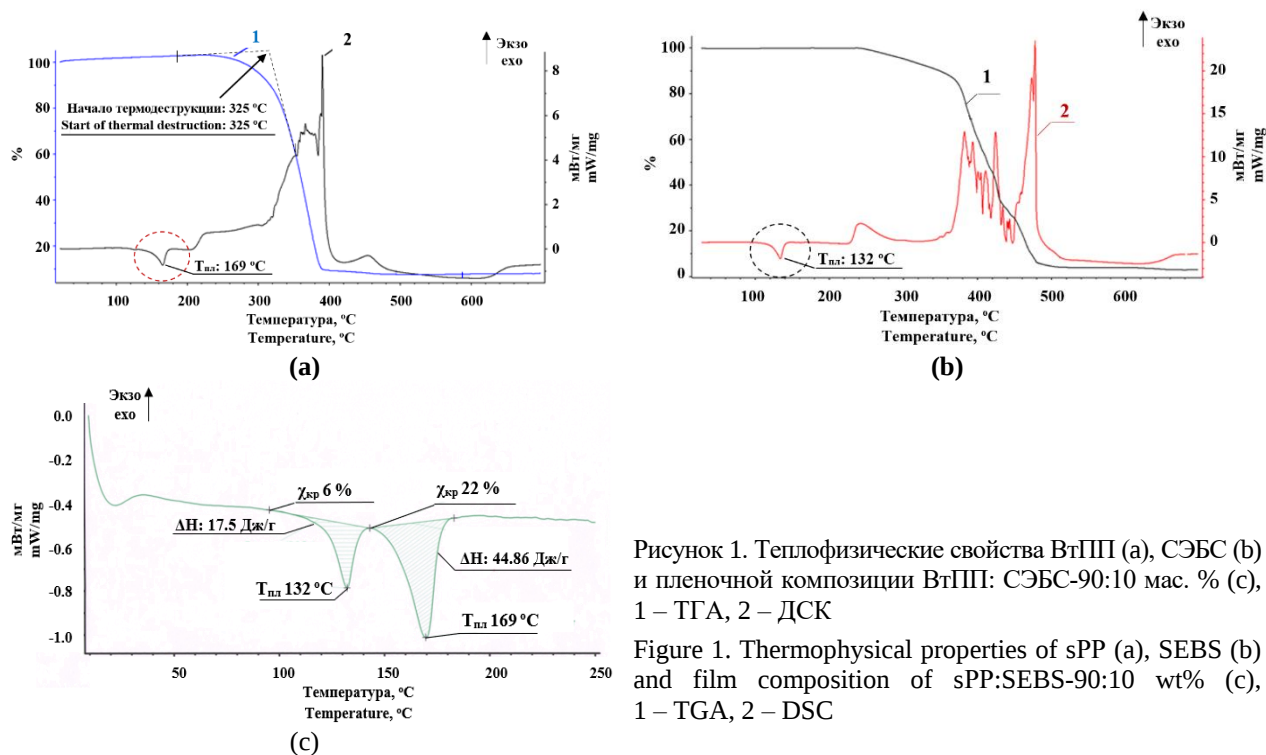


Рисунок 1. Теплофизические свойства ВтПП (а), СЭБС (б) и пленочной композиции ВтПП: СЭБС-90:10 мас. % (с), 1 – ТГА, 2 – ДСК

Figure 1. Thermophysical properties of sPP (a), SEBS (b) and film composition of sPP:SEBS-90:10 wt% (c), 1 – TGA, 2 – DSC

На рисунке 1а видно, что на термограмме присутствует одна кристаллическая фаза, эндотермический пик которой соответствует температуре плавления вторичному полипропилену 169 °С, для СЭБС температура плавления ниже и составляет 132 °С (рисунок 1б), что обуславливается химической структурой исходного наполнителя. Для пленочной композиции, в составе которой содержание СЭБС составляет 10 мас. % в смеси со вторичным полипропиленом (рисунок 1в) присутствуют две кристаллические фазы аналогичные по характеру плавления исходным компонентам, что обуславливается улучшением их технологической переработки через расплав и свидетельствует о формировании однофазного характера смеси.

Результаты термогравиметрического анализа представлены на рисунке 2. Определяя стойкость к термодеструкции исходных компонентов – ВтПП и СЭБС, а также пленочных композиций на их основе установили, что исходный ВтПП проявляет термостабильность до 200 °С, начало потери массы осуществляется при температуре 325 °С и продолжается до 400 °С с содержанием массового остатка не более 10 мас. %, для СЭБС начало потери массы осуществляется при более низких температурах – 230 °С. При температуре 585 °С массовое содержание остатка составляет 41 мас. %, что обуславливается наличием в составе СЭБС термостабилизатора.

Для пленочных композиций при введении СЭБС 5 и 10 мас. % в смеси со вторичным полипропиленом начало потери массы смещается в сторону более низких температур, что обуславливается большей концентрацией термоэластопласта в смесях со вторичным полипропиленом. Для пленочной композиции ВтПП:СЭБС-95:5 мас. % снижение потери массы наблюдали до 687° С с содержанием остатка не более 3 мас. %. Для СЭБС при 10 мас. % в смеси со вторичным полипропиленом содержание массового остатка составляет 3.8 мас. % при 690 °С. При этом кривые потери массы для исходных компонентов и пленочных композиций на их основе имеют классический вид потери массы от температуры. Это свидетельствует о том, что при экструзионной переработке возможно получение более гомогенных расплавов композитов, вследствие пластификации матрицы вторичного полипропилена и улучшения технологической переработки вторичного термопласта термоэластомером.

Незначительное снижение температуры начала потери массы для пленочных композиций ВтПП:СЭБС при разной концентрации последнего, в свою очередь, влияет на увеличение производительности экструзионного оборудования и экономии энергозатрат на их производство, что оказывает положительный эффект на технологический процесс изготовления разрабатываемых композитов.

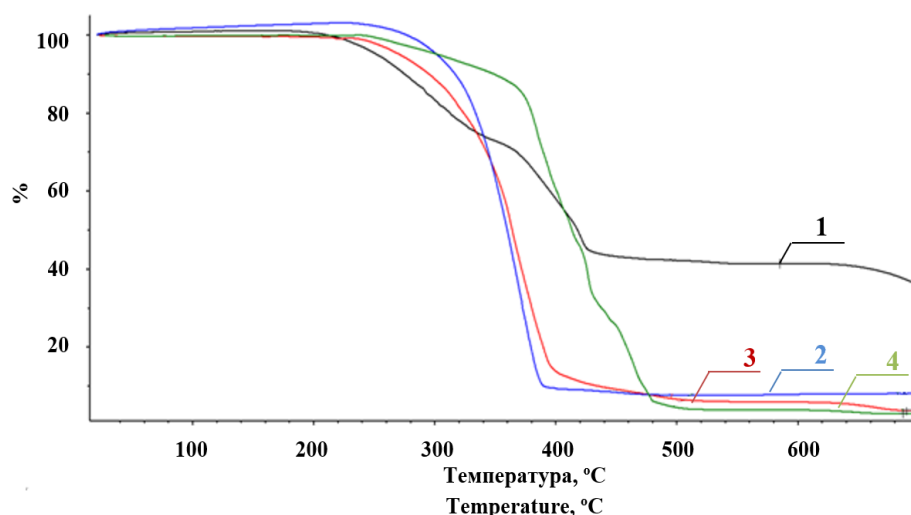


Рисунок 2. Термогравиметрические свойства: СЭБС (1), вторичного полипропилена (2) и пленочных композиций ВтПП: СЭБС, мас. %: 95:5 (3) и 90:10 (4)

Figure 2. Thermogravimetric properties: SEBS (1), secondary polypropylene (2) and film compositions sPP:SEBS, wt%: 95:5 (3) and 90:10 (4)

На рисунке 3 представлены экспериментальные данные по определению деформационно-прочностных свойств пленочных композиций

разных смесевых составов на основе ВтПП, модифицированного СЭБС.

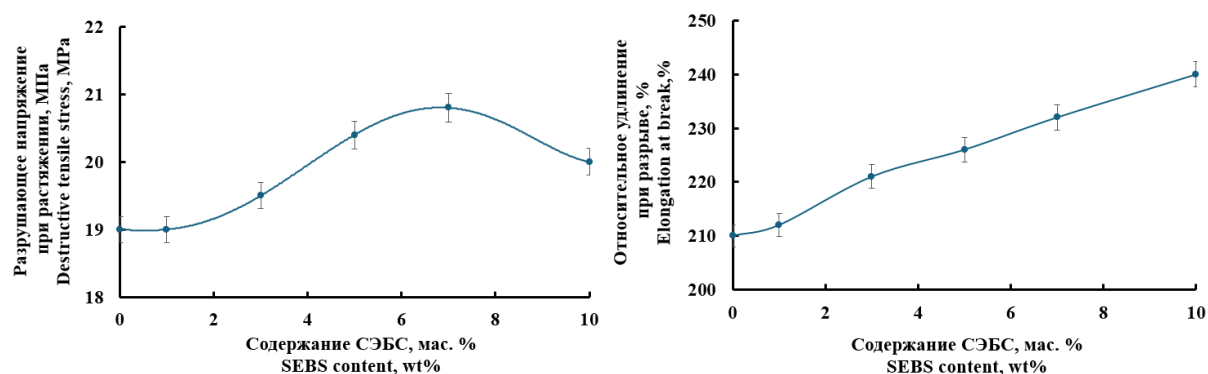


Рисунок 3. Деформационно-прочностные свойства пленочных композиций ВтПП:СЭБС

Figure 3. Deformation and strength properties of sPP:SEBS film compositions

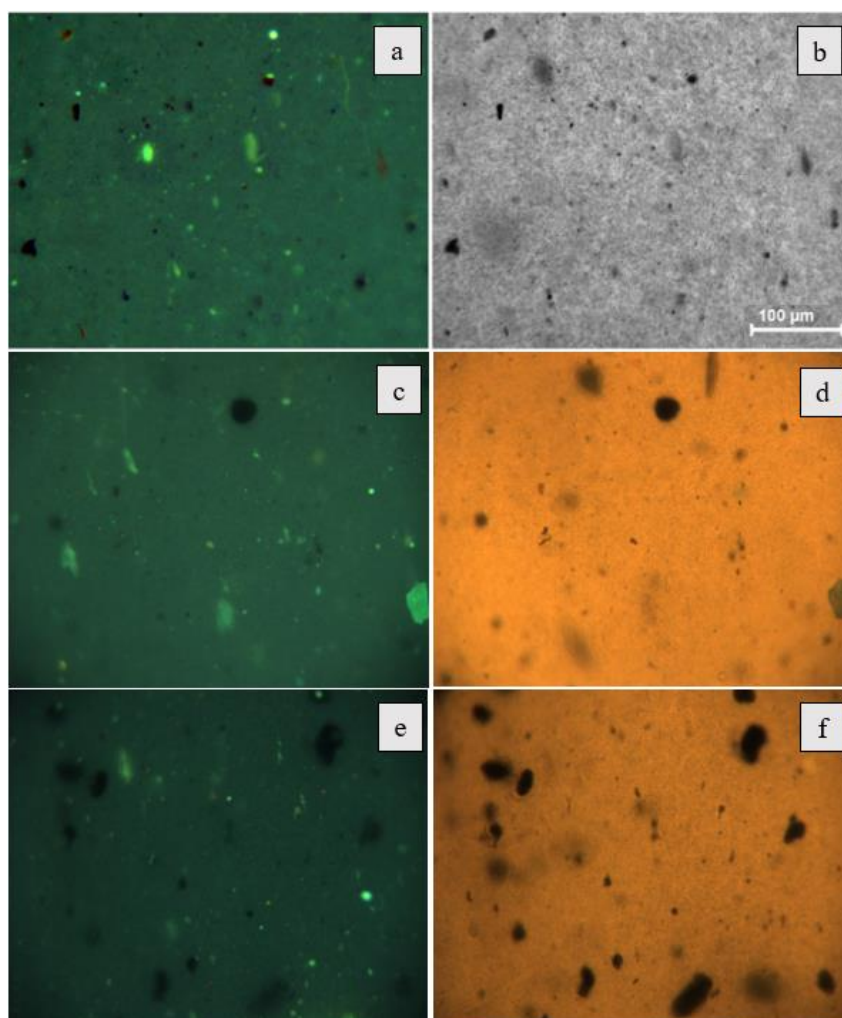


Рисунок 4. Микрофотографии структуры при флуоресценции ВтПП (a, b) и пленочных композиций ВтПП:СЭБС-95:5 мас. % (c, d) и ВтПП:СЭБС-90:10 мас. % (e, f)

Figure 4. Photomicrographs of structure at fluorescence of sPP (a, b) and film compositions of sPP:SEBS-95:5 wt% (c, d) and sPP:SEBS-90:10 wt% (e, f)

Для вторичного полипропилена разрушающее напряжение при растяжении составляет 19 МПа, при добавлении СЭБС до 7 мас. % в смеси со вторичным полипропиленом разрушающее напряжение при растяжении увеличивается на 9%,

о чем свидетельствует экспериментальные данные, полученные при использовании флуоресцентной микроскопии (рисунок 4с, d), на микрофотографиях которых заметно более равномерное распределение отдельных частиц

СЭБС в матрице вторичного полипропилена, размер которых не превышает 20 мкм, идентифицированные в сине-зеленой и желто-красной области спектра, для исходного вторичного полипропилена (рисунок 4а, б) наблюдали более выраженную структуру, которая проявляется как при флуоресценции, так и в проходящем свете. При увеличении СЭБС до 10 мас. % в смеси со вторичным полипропиленом разрушающее напряжение при растяжении снижается незначительно, разница составляет 4%, что обуславливается большей концентрацией СЭБС в смеси со вторичным полипропиленом и невысокой его исходной прочностью. На некоторых участках микрофотографий заметны отдельные частицы СЭБС в структуре пленочных композиций на основе вторичного полипропилена, размер которых достигает до 40 мкм (рисунок 4е, ф).

При определении деформационных свойств видно, что с увеличением содержания СЭБС до 10 мас. % в смесях со вторичным полипропиленом относительное удлинение при разрыве для пленочных композиций возрастает пропорционально увеличению концентрации СЭБС на 13% и обуславливается более однородным его распределением в матрице вторичного полипропилена.

Для дополнительной оценки взаимодействия вторичного полипропилена и сополимера стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука при переработке через расплав использовали ИК-спектроскопию. На рис. 5 представлены ИК-спектры исходных компонентов и пленочной композиции при введении СЭБС 10 мас. % в смеси со вторичным полипропиленом.

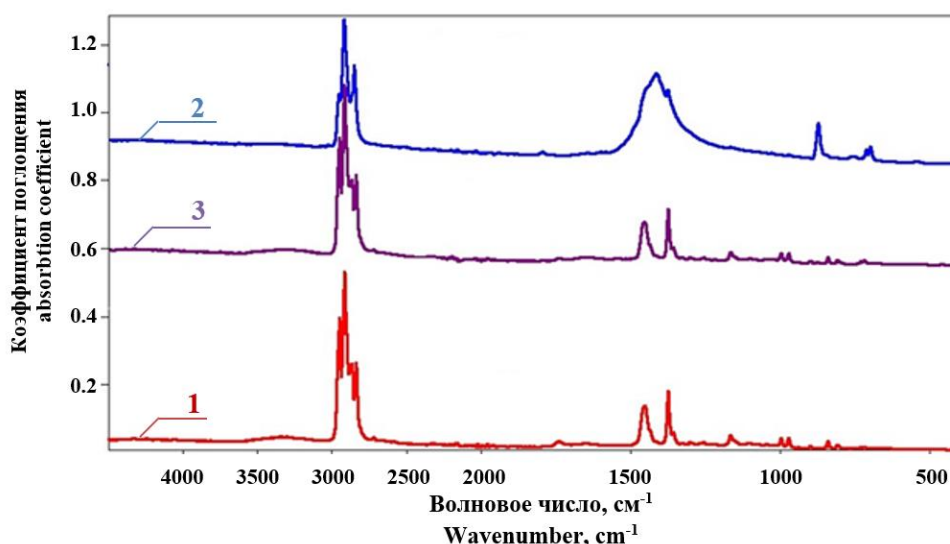


Рисунок 5. ИК-спектры: 1 – ВтПП, 2 – СЭБС, 3 – ВтПП:СЭБС-90:10 мас. %

Figure 5. IR spectra: 1 – sPP, 2 – SEBS, 3 – sPP:SEBS-90:10 wt%

Анализируя ИК-спектры видно, что вторичный полипропилен имеет классический ИК-спектр, характерный для первичного полипропилена с наличием интенсивности полос поглощения в области 2960 и 2880 см^{-1} , относящихся к симметричным и ассиметричным деформационным колебаниям метильной CH_3 -группы. Наличие полос поглощения в области 1450 и 1378 см^{-1} позволяют идентифицировать наличие в структуре вторичного полипропилена деформационных CH_2 -групп.

Для сополимера стирол-этилен-бутилен-стирольного каучука, в отличие от вторичного полипропилена, характерно наличие полярных групп в его структуре. В качестве полярных соединений выступают карбонильные, карбоксильные, иногда гидроксильные группы.

ИК-спектры СЭБС и вторичного полипропилена, имеют практически идентичный характер за исключением длинноволновой области (дальняя волновая область) ИК-излучения. Так в ИК-спектре СЭБС присутствует полоса поглощения 3030 см^{-1} , относящаяся к колебаниям ароматической группы бензольного кольца. Как и для вторичного полипропилена, так и для СЭБС характерно наличие CH_3 -группы при полосах поглощения 2960 и 2880 см^{-1} . Наличие COOH -групп подтверждается появлением широкой полосы поглощения в области $1600\text{--}1560\text{ см}^{-1}$. Полосы поглощения в области от $1200\text{--}960\text{ см}^{-1}$ указывают на наличие деформационных связей характерных для CH -групп и CH -колебаний бензольного кольца. Полоса поглощения 910 см^{-1} позволяет идентифицировать наличие $\text{CH}_2 = \text{CH}$ -группы.

Для пленочной композиции на основе вторичного полипропилена, модифицированного СЭБС при 10 мас. % последнего, на ИК-спектре присутствуют полосы поглощения аналогичные исходному вторичному полипропилену. Отсутствие карбоксильных групп в области 1600–1560 см⁻¹ позволяют предположить, что СЭБС в смесях со вторичным полипропиленом при переработке через расплав не подвергается химическому или другому взаимодействию с матрицей вторичного полипропилена. В соответствии с ИК-спектрами, наличие СЭБС в пленочных композициях со вторичным полипропиленом не изменяет положение полос поглощения вышеописанных функциональных групп и не влияет на изменение их формы.

На основании полученных спектральных характеристик можно сделать вывод, что изученные вторичный полипропилен и сополимер стирол-этилен-бутилен-стирольный каучук, а также их смеси при экструзионной переработке не подвергаются химическому взаимодействию, а демонстрируют увеличение интенсивности полос поглощения пропорционально увеличению содержания СЭБС в смесях со вторичным полипропиленом.

Заключение

Провели комплексное исследование, направленное на изучение структурных, теплофизических, термических и физико-механических свойств полимерных композиционных материалов на основе вторичного полипропилена, модифицированного сополимером стирол-этилен-бутилен-стирольным каучуком, в которых доля СЭБС составила от 1 до 10 мас. %.

При определении стойкости пленочных композиций к термодеструкции установили, что вторичный полипропилен характеризуется термостойкостью до 325 °С, СЭБС до 230 °С, что позволяет перерабатывать их в пленочные композиции через расплав. Для пленочных композиций при определении теплофизических свойств установили наличие двух кристаллических фаз, характерных для ВтПП – 169 °С и СЭБС 132 °С, что положительно сказывается на увеличении производительности экструзионного оборудования и экономии энергозатрат на их производство.

При определении деформационно-прочностных свойств установили, что пленочные композиции на основе вторичного полипропилена и СЭБС при увеличении последнего до 7 мас. % влияет на увеличение разрушающего напряжения при растяжении на 9% вследствие более равномерного распределения частиц СЭБС в матрице вторичного термопласта, при увеличении до 10 мас. % СЭБС наблюдали незначительное снижение прочности пленочных композиций. Относительное удлинение при разрыве для пленочных композиций при введении СЭБС до 10 мас. % в смеси с ВтПП увеличивается на 13%.

Методом ИК-спектроскопии доказали, что отсутствует химическое или другое взаимодействие вторичного полипропилена и СЭБС при изготовлении пленочных композиций, в данном случае для их смесей осуществляется только физическое взаимодействие при переработке через расплав.

Литература

- 1 Guivan M.Y., Ovchinnikov V.A., Mamin E.A., Khaidarov B.B., Popov A.A. The Influence of Metal Sludge on the Oxidative Destruction of Low-Density Polyethylene // *Polymer Science – Series D*. 2024. Vol. 17. № 2. P. 502–506.
- 2 Stefanovich M.A., Gubachev V.A., Tolstov A.M. The modelling of extrusion melt processes for polymer composites // *International Journal of Applied Science and Technology Integral*. 2022. № 2. doi: 10.55186/02357801_2022_7_2_1.
- 3 Dul S., Gutierrez B.J.A., Pegoretti A., Alvarez-Quintana J., Fambri L. 3D printing of ABS Nanocomposites // Comparison of processing and effects of multi-wall and single-wall carbon nanotubes on thermal, mechanical and electrical properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022. № 121. P. 52–66. doi: 10.1016/j.jmst.2021.11.064.
- 4 Sheng R. 3D printing of airplane parts // *3D Printing*. 2022. P. 13–20. doi: 10.1016/b978-0-323-99463-7.00003-7.
- 5 Sharifov D.M., Niyazbekova R.K., Mukhambetov G.M., Mikhilchenko V.N., Begaidarov Zh.A., Serepaeve M.A. Production technology and development prospects of polymer-based nanocomposite materials // *Solid State Physics: Proceedings of the XV International Scientific Conference*. 2022. P. 152–154.
- 6 Vidakis N., Mangelis P., Petousis M., Mountakis N., Papadakis V., Moutsopoulou A. et al. Mechanical reinforcement of ABS with optimized nano titanium nitride content for material extrusion 3D printing // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. № 4. P. 669. doi: 10.3390/nano13040669.
- 7 Pulipaka A., Gide K., Beheshti A., Bagheri Z. Effect of 3D printing process parameters on surface and mechanical properties of FFF-printed PEEK // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. № 85. P. 368–386. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.057.
- 8 Zhang X., Fan W., Liu T. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications // *Composites Communications*. 2020. № 21. P. 100413. doi: 10.1016/j.coco.2020.100413.
- 9 Valvez S., Silva A.P., Reis P.N.B. Compressive behaviour of 3D-printed PETG composites // *Aerospace*. 2022. Vol. 9. № 3. P. 124. doi: 10.3390/aerospace9030124.
- 10 Bhagia S., Bornani K., Agarwal R., Satlewal A., Durkovi J., Lagana R. et al. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries // *Applied Materials Today*. 2021. № 24. doi: 10.1016/j.apmt.2021.101078.

- 11 Tirado-Garcia I., Garcia-Gonzalez D., Garzon-Hernandez S., Rusinek A., Robles G., Martinez-Tarifa J.M. et al. Conductive 3D printed PLA composites: on the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours // *Composite Structures*. 2021. № 261. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113744.
- 12 Troyan A.S., Troyan A.A. Recycling of secondary polyethylene terephthalate // *Chemistry and chemical technology in the XXI century: Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists named after outstanding chemists L.P. Kulev and N.M. Kizhner*. 2022. № 2. P. 339–341.
- 13 Ukhartseva I.Yu., Tsvetkova E.A., Goldade V.A., Shapovalov V.M. Technological aspects of manufacturing containers and packaging for food products // *Polymer materials and technologies*. 2022. Vol. 8. № 4. P. 6–31. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-4-6-31.
- 14 Mohammadi Zerankeshi M., Sayedain S.S., Tavangarifard M., Alizadeh R. Developing a novel technique for the fabrication of PLA-graphite composite filaments using FDM 3D printing process // *Ceramics International*. 2022. № 48. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.07.117.
- 15 Zhang Y., Zhu Y., Zheng S., Zhang L., Shi X., He J., Chou X., Wu Z.-S. Ink formulation, scalable applications and challenging perspectives of screen printing for emerging printed microelectronics // *Journal of Energy Chemistry*. 2021. № 63. P. 498–513. doi: 10.1016/j.jechem.2021.08.011.
- 16 Unhelkar B., Joshi S., Sharma M., Prakash S., Krishna Mani A., Prasad M. Enhancing supply chain performance using RFID technology and decision support systems in the industry 4.0 // *A systematic literature review. International Journal of Information Management Data Insights*. 2022. № 2. doi: 10.1016/j.jjime.2022.100084.
- 17 Mazumder R.H., Govindaraj P., Salim N., Antiohos D., Fuss F.K., Hameed N. Digitalization of composite manufacturing using nanomaterials based piezoresistive sensors // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025. № 188. doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108578.
- 18 Syduzzaman Md., Islam Saad Md.S., Fuad Piam M., Talukdar Toaki T.A., Shobdo T.T., Pritha M.N. Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry // *Results in Materials*. 2025. № 25. P. 100654. doi: 10.1016/j.rinma.2024.100654.
- 19 De Falco G., Basta L., Commodo M., Minutolo P., D'Anna A. Flame synthesis of soot/TiO₂ nanoparticle composite films with improved electrical properties characterized by Scanning Probe Microscopy // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2024. № 40. P. 105475. doi: 10.1016/j.proci.2024.105475.
- 20 Frac M., Szudek W., Szoldra P., Pich W. The applicability of shungite as an electrically conductive additive in cement composites // *Journal of Building Engineering*. 2022. № 45. P. 103469. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103469.
- 21 Thirugnanasambandam A., Prabhu B., Mageswari V., Murugan V., Ramachandran K., Kadirgama K. Wood flour / ceramic reinforced polylactic acid based 3D printed functionally grade structural material for integrated engineering applications: A numerical and experimental characteristic investigation // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2025. № 8. P. 74–86. doi: 10.1016/j.ijlmm.2024.08.003.

References

- 1 Guivan M.Y., Ovchinnikov V.A., Mamin E.A., Khaidarov B.B., Popov A.A. The Influence of Metal Sludge on the Oxidative Destruction of Low-Density Polyethylene. *Polymer Science - Series D*. 2024. vol. 17. no. 2. pp. 502-506.
- 2 Stefanovich M.A., Gubachev V.A., Tolstov A.M. The modelling of extrusion melt processes for polymer composites. *International Journal of Applied Science and Technology Integral*. 2022. no. 2. doi: 10.55186/02357801_2022_7_2_1.
- 3 Dul S., Gutierrez B.J.A., Pegoretti A., Alvarez-Quintana J., Fambri L. 3D printing of ABS Nanocomposites. Comparison of processing and effects of multi-wall and single-wall carbon nanotubes on thermal, mechanical and electrical properties. *Journal of Materials Science and Technology*. 2022. no. 121. pp. 52-66. doi: 10.1016/j.jmst.2021.11.064.
- 4 Sheng R. 3D printing of airplane parts. *3D Printing*. 2022. pp. 13-20. doi: 10.1016/b978-0-323-99463-7.00003-7.
- 5 Sharifov D.M., Niyazbekova R.K., Mukhambetov G.M., Mikhalchenko V.N., Begaidarov Zh.A., Serekpaev M.A. Production technology and development prospects of polymer-based nanocomposite materials. *Solid State Physics: Proceedings of the XV International Scientific Conference*. 2022. pp. 152-154.
- 6 Vidakis N., Mangelis P., Petousis M., Mountakis N., Papadakis V., Moutsopoulou A. et al. Mechanical reinforcement of ABS with optimized nano titanium nitride content for material extrusion 3D printing. *Nanomaterials*. 2023. vol. 13. no. 4. p. 669. doi: 10.3390/nano13040669.
- 7 Pulipaka A., Gide K., Beheshti A., Bagheri Z. Effect of 3D printing process parameters on surface and mechanical properties of FFF-printed PEEK. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. no. 85. pp. 368-386. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.057.
- 8 Zhang X., Fan W., Liu T. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications*. 2020. no. 21. p. 100413. doi: 10.1016/j.coco.2020.100413.
- 9 Valvez S., Silva A.P., Reis P.N.B. Compressive behaviour of 3D-printed PETG composites. *Aerospace*. 2022. vol. 9. no. 3. p. 124. doi: 10.3390/aerospace9030124.
- 10 Bhagia S., Bornani K., Agarwal R., Satlewal A., Durkovi J., Lagana R. et al. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. *Applied Materials Today*. 2021. no. 24. doi: 10.1016/j.apmt.2021.101078.
- 11 Tirado-Garcia I., Garcia-Gonzalez D., Garzon-Hernandez S., Rusinek A., Robles G., Martinez-Tarifa J.M. et al. Conductive 3D printed PLA composites: on the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours. *Composite Structures*. 2021. no. 261. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113744.
- 12 Troyan A.S., Troyan A.A. Recycling of secondary polyethylene terephthalate. *Chemistry and chemical technology in the XXI century: Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists named after outstanding chemists L.P. Kulev and N.M. Kizhner*. 2022. no. 2. pp. 339-341.

13 Ukhartseva I.Yu., Tsvetkova E.A., Goldade V.A., Shapovalov V.M. Technological aspects of manufacturing containers and packaging for food products. *Polymer materials and technologies*. 2022. vol. 8. no. 4. pp. 6-31. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-4-6-31.

14 Mohammadi Zerankeshi M., Sayedain S.S., Tavangarifard M., Alizadeh R. Developing a novel technique for the fabrication of PLA-graphite composite filaments using FDM 3D printing process. *Ceramics International*. 2022. no. 48. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.07.117.

15 Zhang Y., Zhu Y., Zheng S., Zhang L., Shi X., He J. et al. Ink formulation, scalable applications and challenging perspectives of screen printing for emerging printed microelectronics. *Journal of Energy Chemistry*. 2021. no. 63. pp. 498-513. doi: 10.1016/j.jechem.2021.08.011.

16 Unhelkar B., Joshi S., Sharma M., Prakash S., Mani A.K., Prasad M. Enhancing supply chain performance using RFID technology and decision support systems in the industry 4.0. A systematic literature review. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2022. no. 2. doi: 10.1016/j.jjime.2022.100084.

17 Mazumder R.H., Govindaraj P., Salim N., Antiohos D., Fuss F.K., Hameed N. Digitalization of composite manufacturing using nanomaterials based piezoresistive sensors. *Composites Part A*. 2025. no. 188. doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108578.

18 Syduzzaman Md., Islam Saad Md.S., Fuad Piam M., Talukdar Toaki T.A., Shobdo T.T., Pritha M.N. Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry. *Results in Materials*. 2025. no. 25. p. 100654. doi: 10.1016/j.rinma.2024.100654.

19 De Falco G., Basta L., Commodo M., Minutolo P., D'Anna A. Flame synthesis of soot/TiO₂ nanoparticle composite films with improved electrical properties characterized by Scanning Probe Microscopy. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2024. no. 40. p. 105475. doi: 10.1016/j.proci.2024.105475.

20 Frac M., Szudek W., Szoldra P., Pich W. The applicability of shungite as an electrically conductive additive in cement composites. *Journal of Building Engineering*. 2022. no. 45. p. 103469. doi: 10.1016/j.job.2021.103469.

21 Thirugnanasambandam A., Prabhu B., Mageswari V., Murugan V., Ramachandran K., Kadirgama K. Wood flour/ceramic reinforced polylactic acid based 3D printed functionally grade structural material for integrated engineering applications: A numerical and experimental characteristic investigation. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2025. no. 8. pp. 74-86. doi: 10.1016/j.ijlmm.2024.08.003.

Сведения об авторах

Илья Ю. Васильев к.т.н., доцент, кафедра Инновационных материалов принтмедииндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, iljanaras@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-8488-5907>

Вклад авторов

Илья Ю. Васильев написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ilya Yu. Vasilyev Cand. Sci. (Engin.), Department of Innovative Materials of the Print Industry, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, iljanaras@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-8488-5907>

Contribution

Ilya Yu. Vasilyev wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/01/2025	После редакции 18/01/2025	Принята в печать 10/02/2025
Received 11/01/2025	Accepted in revised 18/01/2025	Accepted 10/02/2025