



Компатибилизация смесей полимеров при переработке отходов изделий из термопластов

Н.Н. Фомина^{1*} , В.Г. Хозин² 

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

² Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

*Контакты: e-mail: fominanani@yandex.ru

РЕЗЮМЕ: Введение. Переработка отходов термопластов в строительные материалы с длительным жизненным циклом – перспективное и технологически реализуемое направление утилизации. Целесообразно развивать переработку смешанных полимерных отходов. Термопласты термодинамически несовместимы, но технологической совместимостью можно управлять на стадии расплава: введением компатибилизаторов; нанонаполнителей; образованием в расплаве свободных радикалов; реакционной компатибилизацией. **Материалы и методы.** Работа нацеливалась на исследование влияния компатибилизатора – сополимера этилена и винилацетата с привитыми акрилатными и эпоксидными группами на свойства композитов, полученных из смесей отходов полиэтилентерефталата и полипропилена. Смесь полимеров расплавляли, наполняли известняковой мукой (50–85% по массе), прессовали образцы, исследовали их физико-механические свойства. **Результаты, обсуждение, выводы.** Дифференциальным термическим анализом установлена температура приготовления расплава – 240°C до начала термоокислительной деструкции компатибилизатора. Установлено оптимальное соотношение между полиэтилентерефталатом, полипропиленом и компатибилизатором 70:25:5% по массе, обеспечивающее наибольший прирост прочности при изгибе без снижения прочности при сжатии наполненных композитов; оптимальная степень наполнения – 60–70%. Объемные доли полимеров в смеси соизмеримы, поэтому можно ожидать как формирования матричной структуры композита, так и структур типа взаимопроникающих сеток. В обоих случаях компатибилизатор распределяется по межфазным границам. Его воздействие на свойства может быть объяснено собственным пластическим деформированием в межфазном слое и морфологическими изменениями структуры смеси полимеров. Есть данные о повышении структурно-чувствительных свойств – прочности при растяжении и разрыве для смесей полимеров, содержащих данный компатибилизатор. Это указывает на увеличение адгезии между полимерными фазами, которое сложно объяснить только физическими причинами. Проанализированы возможные реакции между функциональными группами компатибилизатора и полиэтилентерефталатом в расплаве с раскрытием эпоксидных циклов. Отмечается усиление эффекта совместимости, однако фактическую эффективность компатибилизатора оценить сложно. Необходимы дополнительные механические испытания, оптимизация температуры расплава и поиск баланса между активизацией реакционной компатибилизации и минимизацией деструктивных процессов в полимерах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимерные отходы, вторичная переработка, нанонаполнители, полиэтилентерефталат, полипропилен, компатибилизация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фомина Н.Н., Хозин В.Г. Компатибилизация смесей полимеров при переработке отходов изделий из термопластов // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 4. – С. 229–236. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-4-229-236.

1. ВВЕДЕНИЕ

Утилизация полимерных отходов в последние десятилетия стала серьезной экологической проблемой во всем мире [1–4 и др.]. В соответствии с основными принципами экономики замкнутого цикла или в международной терминологии – циркуляцион-

ной экономики (circular economy) [5] переработка стала наиболее желательной стратегией утилизации полимерных отходов. Переработка отходов термопластов в строительные материалы через повторное плавление, наполнение (необязательно) и формование (экструдированием или прессованием) изделий с длительным жизненным циклом – перспективное

и технологически реализуемое направление, учитывая непостоянство состава полимерных отходов, их загрязненность и, как следствие, трудоемкость более высокотехнологичной переработки [6–10].

На сегодняшний день вторичная переработка полимерных отходов развита недостаточно как в России [4, 9–11], так и в других странах [1, 5–8, 12]. Основные сдерживающие факторы – это относительно низкая стоимость первичных полимеров, загрязненность отходов и необходимость их тщательной сортировки, частичная деструктированность отходов и присутствие в них низкомолекулярных фракций. Причем даже отсортированные полимерные отходы чаще всего – это смеси полимеров. Так, основной полимерный продукт мусоросортировочных предприятий – пластиковые бутылки из-под напитков – состоят из полиэтилентерефталата (PET), но этикетка на них, как правило, из полипропилена (PP), крышка – из полиэтилена высокой плотности (HDPE). Поэтому развитие технологий вторичной переработки целесообразно сосредоточить на переработке смешанных полимерных отходов.

Теоретические положения по совместимости полимерных смесей разработаны еще в первой половине XX века Флори [13] и Хаггинсом [14]. Отечественные исследования полимерных смесей развиты в фундаментальных работах Липатова Ю.С., Кузнецова В.Н., Тагер А.А., Берлина А.А.; зарубежные исследования обобщены в монографиях Paul D.R. и Bucknall [15–16]. Из этих и других, в том числе, современных работ [12, 17–23] известно, что совместимость и смешиваемость для термопластичных полимеров – скорее исключение, чем правило, из-за малой энтропии их смешения и слабой адгезии по межфазным границам. Смесь термопластов можно характеризовать как композиционный материал с развитой границей раздела фаз. И если термодинамически термопласты несовместимы, то управлять технологической совместимостью их смесей в расплаве возможно. Здесь современные разработки развиваются в нескольких направлениях.

Ставшее традиционным направление – это введение в смесь дополнительного совмещающего агента – компатибилизатора, преимущественно полимерного типа (как правило, блок- или привитые сополимеры, реже статистические). Компатибилизаторы способствуют снижению поверхностной энергии несовместимых полимеров, уменьшению размеров фазоразделенных структур и стабилизации их морфологии [24] и таким образом улучшают физико-механические свойства композитов.

Другое направление – образование в смеси в процессе плавления свободных радикалов. Это достигается, например, введением в смесь пероксидов [17, 25–27] или физической обработкой смеси (гамма-из-

лучением и др.). Образование свободных радикалов приводит к разрывам цепи, образованию пероксидных, гидроксильных, карбонильных групп, сшиванию с образованием пространственных структур, что может способствовать улучшению совместимости смесей. Механохимические процессы также могут способствовать образованию свободных радикалов. Комбинация сдвига, растяжения, трения приводит к разрывам линейных макромолекул, становятся возможными межцепочные реакции.

Наиболее современное направление – введение в смесь термопластов нанонаполнителей, выступающих в роли компатибилизаторов. Здесь основная сложность – сконцентрировать наночастицы на межфазных границах, т.к. только в этом случае достигается цель улучшения совместимости [18–19].

Еще одно направление – реакционная компатибилизация, т.е. улучшение совместимости в результате происходящих непосредственно в расплаве физико-химических реакций. При этом в расплав термопластов вводится дополнительный компонент: как правило, полимер с функциональными группами (эпоксидными, акрилатными, карбоксильными, изоцианатными и др.), активными по отношению к функциональным группам компонентов смеси. Это приводит к образованию на границе раздела сложных блок-сополимеров или привитых сополимеров, в результате чего образуются пространственные структуры. Отмечается [12], что реакционная компатибилизация с участием эпоксидных групп целесообразна для смесей полимерных отходов, в которых в результате деструктивных процессов образуются концевые гидроксильные и карбоксильные группы.

Сочетание нескольких способов управления совместимостью полимеров в расплаве представляется наиболее перспективным. Такие разработки показаны, например, в [28], где воздействовали на совместимость вторичного PET и первичного полиэтилена низкой плотности (LDPE) двумя способами: введением компатибилизатора (сополимера этилена и винилацетата) и дополнительной обработкой гамма-излучением. В результате улучшились механические и термические свойства смеси.

Индустрия полимерных композитов активно развивается, и на рынке представлен спектр добавок-совместителей, в том числе, компатибилизаторов с привитыми функциональными группами. Так, модифицированные сополимеры этилена и винилацетата (например, Этатилен от компании «Новые полимерные технологии» (<http://npt.ltd>), Сэвилен от компании «Химплекс» (<https://himplex.ru>) и др.) позиционируются как добавки при переработке полимерных отходов. Такие сополимеры могут выпол-

нять роль как традиционного, так и реакционного компатибилизатора. Представленная работа имела целью исследование влияния сополимерного компатибилизатора с привитыми функциональными группами на свойства композитов, полученных из смесей отходов массовых и успешно поддающихся выборке и сортировке термопластов – PET и PP.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследований использовались коммунальные отходы полиэтилентерефталата (rPET) (смесь прозрачных и цветных бутылок) и полипропилена (rPP) (пищевые контейнеры), которые перед плавлением измельчались на частицы размерами до 50 мм и высушивались.

В качестве сополимерного компатибилизатора использовался модифицированный сополимер этилена и винилацетата «Этатилен EVA-g-GMA» (EVA-g-GMA) с привитыми химически активными полярными акрилатными и эпоксидными группами производства ООО «Новые полимерные технологии» (Брянская обл., г. Унеча). Содержание винилацетатных групп в сополимере – 22%. Степень прививки 2,3-эпоксипропилметакрилата (GlycidylMethacrylate (GMA)) – 3%. По данным производителя, данная марка компатибилизатора эффективна для полимерных смесей, изготовленных на основе полиэфиров, особенно при переработке рециклинговых PE, PET и их смесей.

Смесь полимеров (rPET, rPP, EVA-g-GMA) подвергали плавлению. В полученный расплав вводился минеральный наполнитель – известняковая мука (удельная поверхность 1000 см²/г по ПСХ-12). Степень наполнения композиций варьировалась от 50 до 85 % по массе. Готовая смесь загружалась в пресс-форму. Образцы прессовались при удельном давлении 25 МПа в течение 2 мин, с охлаждением естественной выдержкой в течение 3 часов.

Для исследования состава и наличия функциональных групп в полимерах применялся метод инфракрасной (ИК) спектроскопии, спектры регистрировались на приборе «InfralumFT-801». Для отслеживания температурных переходов и тепловых эффектов проводился дифференциальный термический анализ (ДТА) на приборе «DerivatographQ-1500D».

Физико-механические свойства определялись следующим образом. Для определения предела прочности при сжатии (R) изготавливались образцы размерами 80x40x40 мм и испытывались по аналогии с методикой ГОСТ 310.4. Для определения предела прочности на растяжение при изгибе (R_б) изготавливались образцы размерами 80x40x10 мм и испытывались по аналогии с методикой ГОСТ 27180.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Выбор температуры расплава

По рекомендациям производителя EVA-g-GMA, он может перерабатываться при тех же температурах, что и базовые марки полимеров, для компатибилизации которых он используется. ДТА сополимера EVA-g-GMA показал (рис. 1), что эндоэффект плавления регистрируется в интервале 40–110°C с максимумом при 75°C, а при температуре 240°C начинаются процессы термоокислительной деструкции, что сопровождается экзоэффектом и началом активной потери в массе. Исходя из этого мы выбрали температуру приготовления расплава полимерных компонентов композиции – 240±5°C. При более низких температурах не удастся получить расплав rPET, т.к. ранее показано [9], что эндоэффекты плавления для него регистрируются в интервале 235–265°C с максимумом при 255°C. Для получения расплава rPP указанных температур достаточно [9].

3.2 Выбор соотношения между полимерными компонентами в расплаве

Соотношение между полимерами rPET и rPP в композициях принято исходя из ранее проведенных исследований – 70:30% по массе [9–10].

Дозировка EVA-g-GMA изначально выбиралась, основываясь на рекомендациях производителя добавки (от 1,5 до 5%), а также ориентируясь на исследования [29–31]. Двухфазная морфология смеси rPET и rPP с низкой адгезией между фазами отрицательно сказывается на механических свойствах получаемых из смесей изделий. Мы провели предварительную серию экспериментов, исследуя влияние дозировки EVA-g-GMA в смеси rPET и rPP (EVA-g-GMA вводился в смесь взамен части rPP) на прочностные свойства образцов наполненных полимерных композитов. Установлено, что при введении в состав этого компатибилизатора в количестве от 1,5 до 10% от суммарной массы полимерных компонентов rPET и rPP наблюдается снижение прочности при сжатии и увеличение прочности при изгибе получаемых наполненных образцов. При содержании EVA-g-GMA в количестве 5% наблюдается наибольший прирост прочности при изгибе. При введении компатибилизатора в меньших количествах эффект усиления прочности при изгибе уменьшается; при введении большего количества компатибилизатора прочность образцов при изгибе остается на том же уровне, а прочность при сжатии снижается. В результате соотношение между полимерными компонентами композиции выбрано:

rPET:rPP:EVA-g-GMA = 70:25:5% по массе.

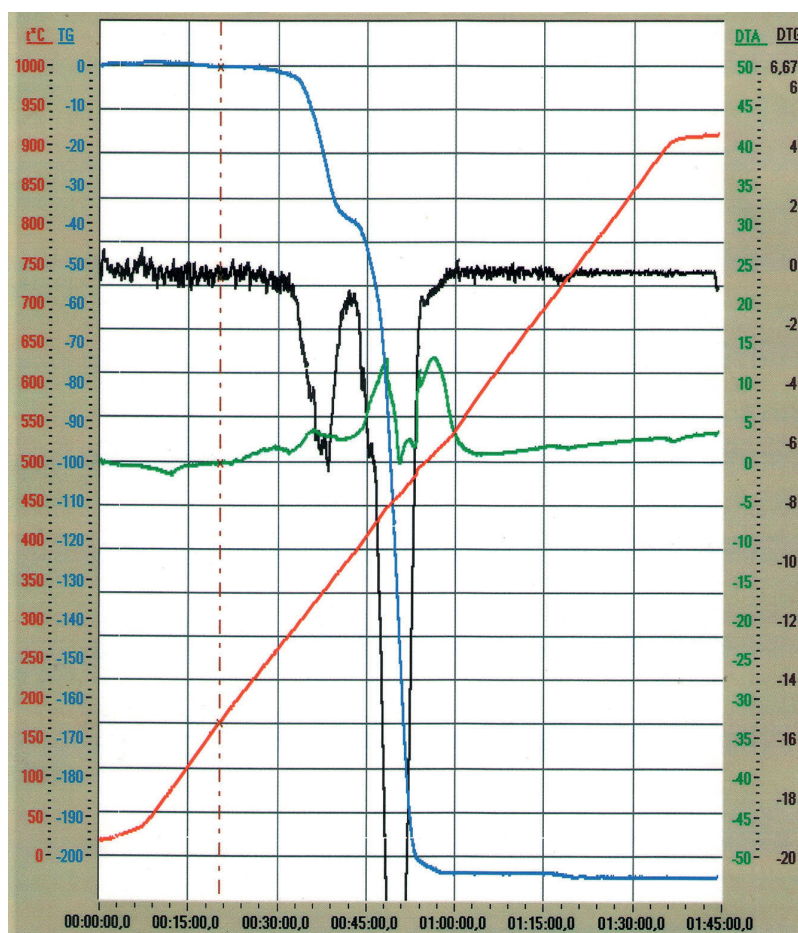


Рис. 1. Дериватограмма и термограмма EVA-g-GMA

3.3 Исследование влияния компатибилизатора на прочностные свойства образцов композитов с различной степенью наполнения

Полученные экспериментальные значения прочности образцов в зависимости от степени наполнения (рис. 2–3) для составов с компатибилизатором EVA-g-GMA и без него указывают на следующие закономерности. Зависимости экстремальны, наибольшие значения прочностных показателей регистрируются в интервале степеней наполнения 60–70% по массе композиции. Наличие компатибилизатора в композициях приводит к снижению прочности при сжатии образцов, повышению прочности при изгибе во всем интервале степеней наполнения.

3.4 Обоснование компатибилизации физическими процессами

Такое воздействие компатибилизатора на свойства образцов может быть объяснено морфологическими изменениями структуры смеси полимеров. Если объемная доля в основном полимере другого

полимера невелика, формируется дисперсная фаза второго полимера, морфология которой будет зависеть от степени смешивания, объемных долей и взаимодействия полимеров. Так, например, показано [29], что в смеси гРЕТ и гРР (в соотношениях 80–95:20–5 по массе) идентифицируется дисперсная фаза гРР, и средний размер частиц гРР увеличивается при увеличении объемной доли его в смеси. Введение компатибилизатора в смесь приводит к более однородному распределению и уменьшению среднего размера частиц фазы гРР. В [22] объемная доля РР, напротив, существенно больше, чем РЕТ (соответственно 85:15 по массе), и при помощи сканирующей электронной микроскопии идентифицируется дисперсная фаза РЕТ. Причем в бинарных смесях РЕТ и РР фаза РЕТ плохо диспергирована, а в присутствии компатибилизатора средний размер частиц дисперсной фазы РЕТ уменьшается, и они распределены более равномерно.

В нашем случае объемная доля гРР меньше, но соизмерима с объемной долей гРЕТ в смеси полимеров. Поэтому можно ожидать как формирования матричной структуры гРЕТ с дисперсной фазой

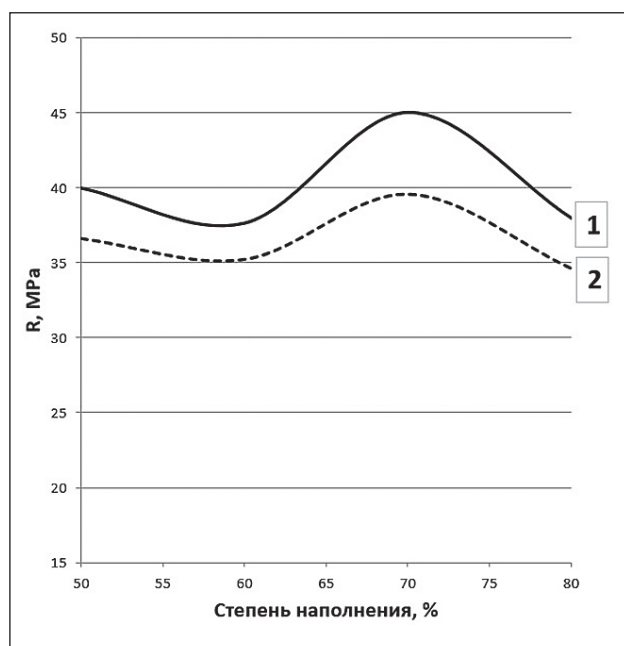


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии от степени наполнения композиции

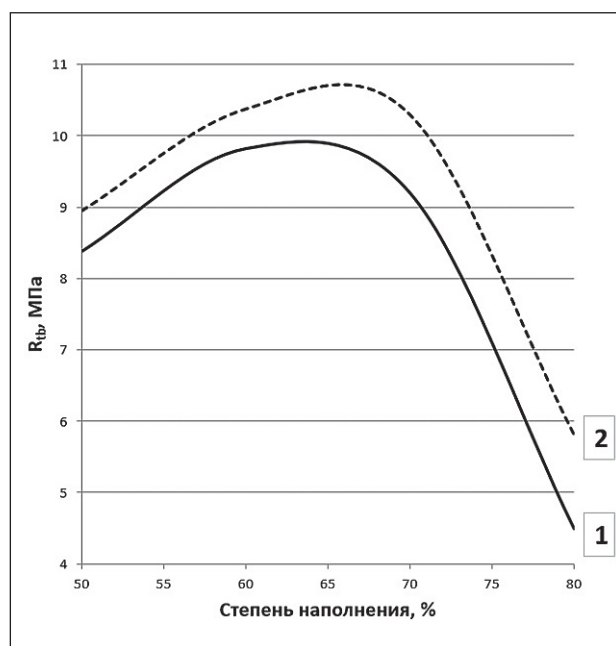


Рис. 3. Зависимость предела прочности при изгибе от степени наполнения композиции

В состав композиций входят:

1 – гРЕТ, гРР в соотношении 70:30 % по массе; 2 – гРЕТ, гРР, EVA-g-GMA в соотношении 70:25:5 % по массе.

гРР, так и структуры типа взаимопроникающих сеток (ВПС). Но и в том, и в другом случае, компатибилизатор распределяется по межфазным границам [29]. Поэтому увеличение прочности при изгибе и одновременное снижение прочности при сжатии отчасти можно объяснить физическими процессами – как морфологическими изменениями структуры, так и пластическим деформированием межфазного слоя компатибилизатора.

Известно, что прочность при растяжении и разрыве является более структурно-чувствительным свойством при анализе совместимости полимеров. По данным [29], введение гРР в гРЕТ приводит к снижению прочности на разрыв, а введение компатибилизатора в смесь полимеров приводит к значительному увеличению этого показателя. Модуль упругости смеси гРЕТ и гРР, по данным [29], ниже, чем каждого из полимеров, а введение в их смесь компатибилизатора приводит к еще большему его снижению, что объясняется деформативностью слоя компатибилизатора на основе сополимера EVA, модуль упругости которого значительно ниже, чем у РР. Тем не менее, при большой доле гРР в смеси полимеров компатибилизатор снижает модуль упругости смеси очень незначительно. В [30] также отмечается рост прочности при изгибе и при растяжении при введении в смесь вторичного полиэтилена и гРЕТ компатибилизатора. Все это явно указывает на уве-

личение адгезии между двумя полимерными фазами, которое сложно объяснить только физическими причинами.

Кроме того, авторы [22] показали, что средний размер частиц дисперсной фазы РР в смеси (РР в РЕТ) увеличивается с увеличением температуры расплава. Для несовместимых смесей это явление известно, поскольку энтальпия смешения (которая отрицательно влияет на смешиваемость) будет увеличиваться с повышением температуры [32]. В то же время в [22] показано, что в присутствии компатибилизатора, напротив, с повышением температуры средний размер частиц дисперсной фазы РЕТ уменьшается. Это указывает на более сложный механизм компатибилизации, который обусловлен не только изменениями в морфологии фаз (в обсуждаемых здесь исследованиях в качестве компатибилизатора также использовались GMA-модифицированные сополимеры).

3.5 Обоснование компатибилизации физико-химическими процессами

Компатибилизатор EVA-g-GMA с прививкой бифункционального мономера – 2,3-эпоксипропилметакрилата содержит ненасыщенную группу для полимеризации или свободно-радикальной прививки и эпоксидную группу, которая может реагировать

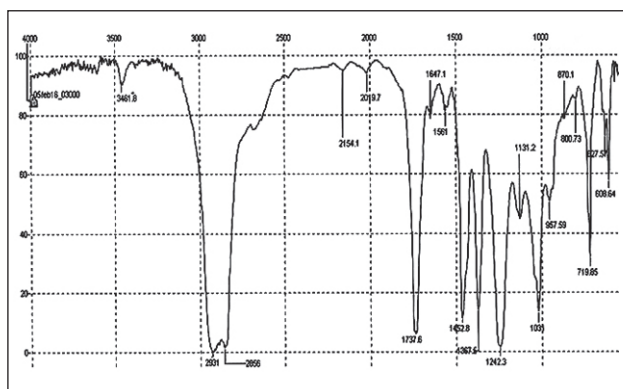


Рис. 4. ИК-спектр EVA-g-GMA

с концевыми функциональными группами, такими как гидроксилы и карбоксилы.

Наличие функциональных групп в составе компатибилизатора EVA-g-GMA исследовалось с помощью ИК-спектроскопии (рис. 4).

Сильная полоса поглощения эпоксигруппы и эфирной связи регистрируется при $1240\text{--}1250\text{ см}^{-1}$, слабая полоса поглощения эпоксигруппы – при 870 см^{-1} . В [33] возможные химические реакции между компатибилизатором и полибутилентерефталатом исследованы через изменения в характерных для эпоксидных групп в GMA-модифицированных сополимеров этилена полос при $846, 909$ и 995 см^{-1} . В нашем случае данные полосы либо не выражены, либо смещены. Также вероятно, что идентификация функциональных групп осложнена из-за невысокой степени прививки GMA (3% в нашем случае, против 8% в [22, 29, 33]) к сополимеру EVA.

Известно, что эпоксидные циклы при температуре порядка $150\text{--}180^\circ\text{C}$ способны раскрываться и участвовать в реакциях удлинения цепи. Как эпоксидные, так и акрилатные функциональные группы активны в реакциях образования внутри-молекулярных и межмолекулярных водородных

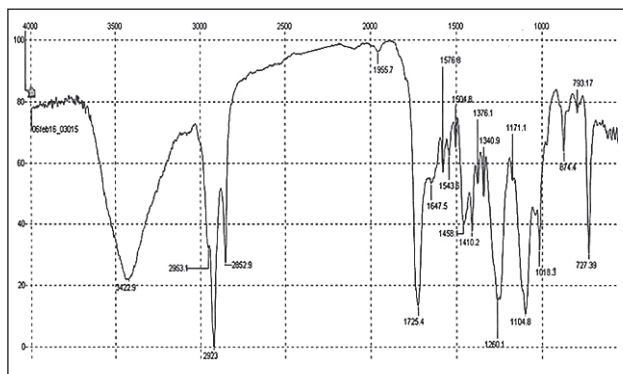


Рис. 5. ИК-спектр смеси rPET, rPP, EVA-g-GMA в соотношении 70:25:5 % по массе

связей с образованием полиассоциатов. На такого рода реакции косвенно может указывать появление на ИК-спектрах смеси полимеров (рис. 5) сильной широкой полосы поглощения при $3420\text{--}3590\text{ см}^{-1}$, но идентифицировать химические реакции по спектрам сложно, т.к. эта же полоса свидетельствует и о наличии концевых гидроксильных групп во вторичных полимерах.

Возможные реакции между функциональными группами компатибилизатора EVA-g-GMA и фазой rPET в расплаве можно представить схематично (рис. 6). Реакции обратимы, и, как отмечается

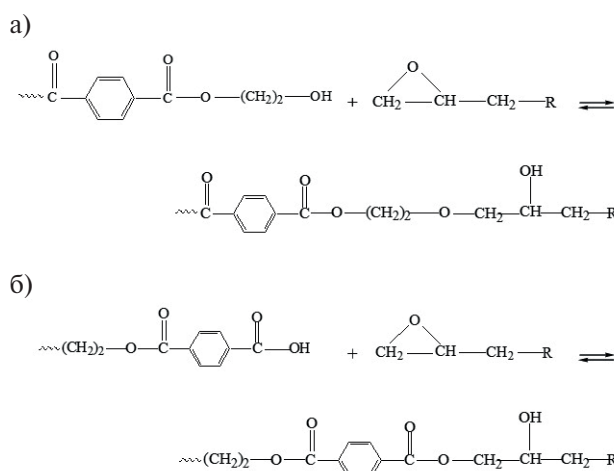


Рис. 6. Схемы возможных химических реакций между эпоксидной группой GMA и концевыми группами rPET: (а) гидроксильной; (б) карбонильной

во многих исследованиях [12, 22, 30, 34], повышенная реакционная способность функциональных групп GMA-модифицированных сополимеров по отношению к фазе PET может быть результатом термической активации реакции со сдвигом равновесия вправо и увеличением количества реакционноспособных групп rPET из-за деструкционных процессов. В целом, отмечается усиление эффекта совместимости PP и PET с помощью GMA-модифицированных компатибилизаторов при повышении температуры расплава. И поэтому температуры расплава в указанных исследованиях принимались в интервале $270\text{--}300^\circ\text{C}$. В нашем случае температура не превышала 245°C из-за начала термодеструкции EVA-g-GMA, что показано выше.

4. ВЫВОДЫ

1. При переработке смешанных термопластичных полимерных отходов в строительные изделия технологическая совместимость может быть улуч-

шена непосредственно в расплаве введением в смесь компатибилизаторов. Для отходов, содержащих полиэтилентерефталат, эффективны модифицированные компатибилизаторы с привитыми эпоксидными группами, которые в расплаве реагируют с концевыми гидроксильными и карбоксильными группами полиэтилентерефталата.

2. Введение модифицированного компатибилизатора EVA-g-GMA в смесь отходов полиэтилентерефталата и полипропилена в количестве 5% от суммарной массы полимерных компонентов композиции приводит к повышению прочности при изгибе и снижению прочности при сжатии наполненных образцов. Это объясняется морфологическими изменениями структуры полимерной смеси, а также пластическим деформированием межфазного слоя компатибилизатора при нагружении. Также вероятны химические реакции в расплаве с раскрытием эпоксидных циклов.

3. Довольно сложно оценить фактическую эффективность компатибилизатора и его привитых

функциональных групп в исследованных смесях полимерных отходов, так как влияние его на прочность при изгибе и сжатии наполненных образцов не столь существенно. Необходимы дополнительные механические испытания – на разрыв и ударную вязкость, что позволит сформулировать практические рекомендации управления свойствами изделий для более эффективной переработки этих отходов.

4. Необходима оптимизация температуры расплава и поиск баланса между активизацией реакционной компатибилизации и минимизацией деструктивных процессов в полимерах.

В заключении необходимо добавить, что переработка полимерных отходов в строительные материалы не только позволяет экономить первичное сырье и энергию, но также обеспечить утилизацию пластиков в свете современных тенденций повышенного внимания к экологическим проблемам и ужесточения законодательства по утилизации отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geyer R., Jambeck J., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017; 3(7). Available from: [doi: 10.1126/sciadv.1700782](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782).
2. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste, in: European Commission (Ed.). 2008.
3. Sustainable Plastics Strategy. Edition 2, December 2020. Available from: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4352-sustainable-plastics-strategy> [Accessed 5th July 2021].
4. Международный форум Союза переработчиков пластмасс // Полимерные материалы. – 2021. – № 4. – С. 4–13.
5. BS 8001:2017: Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations.
6. Kumi-Larbi Jnr Al., Yunana D., Kamsouloum P., Webster M., Wilson D.C., Cheeseman Ch. Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks. *Waste Management*. 2018; 80: 112–118. Available from: [doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.003](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.003).
7. Dalhat M.A., Al-Abdul Wahhab H.I. Cement-less and asphalt-less concrete bounded by recycled plastic. *Construction and Building Materials*. 2016; 119: 206–214. Available from: [doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.010](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.010).
8. Dhawan R., Brij Mohan Singh Bisht, Rajeev Kumar, Saroj Kumari, Dhawan S.K. Recycling of plastic waste into tiles with reduced flammability and improved tensile strength. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; 124: 299–307. Available from: [doi: 10.1016/j.psep.2019.02.018](https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.02.018).
9. Fomina N.N., Polyanskij M.M. Components of solid municipal waste in construction compositions. *IOP Conference Series: Earth and environmental Science*. 2019; 337(1). Available from: [doi: 10.1088/1755-1315/337/1/012022](https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012022).
10. Фомина Н.Н., Хозин В.Г. Термопластичное связующее из полимерных отходов // Строительные материалы. – 2021. – № 1–2. – С. 105–114. – DOI: 10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-00-00.
11. Пзаев К.В. Текущее состояние и тренды рынка переработки отходов пластмасс в России // Полимерные материалы. – 2020. – № 8. – С. 4–10.
12. Marisa J., Bourdon S., Brossard J.-M., Cauret L., Fontaine L., Montembault V. Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability*. 2018; 147. Available from: [doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.001](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.001).
13. Flory P.J. Thermodynamics of high polymer solutions. *The Journal of Chemical Physics*. 1941; 9(8): 660–661.
14. Huggins M.L. Solutions of long chain compounds. *The Journal of Chemical Physics*. 1941; 9(5): 440.
15. Полимерные смеси. Том 1: Систематика / под ред. Д.Р. Пола и К.Б. Бакнелла. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 618 с.
16. Полимерные смеси. Том 2: Функциональные свойства / под ред. Д.Р. Пола и К.Б. Бакнелла. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 606 с.

17. Заикин А.Е., Бобров Г.Б. Влияние перекиси на свойства смеси полипропилена и сополимера этилена с винилацетатом // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 15 (7). – С. 67–70.
18. Заикин А.Е., Бобров Г.Б. Снижение порога перколяции технического углерода в смесях полимеров // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 15 (18). – С. 119–125.
19. Заикин А.Е., Бобров Г.Б. Компатибилизация смесей несовместимых полимеров наполнением // Высокомолекулярные соединения. – Серия А. – 2012. – № 54 (8). – С. 1275–1282.
20. Аскадский А.А. Вторичные полимерные материалы (механические и барьерные свойства, пластификация, смеси и нанокмозиты) / А.А. Аскадский, Т.А. Мацеевич, М.Н. Попова. – М.: Издательство АСВ, 2017. – С. 496 с.
21. Микитаев М.А., Козлов Г.В., Микитаев А.К. Структурный анализ совместимости полимерных смесей // Пластические массы. – 2017. – № 1–2. – С. 20–23.
22. Bruggen E. P. A., Koster R. P., Picken S. J., Ragaert K. Influence of Processing Parameters and Composition on the Effective Compatibilization of Polypropylene–Poly(ethylene terephthalate) Blends. *International Polymer Processing*. 2016; 31(2): 179–187. Available from: doi: [10.3139/217.3124](https://doi.org/10.3139/217.3124).
23. Jayanarayanan K., Thomas S., Joseph K. Effect of compatibilizer on the morphology development, static and dynamic mechanical properties of polymer–polymer composites from LDPE and PET. *International Journal of Plastics Technology*. 2015; 19(1): 84–105. Available from: doi: [10.1007/s12588-015-9108-1](https://doi.org/10.1007/s12588-015-9108-1).
24. Utracki L. Compatibilization of Polymer Blends. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2002; 80: 1008–1016. Available from: doi: [10.1002/cjce.5450800601](https://doi.org/10.1002/cjce.5450800601).
25. Ma P., Cai X., Zhang Y., Wang S., Dong W., Chen M., Lemstra P.J. In-situ compatibilization of poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends by using dicumyl peroxide as a free-radical initiator. *Polymer Degradation and Stability*. 2014; 102: 145–151. Available from: doi: [10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.025](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.025).
26. Wang Y., Li D., Zhang J.-M., Xie X.-M. Compatibilization and toughening of immiscible ternary blends of polyamide 6, polypropylene (or a propylene–ethylene copolymer), and polystyrene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011; 11(3): 1652–1658. Available from: doi: [10.1002/app.32839](https://doi.org/10.1002/app.32839).
27. Gu J., Xu H., Wu C. Thermal and crystallization properties of HDPE and HDPE/PP blends modified with DCP. *Advances in Polymer Technology*. 2014; 33(1). Available from: doi: [10.1002/adv.21384](https://doi.org/10.1002/adv.21384).
28. Abdel Tawab K., Ibrahim S.M., Magida M.M. The effect of gamma irradiation on mechanical, and thermal properties of recycling polyethylene terephthalate and low density polyethylene (R-PET/LDPE) blend compatibilized by ethylene vinyl acetate (EVA). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012; 295(2): 1313–1319. Available from: doi: [10.1007/s10967-012-2163-6](https://doi.org/10.1007/s10967-012-2163-6).
29. Baccouch Z., Mbarek S., Jaziri M. Experimental investigation of the effects of a compatibilizing agent on the properties of a recycled poly(ethylene terephthalate)/ polypropylene blend. *Polymer Bulletin*. 2016; 1–18. Available from: doi: [10.1007/s00289-016-1748-6](https://doi.org/10.1007/s00289-016-1748-6).
30. Chen R.S., Ghani M.H., Salleh M.N., Ahmad S., Gan S. Influence of blend composition and compatibilizer on mechanical and morphological properties of recycled HDPE/PET blends. *Materials Sciences and Applications*. 2014; 5(13): 943–952. Available from: doi: [10.4236/msa.2014.513096](https://doi.org/10.4236/msa.2014.513096).
31. Pantyukhov P., Popov A., Kolesnikova N. Preparation, structure, and properties of biocomposites based on low-density polyethylene and lignocellulosic fillers. *Polymer Composites*. 2016; 37(5): 1461–1472. Available from: doi: [10.1002/pc.23315](https://doi.org/10.1002/pc.23315).
32. Higgins J. S., Lipson J. E. G., White R. P. A Simple Approach to Polymer Mixture Miscibility. *Philosophical Transactions of Royal Society A*. 2010; 368: 1009–1025. Available from: doi: [10.1098/rsta.2009.0215](https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0215).
33. Tsai C.H., Chang F.C. Polymer Blends of PBT and PP Compatibilized by Ethylene-co-Glycidyl Methacrylate Copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 1996; 61: 321–332.
34. Yildirim E., Yurtsever M. A Comparative Study on the Efficiencies of Polyethylene Compatibilizers by Using Theoretical Methods. *Journal of Polymer Research*. 2012; 19. Available from: doi: [10.1007/s10965-011-9771-7](https://doi.org/10.1007/s10965-011-9771-7).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фомина Наталья Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные материалы, конструкции и технологии» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7882-1325>, e-mail: fominanani@yandex.ru

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология строительных материалов, изделий и конструкций» ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0874-316X>, e-mail: khozin.vadim@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 15.07.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 03.08.2021.

Статья принята к публикации: 06.08.2021.