

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 678

DOI 10.55421/3034-4689_2026_29_2_56

**Х. С. Абзальдинов, С. В. Тутов, К. Б. Вернигоров,
В. И. Машуков, С. Н. Русанова, Ю. М. Казаков, О. В. Стоянов**

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЕИНИЗИРОВАННОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА (ОБЗОР)

Ключевые слова: полипропилен, малеиновый ангидрид, малеинизированный полипропилен, кристаллизация, компатибилизатор, совместимость.

Работа посвящена обзору современных научных публикаций, касающихся изучения влияния малеинового ангидрида на структуру полипропилена, смесей на его основе и других модифицированных объектов, разработки альтернативных методов его синтеза и областей применения. Показано, что в последние годы наряду с традиционными методами синтеза малеинизированного полипропилена активно развиваются и альтернативные направления, которые в основном заключаются либо в модификации реакционной среды различными химическими соединениями, либо в поиске новых способов синтеза и аппаратного оформления. Среди множества опубликованных работ, выделяются труды, посвященные поверхностной прививке малеинового ангидрида с использованием микроволновых технологий и применением нанореакторов. Перспективным способом улучшения условий синтеза и свойств получаемого продукта является поиск и усовершенствование инициаторов реакции и других активных добавок. Также установлено, что при прививке малеинового ангидрида к полипропилену существенно изменяются не только его эксплуатационные свойства, но и структура полимера. В особенности ангидрид способен воздействовать на кристаллическую структуру полипропилена и смесей на его основе. Традиционно малеинизированный полипропилен находит эффективное применение в качестве компатибилизатора для смесей на основе полипропилена, улучшая его совместимость с другими полиолефинами, а также натуральными высокомолекулярными соединениями и эластомерами. Также, в ряде опубликованных за последние годы работ показано значительное влияние малеинизированного полипропилена на улучшение совместимости в полимерных композициях с различными волокнами и древесно-полимерных композитах. В настоящее время активно развивается еще одна область применения малеинизированного полипропилена – полимерные диэлектрики.

**Kh. S. Abzal'dinov, S. V. Tutov, K. B. Vernigorov,
V. I. Mashukov, S. N. Rusanova, Yu. M. Kazakov, O. V. Stoyanov**

SYNTHESIS, STRUCTURE AND APPLICATION OF MALEATED POLYPROPYLENE (REVIEW)

Keywords: polypropylene, maleic anhydride, maleated polypropylene, crystallization, compatibilizer, compatibility.

This paper reviews current scientific publications on the influence of maleic anhydride on the structure of polypropylene, its blends, and other modified materials, as well as the development of alternative synthesis methods and applications. It is shown that in recent years, alongside traditional methods for synthesizing maleated polypropylene, alternative approaches have been actively developing. These primarily involve modifying the reaction medium with various chemical compounds or exploring new synthesis methods and instrumentation. Among the many published papers, studies devoted to the surface grafting of maleic anhydride using microwave technologies and nanoreactors stand out. A promising way to improve synthesis conditions and the properties of the resulting product is the search for and improvement of reaction initiators and other active additives. It has also been established that grafting maleic anhydride onto polypropylene significantly alters not only its performance properties but also its structure. Maleic anhydride is particularly capable of affecting the crystalline structure of polypropylene and its blends. Traditionally, maleated polypropylene has been effectively used as a compatibilizer for polypropylene-based blends, improving its compatibility with other polyolefins, as well as natural high-molecular compounds and elastomers. Furthermore, a number of studies published in recent years have demonstrated the significant impact of maleated polypropylene on improving compatibility in polymer composites with various fibers and wood-polymer composites. Another area of application for maleated polypropylene is currently actively developing are polymer dielectrics.

Введение

Полипропилен (ПП) является вторым по объему потребляемым полимером благодаря своим хорошим физико-механическим свойствам, прозрачности, низкой стоимости, простоте переработки и высокой химической и влагостойкости [1]. Однако основными недостатками ПП являются высокий коэффициент теплового расширения, плохие адгезионные свойства и восприимчивость к окислению [2]. Смешивание ПП с другими полимерами, модификаторами или наполнителями является эффективным способом для оптимизации его свойств. Функционализация ПП и

других полиолефинов полярными химическими соединениями может существенно улучшить совместимость между различными компонентами полимерных смесей, снижая межфазное натяжение [3-6]. Различные исследователи изучали прививку малеинового ангидрида (МАН) к полимерным цепям полипропилена, повышая тем самым его совместимость с различными полярными полимерами [7, 8]. Первоначально для прививки использовали растворный процесс с достаточно высокой конверсией [7-10]. Далее была освоена прививка МАН к ПП методом экструзии из расплава при различных концентрациях ангидрида, типе и

количестве инициатора, а также условиях обработки [8, 11, 12-15]. При данном способе очень важен контроль реакции для предотвращения чрезмерного разрыва цепей и образования гелей, которые в конечном итоге изменяют реологические характеристики ПП. Кроме того, известно, что прививка МАН к цепям ПП, хотя и повышает совместимость, сопровождается побочной реакцией, известной как β -расщепление, вызывающей снижение молекулярной массы [16-18]. Однако, несмотря на обширные исследования, влияние прививки МАН, возникновение и влияние побочных реакций на структуру ПП в процессе и после завершения реакции до сих пор недостаточно изучены, и эта область продолжает привлекать внимание исследователей [11].

В начале возникновения научной области исследований малеинизированных полиолефинов было представлено множество работ по изучению кристаллизации полиолефинов, модифицированных МАН. Работа, выполненная Сео и др., [19] показывает, что малеинизированный полипропилен (МАПП) может играть роль нуклеирующего агента в смеси ПП/МАПП. Работа Харпера [20] с аналогичной смесью показала, что прививка МАН привела к снижению температуры плавления ПП, вероятно, из-за сокращения кристаллизации ПП и МАПП. Кристаллизация, поведение при плавлении и структура ПП с различным содержанием малеинового ангидрида (0,5, 1 и 3 мас. %) были исследованы Менихардом и др. [21]. Хотя существует довольно много исследований полиолефинов, модифицированных МАН, включая ПП [21, 22] – различное влияние одинаковой степени модификации МАН на кристаллизацию, структуру и свойства различных полиолефинов до сих пор не исследовано.

Также, наряду с традиционными способами получения малеинизированного полипропилена в настоящее время появляются и альтернативные варианты синтеза. Так, прививка МАН на полипропиленовую пленку с помощью методов поверхностной прививки предлагает путь, который потенциально может решить проблемы, возникающие в процессе плавления или растворения [23]. Способ имеет очевидные достоинства: во-первых, активные участки прививки, например, свободные радикалы или ионы, в основном расположены на поверхности пленки, где происходит прививка ангидридных функциональных групп; во-вторых, при достаточной степени прививки ангидрида на поверхности обычный связующий слой может не потребоваться, что значительно упростит процесс изготовления многослойности, в-третьих, остаточные мономеры легко удаляются, поскольку реакция ограничена только поверхностью пленки. Кроме того, деструкция полипропилена в объеме может быть подавлена, поскольку возможная реакция β -расщепления полипропиленовых цепей происходит только на поверхности. К распространенным методам поверхностной прививки относятся

твердофазная прививка [24], суспензионная прививка [25] и прививка с помощью облучения [26]. Из-за низкой температуры реакции в процессах твердофазной и суспензионной прививки время реакции очень велико, что нецелесообразно с промышленной точки зрения [27]. Технологии облучения, такие как γ -излучение, электронные пучки, плазма и т. д., позволяют получить большое количество активных участков прививки на полимерных цепях за короткое время. Однако механические свойства полимера в некоторой степени ухудшаются, а высокая стоимость оборудования также является нежелательным фактором [28, 29].

Что касается областей применения малеинизированного полипропилена, то он традиционно используется в качестве компатибилизатора для смесей полимеров и их различных модифицированных вариантов. Компатибилизаторы на основе МАПП обычно представляют собой амфифильные вещества, один конец которых соединен с ПП, а другой – со вторым компонентом смеси [30-32]. В работах Гао и др. проведено смешение ПП с полиэтиленом (ПЭ) в различных пропорциях и обнаружено усиление границы раздела фаз, сопровождаемое повышением совместимости ПП/ПЭ [33]. Дикобе и Луйт [34] использовали полипропилен, модифицированный малеиновым ангидридом, в качестве компатибилизатора для полипропилена (ПП) и линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП), обнаружив более сильное взаимодействие между МАПП и ЛПЭНП.

Каннан и др. проанализировали влияние компатибилизатора МАПП на свойства смесей термопластичного полиуретана (ТПУ) и ПП [35]. Аранбуру и Эгисабаль исследовали, что полипропилен и полиамид-12 (ПА12) являются по своей природе несовместимыми полимерными смесями из-за различной полярной природы. После модификации ПП сополимером МАПП совместимость смесей ПП/ПА12 улучшилась [36].

Таким образом, исходя из вышеизложенного, аналитический обзор современных научных публикаций, касающихся изучения влияния малеинового ангидрида на структуру полипропилена, смесей на его основе и других модифицированных объектов, разработки альтернативных методов его синтеза и областей применения представляется несомненно актуальной задачей.

Синтез и свойства малеинизированного полипропилена

Модифицированный малеиновым ангидридом полипропилен часто получают методом экструзии с прививкой ангидрида в расплаве. Основная проблема этого процесса заключается в наличии большого количества остаточного (непрореагировавшего) МАН в полимере. Исходя из этого в последние годы наряду с традиционными методами синтеза малеинизированного полипропилена активно

развиваются и альтернативные направления, которые в основном заключаются либо в модификации реакционной среды различными химическими соединениями, либо в поиске новых способов синтеза и аппаратурного оформления.

Перспективным способом улучшения условий синтеза и свойств получаемого продукта является поиск и усовершенствование инициаторов реакции.

Так, исследована функционализация полипропилена методом радикальной полимеризации с целью оптимизации его свойств путем изменения молекулярной массы [37]. Прививка ПП проводилась при различных концентрациях малеинового ангидрида и пероксида бензоила (ПБ) в качестве инициатора. Влияние на вязкость в процессе реакции и после нее изучалось с помощью ротационного вискозиметра и прибора для определения индекса текучести расплава. Результаты показали, что более высокая концентрация ПБ приводила к избыточным реакциям боковых цепей. При высоком проценте прививки образовывался продукт с более низкой молекулярной массой, который анализировался по изменению вязкости в процессе и после реакции. Процент кристалличности увеличивался за счет прививки благодаря формированию более коротких цепей, что, следовательно, приводило к улучшению их упаковки. Полученный полипропилен, модифицированный малеиновым ангидридом, усиливал взаимодействие в смесях ПП-ПЭТФ, что приводило к образованию частично однородной смеси.

Наноккомпозиты (НК) полипропилена и органophilного монтмориллонита (оМт) получали методом реактивного смешивания с одновременной прививкой малеинового ангидрида к ПП с использованием органического пероксида в качестве инициатора [38]. Использовали пять различных способов введения реагентов и глины в лабораторный смеситель. Структуру композитов исследовали с помощью ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье, рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии. Для оценки свойств использовали ротационную реометрию, термогравиметрию и метод кислородной проницаемости. Метод приготовления оказывает существенное влияние на структуру НК. Одновременное добавление пероксида и МАН к расплавленному ПП с последующим введением глины через 20 минут обеспечивает наилучшую степень расслоения/деагрегации глины. Полученные таким образом НК обладают высокой прозрачностью и имеют очень тонкие тактоиды с межслоевым расстоянием более чем на 50 % большим, чем у исходного оМт. Добавление всего 2 мас. % глины приводит к снижению кислородопроницаемости полипропилена более чем на 30 %. Кроме того, температура, при которой достигается максимальная скорость термической деструкции в атмосфере азота, снижается примерно на 60 °С, в то время как температура начала процесса термодеструкции остается неизменной.

Полипропилен химически модифицировали методом смешения в расплаве с малеиновым ангидридом и сшивали в присутствии оксида цинка при различных концентрациях [39]. Процесс прививки проводился при двух разных температурах: 150 и 180 °С. Использование относительно высоких концентраций инициатора позволяет достичь степени прививки, достаточной для сшивания. Фурье-ИК-спектроскопия подтверждает, что более низкая температура обработки приводит к значительно более высокой эффективности прививки. Термограммы ДСК привитых образцов показывают вторичные точки плавления при более низких температурах, обусловленные взаимодействием между полярными привитыми группами. Образцы, привитые при более низкой температуре обработки, подвергаются разветвлению длинных цепей и демонстрируют сложное термическое поведение. Реологический анализ показывает, что ионная сшивка улучшила свойства расплава; анализ также выявляет образование двухфазной морфологии, развивающейся при сшивании, и подтверждает предложенный механизм. Динамико-механический термический анализ доказывает механическую стабильность при повышенных температурах и выявляет температуры ионного переноса в сшитых образцах. Также проведены испытания на растяжение для оценки механических свойств сшитых образцов.

Присутствие в реакционной среде различных добавок способно в значительной степени улучшить ряд свойств получаемого малеинизированного полипропилена.

К примеру, в работе [40] выбран блок-сополимер полипропилена с низким модулем упругости, к которому прививали органические молекулы малеинового ангидрида и 4-трет-бутилстирола (Ст*) в виде мастербатча (ПП-г-(Ст*-co-МАН)) путем радикальной реакции под воздействием ультрафиолетового излучения. Модифицированный блок-сополимер ПП с различным содержанием привитых молекул получен путем разбавления мастербатча методом смешивания в расплаве, протестированы его электрические свойства в широком диапазоне температур от 40 до 100 °С. Результаты показывают, что введение сомомера Ст* значительно улучшает скорость прививки МАН и подавляет деструкцию цепей ПП в процессе реакции прививки. Таким образом, (ПП-г-(Ст*-co-МАН)) обладает улучшенными термогравиметрическими характеристиками и сохраняет исходные механические свойства и способность к переработке. Привитые функциональные группы создают глубокие ловушки заряда в матрице и, таким образом, эффективно подавляют инжекцию и накопление пространственного заряда, значительно снижают проводимость и повышают прочность на пробой ПП в широком диапазоне температур. Среди исследованных материалов ПП, привитый 0,57 мас. % Ст*-co-МАН, демонстрирует наилучшие электрические свойства, в то время как недостаточное или избыточное содержание

привитого Ст*-со-МАН относительно ослабляет положительные эффекты модификации прививкой. Механизм анализируется на основе расчета уровня ловушек и трехмерного (3D) электрического потенциала.

Сообщается о синтезе аминированного термопластичного полимера, обладающего способностью к захвату радикалов, путем реактивной экструзии полиэтиленмина (ПЭИ) с полипропиленом и полипропиленом, привитым к малеиновому ангидриду, в расплаве [41]. Реакция подтверждена с помощью анализа плотностей аминов по кислотному оранжевому 7 (АО7), карбоновых кислот по толуидиновому синему О (ТВО), ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье и анализа миграции. Спектры ИК-Фурье показали уменьшение асимметричного валентного колебания карбонильной группы малеинового ангидрида при 1777 см^{-1} и появление пика карбонильной группы малеимида при 1702 см^{-1} . АО7 способствовал ориентации поверхности привитых аминных групп за счет введения $7,22\text{ нмоль}\cdot\text{см}^{-2}$ первичных аминов, что соответствует снижению количества поверхностных карбоновых кислот, количественно определенных с помощью ТВО, с $12,46\text{ нмоль}\cdot\text{см}^{-2}$ до $0,43\text{ нмоль}\cdot\text{см}^{-2}$. После инкубации ($40\text{ }^\circ\text{C}$, 10 дней) в этаноле, уксусной кислоте и воде из материалов мигрировало $<0,1\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$ ПЭИ, что подтверждает ковалентный характер прививки. Продемонстрирована антиоксидантная активность, составившая $5,90$ и $4,31\text{ нмоль Trolox}\cdot\text{см}^{-2}$ в водной и органической средах соответственно. Результаты свидетельствуют об успешной реакции конденсации в процессе реактивной экструзии, в результате которой образуется аминированный термопластичный полимер с антиоксидантной активностью для целевых применений, таких как упаковка пищевых продуктов, очистка сточных вод, улавливание углерода и другие.

Функционализированный малеимидом ПП был получен методом реактивной прививки тремя способами, различающимися составом исходной смеси: метод А — одностадийный процесс, метод В — прививка ПП малеиновым ангидридом с последующей реакцией с амином и метод С — реакция между малеиновым ангидридом и амином с образованием малеимида и последующая радикальная прививка малеимида к основной цепи ПП [42]. Функционализация проводилась с использованием двух низкомолекулярных ароматических аминов (анилин, 4-аминофенол) и двух высокомолекулярных алифатических аминов. Функционализированный малеимидом полипропилен также был получен путем прямой прививки N-фенилмалеаминовой кислоты в присутствии осушителя, вызывающего дегидратацию и образование малеимида на основной цепи ПП. Присутствие малеимидных звеньев было идентифицировано с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Влияние функционализации на термические и реологические свойства анализировалось с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии,

термогравиметрического анализа и измерения объемного показателя текучести расплава. Показано, что прямая прививка малеаминовой кислоты упрощает технологический процесс функционализации и обеспечивает экономию материала и времени.

Получена серия гребнеобразных полимерных фазопереходных материалов (PCM) на основе МАПП- $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}$ (МАППС $_n$, $n = 18, 22, 26$) путем реакции этерификации без растворителя между МАПП и n-алкиловым спиртом с длиной боковой цепи, варьирующейся от $n = 18, 22$ до 26 [43]. Боковые алкильные группы МАПП демонстрируют явное поведение при кристаллизации боковой цепи, а температура фазового перехода и тепловая энтальпия МАППС $_n$ увеличиваются с $60,0$ до $82,2\text{ }^\circ\text{C}$ и с $53,6$ до $118,4\text{ Дж/г}$ соответственно с увеличением длины боковой цепи. Композиты с фазовым переходом серии МАППС $_n$ демонстрируют превосходную стабилизацию формы и тепловые характеристики благодаря защитной и закрепляющей роли полипропиленовой основы, а стабилизированная по форме температура $135\text{ }^\circ\text{C}$ и 300 термических циклов дополнительно подтверждают их превосходную структурную стабильность и надежность. МАППС $_{18}$ показывает более длительное время терморегуляции - 362 с и максимальное ΔT при $11,3\text{ }^\circ\text{C}$, а ткань с покрытием из МАППС $_{18}$ обеспечивает время терморегуляции 110 с в процессе аккумуляции тепла, что доказывает ее отличную терморегулирующую способность.

Что касается альтернативных способов синтеза МАПП, то среди множества опубликованных работ, выделяются труды, посвященные поверхностной прививке МАН с использованием микроволновых технологий и применением нанореакторов.

Так, в работе [44] описан один из подходов, заключающийся в прямой прививке МАН на поверхность ПП-пленки с помощью микроволновой технологии с использованием ксилола в качестве агента набухания и N,N-диметилформамида в качестве поглощающего микроволновое излучение агента. В процессе прививки микроволновое облучение может сократить время реакции за счет ускорения разложения инициатора. Остаточные реагенты легко удаляются, поскольку они находятся только на поверхности модифицированной полипропиленовой пленки, а адгезионная прочность между модифицированной полипропиленовой пленкой и пленкой ПА6 увеличивается на порядок и составляет $9,8\text{ Н/15 мм}$ по сравнению с прочностью сцепления между необработанной полипропиленовой пленкой и пленкой ПА6.

Изучена микроволновая прививка МАН на поверхность пленок ПП с использованием воды вместо органических растворителей в качестве среды для уменьшения остатков МАН в ПП [45]. Микроволновое облучение сокращает время прививки за счет ускорения разложения инициатора. Добавление очень небольшого количества (2%) ксилола в воду приводит к набуханию поверхности пленок ПП толщиной около 12 мкм , в пределах

которой происходит прививка МАН. Адгезионная прочность двухслойной пленки на основе МАПП (влагозащитный слой) и полиамида 6 (кислородозащитный слой) достигает 13,3 Н/15 мм вместо 2,4 Н/15 мм для пленки на основе ПП и ПА6. Значительно меньшее количество маслорастворимого пероксида бензоила более эффективно в качестве инициатора для прививки МАН, чем водорастворимый персульфат аммония.

Полипропилен модифицировали малеиновым ангидридом методом гетерогенной твердофазной радикальной прививки, проводимой в реакторе псевдооживленной полимеризации [46]. Влияние морфологии ПП и различной концентрации инициатора (дибензоилпероксида, ДБП) на ход реакции и эффективность прививки оценивались с помощью инфракрасной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и анализа поверхности частиц (метод БЭТ). Согласно полученным результатам, ход реакции может сильно зависеть от ее условий и морфологии ПП. В отличие от реактивной модификации в расплаве, гетерогенная реакция демонстрирует меньшую степень β -расщепления, хотя степень превращения реакции ниже. Твердофазная прививка может быть использована в качестве альтернативного метода модификации неполярных поверхностей полярными мономерами в мягких условиях.

Для контроля деструкции полипропилена и увеличения степени прививки малеинового ангидрида Ши и его коллеги в 2006 г предложили использовать нанореакторы. В работе [47] предложен совершенно новый механизм реактивного процесса с участием нанореакторов в ходе обработки ПП малеиновым ангидридом. Образцы получали методом смешения в расплаве с использованием нанореакторов с различным соотношением органоглины и пероксида (о-ММТ:ДХП). Органический ММТ показал способность поглощать не более 16 мас. % ДХП, т. е. диффузионно-контролируемое высвобождение алкоксильного радикала не будет наблюдаться при соотношении о-ММТ:ДХП < 5:1. Присутствие о-ММТ, как правило, усиливает гомополимеризацию МА, что приводит к расходу инициатора и препятствует прививке янтарных групп к основной цепи ПП из-за увеличения стерических препятствий для образующихся олиго(МА), тем самым снижая деструкцию цепи ПП. Таким образом, использование нанореакторов способствует гомополимеризации МАН, а не прививке, как это было предложено ранее в литературе.

При прививке малеинового ангидрида к полипропилену существенно изменяются не только его эксплуатационные свойства, но и структура полимера. В особенности МАН способен воздействовать на кристаллическую структуру полипропилена и смесей на его основе.

Так, прививка МАН приводит к уменьшению размера кристаллов, менее упорядоченной ламеллярной структуре и более короткому длинному периоду [48]. Прививка способствует упорядочиванию ламеллярной упаковки ПП,

значительно снижает способность к кристаллизации МАПП из-за резкого снижения его молекулярной массы. В результате прививки ПП становится очень хрупким материалом с более низкой средней температурой плавления, чем у соответствующего немодифицированного ПП. Однако деструкции ПП из-за прививки МАН можно избежать в присутствии компонента ПЭ, т. е. путем одновременной прививки ПП и ПЭ в смеси ПЭВП/ПП. Привитая смесь ПЭВП/ПП демонстрирует значительно улучшенную совместимость, что приводит в целом к значительному улучшению механических свойств по сравнению с немодифицированной смесью.

В работе [49] сравниваются термодинамические параметры и поведение при кристаллизации ПП и его смесей с привитым МАН полипропиленом и полиэтиленом высокой плотности (ПЭВП). Добавление небольшого количества (ПП/ПЭ 1:1)-МАН (смесь ПП с привитым МАН и ПЭВП в соотношении 1:1) значительно повысило температуру кристаллизации системы. Метод малоуглового рентгеновского рассеяния (SAXS) подтвердил, что (ПП/ПЭ 1:1)-МАН снижает упорядоченность ламеллярной структуры смеси ПП по сравнению с непривитой МАН смесью ПП/ПЭ 1:1). Привитый МАН полиэтилен (ПЭМА) и привитый МАН полипропилен (МАПП) совместимы с рандом-сополимером ПП (ППР), что позволяет легко внедрять полиэтилен в фазовую область полипропилена и наоборот. Уточняя модификацию кристаллической структуры смесей ПЭ/ППР, данное исследование подчеркивает потенциал применения модификации ППР с помощью привитого МАН полимера.

Применение малеинизированного полипропилена

Традиционно малеинизированный полипропилен находит эффективное применение в качестве компатибилизатора для смесей на основе полипропилена, улучшая его совместимость с другими полиолефинами, а также натуральными высокомолекулярными соединениями и эластомерами.

Проведены эксперименты *in situ* SAXS/WAXS для исследования структурных изменений и роста кристаллов смесей ПП/ПЭ и вторичного ПП (ВПП), модифицированных малеиновым ангидридом (представленных как ВПП/ЭП55М), а также их немодифицированных аналогов (представленных как ВПП/ЭП55) в процессе одноосного растяжения и охлаждения [50]. Особое внимание было уделено влиянию МАН на образование пор при различных скоростях растяжения. Результаты показывают, что смесь ВПП/ЭП55 подвергается пластической деформации и образует микропоры в зоне текучести ПЭ. При дальнейшем растяжении в продольном направлении увеличивается длительный период за счет рекристаллизации, а ПЭ замедляет образование отверстий, вызванных разрывом цепи ПП. Однако из-за несовместимости между ПП и ПЭ межфазная адгезия была низкой, а прочность смесей ВПП/ЭП55

значительно снижалась по сравнению с ПП. Добавление МАН может повысить совместимость между ПП и ПЭ в смесях ВПП/ЭП55М, позволяя ПЭ проникать в зону обогащения ПП и способствуя превращению ПП-β в более стабильные α-кристаллы, что увеличивает прочность молекул ПЭ и дополнительно замедляет разрушение молекулярных цепей ПП.

В исследовании [51] оценивалось влияние связующего агента малеинового ангидрида на механические и термические свойства, а также долговременную стабильность переработанных пластиков на основе полиолефиновых смесей. Добавление МАН увеличило прочность при растяжении на 32 %. Кроме того, ПТР увеличился на 366 %, значительно улучшив технологичность. Результаты термогравиметрического анализа показали значительное улучшение термической стабильности, а модель прогнозирования срока службы оценила его увеличение на 533 % при 200 °С. Результаты демонстрируют, что связующий агент МАН эффективно подавляет деструкцию при высоких температурах. Таким образом, МАН может одновременно улучшать механические свойства и возможность вторичной переработки, предлагая эффективное решение для создания экологически чистых пластиков в рамках экономики замкнутого цикла.

Авторы [52] предлагают тройные смеси сополимера этилена и глицидилметакрилата, полипропилена, привитого малеиновым ангидридом, и полиэтилена низкой плотности с содержанием до 70 мас. %, компаундируемые при 170 °С. Ковалентные связи образуются в результате реакции между эпоксидными и карбоксильными группами, что приводит к образованию сополимера типа ПЭ-ПП, обладающего хорошей совместимостью с ПЭ. Образовавшийся *in situ* сополимер ПЭ-ПП останавливает ползучесть выше температуры плавления ПЭ, благодаря непрерывной сетчатой структуре, удерживаемой кристаллитами ПП. Возможность вторичной переработки подтверждается проведением процесса при 170 °С. Кроме того, исследованные составы обладают низкой электропроводностью постоянного тока $\sim 4 \times 10^{-14}$ См м⁻¹ при 70 °С и 30 кВ мм⁻¹, сопоставимой со значениями, измеренными для ПЭНП и СПЭ. Очевидно, что образование сополимера типа ПЭ-ПП *in situ* посредством реактивного компаундирования является перспективным подходом, который может позволить разрабатывать термопластичные изоляционные материалы для силовых кабелей.

Использование малеинового ангидрида в смесях полипропилена и полимолочной кислоты способно существенно повысить деформационно-прочностные показатели композитов.

Так, в работе исследуется влияние полипропилена, привитого малеиновым ангидридом, и нанопластинок графена (НПГ) на прочность при растяжении смесей полимолочной кислоты (ПМК) и ПП с различным массовым соотношением компонентов [53]. Смеси ПМК/ПП приготовлены в соотношении 70/30, 80/20 и 90/10 с добавлением

МАПП (от 1 до 5 массовых частей на 100 массовых частей полимера) и НПГ (от 1 до 3 м. ч. на 100 м. ч. полимера) с использованием литьевой машины. Прочность при растяжении анализировали на основе 11 экспериментов полного факторного плана. Результаты показали, что прочность смесей ПМК/ПП постепенно увеличивалась после добавления МАПП и НПГ. Установлена взаимосвязь между МАПП и НПГ, оказывающая положительное влияние на физико-механические свойства смесей ПМК/ПП. Оптимальная прочность при растяжении - 50 МПа достигнута при соотношении ПМК/ПП 90/10, 5 м. ч. МАПП и 3 м. ч. НПГ.

В качестве добавок для получения биоразлагаемых нетканых материалов методом смешивания в расплаве авторы выбрали малеиновый ангидрид и полипропилен, модифицированный малеиновым ангидридом [54]. Исследовано влияние добавок на прочностные и термические свойства, показатель текучести расплава и микроструктуру разработанных нетканых материалов. Кроме того, методом спанбондинга получены биоразлагаемые нетканые материалы ПМК/МАПП/ПП. Результаты показали, что ПТР нетканых материалов увеличивается с увеличением содержания добавки. Добавление МАН может снизить температуру стеклования (T_g) смесей и повысить температуру термического разложения, однако добавление МАПП привело к их повышению. На основании полученных результатов можно предположить, что механизм действия добавок, улучшающих характеристики образцов, включает реакцию прививки, раскрытия кольца и снижение поверхностного натяжения. Совместимость улучшается благодаря свойствам МАН и МАПП, причем эффект оказался лучше при использовании МАПП, поскольку МАН обладает стабильной кольцевой структурой и низкой долей прививки в образцах ПМК/МАН/ПП.

В исследовании [55] методом смешения в расплаве успешно получена полимолочная кислота, модифицированная эпоксициклическим льянным маслом (ЭЛМ) и полипропиленом, привитым малеиновым ангидридом, обладающая хорошим балансом прочности и жесткости. Добавление МАПП/ЭЛМ в соответствующих пропорциях (3:1, 5:1 и 5:5 мас. %) привело к получению модифицированных образцов ПМК со значительным улучшением пластичности (увеличение на 2200 % относительного удлинения при разрыве и на 1800 % - прочности при разрыве по сравнению с чистой ПМК) при незначительном снижении модуля Юнга. Эта объясняется улучшенными межфазными взаимодействиями и образованием сшитых структур на границе раздела фаз, что также увеличило вязкость расплавленной системы и температуру холодной кристаллизации ПМК. Сканирующая электронная микроскопия выявила наличие небольших доменов модифицированных систем. Эффективность реактивной компатибилизации между компонентами также была подтверждена спектроскопией Фурье-преобразования в инфракрасной области и анализом термической

деструкции. Сочетание прочности, модуля упругости и хороших тепловых свойств делает этот недорогой и экологически чистый продукт перспективным материалом для использования в качестве биоразлагаемого пластика в различных областях, включая промышленность медицинских изделий и упаковочных материалов.

В последние годы МАПП зарекомендовал себя эффективным компатибилизатором для повышения совместимости полипропилена с эластомерными материалами.

Предлагается использовать полипропилен, модифицированный малеиновым ангидридом, для улучшения межфазной совместимости между модифицированным ударопрочным полипропиленом (МПП) и термопластичным полиуретаном [56]. Для приготовления смесей МПП/ТПУ/МАН используется метод смешивания в расплаве и литья под давлением. Морфология смеси, прочностные характеристики при растяжении, изгибе и ударной прочности смесей оцениваются в зависимости от содержания ТПУ и МАН. Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, показывают положительное влияние использования МАН на совместимость между МПП и ТПУ, при этом всего 1 мас. % МАН эффективно снижает разницу в полярности и межфазном натяжении. При увеличении содержания ТПУ в смесях прочность при растяжении контрольной группы (немодифицированные смеси МПП/ТПУ) демонстрирует тенденцию к снижению. Напротив, смеси МПП80/ТПУ20/МАН3 имеют прочность 28 МПа и модуль Юнга 927 МПа, в то время как смеси МПП90/ТПУ10/МАН1 имеют оптимальное напряжение изгиба 54 МПа и модуль изгиба 1494 МПа. За исключением смесей МПП60/ТПУ40/МАН1, все остальные экспериментальные группы имеют более высокую ударную вязкость в результате использования 1 мас. % МАН. В частности, смеси МПП90/ТПУ10/МАН1 имеют максимальную ударную вязкость 105 Дж/м.

В исследовании [57] в качестве компатибилизатора использовался полипропилен, модифицированный малеиновым ангидридом, где термически гидролизованные ангидридные группы генерировали -COOH для образования водородных связей и компатибилизации *in situ*. Выбранная стратегия улучшила адгезию на границе раздела этиленпропилендиеновый мономер/полипропилен (СКЭПТ/ПП), одновременно улучшив низкотемпературные и механические свойства, оптимизировав тем самым эксплуатационные характеристики. При добавлении МАПП в количестве 5 м. ч. максимальная прочность при растяжении составила около 11 МПа, а материал прошел испытание на хрупкость при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, демонстрируя улучшение как механических свойств, так и низкотемпературных характеристик. Микроскопический морфологический анализ показал, что модификация МАПП может оптимизировать структуру и свойства термопластичного вулканизата (ТПВ), что привело к

образованию «взаимосвязанной и сонепрерывной» структурной морфологии между материалами. Структурное улучшение значительно повысило их совместимость, межфазную связь и прочность материалов.

Также исследовано влияние использованного в качестве компатибилизатора полипропилена, модифицированного малеиновым ангидридом, на морфологические, механические, термические и реологические свойства динамически вулканизированной смеси полипропилена и полибутадиенового каучука (ПП/СКД) [58]. Введение МАПП увеличило межфазную адгезию между матрицей ПП и частицами каучука, что привело к уменьшению их размеров и улучшению ударной вязкости, статических и динамических механических свойств. Присутствие МАПП в смеси привело к модификации кристаллической структуры матрицы ПП в присутствии каучука. Динамическая вулканизация увеличила межфазную адгезию, предотвратила укрупнение частиц каучука и улучшила механические свойства, о чем свидетельствует заметное (на 56 %) увеличение относительного удлинения при разрыве. Кроме того, динамическая вулканизация и развитие трехмерных сетей вулканизированного СКД в смеси снизили коэффициент механических потерь на 19 %. Одновременное использование компатибилизатора и динамической вулканизации привело к синергетическому эффекту и дальнейшему улучшению механических свойств образца, что подтверждается значительным увеличением относительного удлинения при разрыве на 70 % и увеличением прочности при растяжении на 31 %.

Стирол-этилен-бутилен-стирольный сополимер (СЭБС) с привитым малеиновым ангидридом и органомфильной монтмориллонитовой глиной смешивали в расплаве с полипропиленом в различной последовательности [59]. Добавление глины изменило морфологию смеси с крупных вытянутых доменов на каплеобразные. Нанокompозиты без малеинового ангидрида содержали глину в интеркалированной форме. В композиции, содержащей малеиновый ангидрид, глина эксфолирована в смеси, что указывает на то, что группы малеинового ангидрида способствовали усилению взаимодействия между ламеллами глины и полимерными цепями. Наилучший баланс механических свойств был достигнут в композиции, в которой глина сначала смешивалась в расплаве с СЭБС без малеинового ангидрида, а затем с глиной и ПП. В литературе сообщается, что нанокompозиты с эксфолированными структурами обладают лучшими механическими свойствами, чем нанокompозиты с интеркалированной структурой. Однако в данном исследовании обнаружена противоположная тенденция, которая может быть связана с большим количеством кристаллической фазы, образующейся в нанокompозитах с интеркалированной структурой, поскольку явление интеркаляции глины в полимерные цепи способствовало процессу кристаллизации полимера.

В статье [60] использована методология поверхности отклика (RSM) для одновременной оптимизации прочности при растяжении и ударной вязкости нанокompозитов полипропилен/бутадиен-нитрильный каучук (БНК)/галлузитовые нанотрубки (ГНТ)/полипропилен, модифицированный малеиновым ангидридом. Для планирования экспериментов в соответствии с планом Бокса-Бенкена использовались три уровня параметров материала, включая БНК (10, 20 и 30 мас. %), ГНТ (1, 3 и 5 мас. %) и ПП-модифицированный МАН (3, 9 и 15 мас. %) в качестве компатибилизатора. Для исследования морфологии образцов нанокompозита использовался сканирующий электронный микроскоп. Модель предсказала, что прочность при растяжении и ударная вязкость нанокompозита достигают пика при среднем и высоком содержании ГНТ. Также наблюдался пик при содержании БНК на графике ударной вязкости. Двустороннее взаимодействие всех параметров существенно влияло на оба показателя. На основе моделей RSM с использованием функции желательности были предсказаны оптимальные значения входных параметров, приводящие к оптимизированной прочности при растяжении и ударной вязкости, равные 17,87, 4,35 и 15 мас. % для БНК, ГНТ и МАПП соответственно. Эксперименты-подтверждения хорошо согласовались с предсказанными значениями.

Также, опубликованы немногочисленные результаты исследований по влиянию МАПП на совместимость в смесях полипропилен с поливинилиденфторидом [61], полиэтилентерефталатом [62] и полиамидом [63].

Полипропилен, привитый малеиновым ангидридом, использован как для улучшения совместимости смесей ПП/поливинилиденфторид (ПВДФ), так и для диспергирования включенных наночастиц в смесях ПП/ПВДФ [61]. При добавлении 40 мас. % BaTiO_3 и 0,75 мас. % графена прочность при растяжении увеличилась на 31 %, а модуль упругости при растяжении стал вдвое выше, чем у смесей ПП/ПВДФ без добавления МАПП. Более того, полимерные композиты также демонстрируют улучшенную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Точное значение составляет 11 и 0,08 при 103 Гц с 40 мас. % BaTiO_3 и 0,5 мас. % графена, или 16 и 0,11 с 40 мас. % BaTiO_3 и 0,75 мас. % графена. Селективное распределение BaTiO_3 в фазе ПП и расположение графена между границей раздела ПП и ПВДФ обеспечили улучшенные механические свойства и диэлектрическую проницаемость без значительного увеличения тангенса угла диэлектрических потерь, что открывает путь для включения неорганических наполнителей в полимерные смеси с уникальной морфологией распределения для создания высокоэффективных диэлектрических материалов.

Полипропилен, привитый малеиновым ангидридом и эпоксидной смолой на основе бисфенола А (МАППЭС), успешно получен одностадийным методом и охарактеризован методом

Фурье-преобразовательной инфракрасной спектроскопии [62]. Впоследствии его использовали в качестве компатибилизатора при изготовлении смесей полипропилена и полиэтилентерефталата методом экструзии расплава. Содержание дисперсной фазы ПЭТФ в композите варьировалось от 0 до 30 м. ч. Микроструктуру и морфологию композитов характеризовали с помощью сканирующей электронной микроскопии и рамановской спектроскопии. Добавление МАППЭС увеличило межфазное взаимодействие, улучшило совместимость и термическую стабильность системы. В присутствии компатибилизатора кристалличность матричной фазы ПП увеличилась, в то время как кристалличность дисперсной фазы ПЭТФ уменьшилась из-за эффекта гетерогенной нуклеации равномерно распределенного полиэтилентерефталата. Двойная прививка компатибилизатора МАППЭС значительно улучшила механические характеристики смесей ПП/ПЭТФ. Относительное удлинение при разрыве модифицированного образца превысило аналогичное значение для немодифицированных смесей на 118 %. Также значительно улучшились свойства при изгибе и ударная вязкость.

В работе [63] проводится количественная оценка реактивной компатибилизации полипропилена, привитого малеиновым ангидридом, на смесях полипропилена и полиамида 66 (ПП/ПА66) с использованием термореологических, микрооптических, спектроскопических методов и методов рентгеновского рассеяния. Общий состав всех смесей ПП (60 %)/ПА66 (30 %)/МАПП (10 %) поддерживается постоянным, при этом степень химической реакции систематически контролируется путем изменения последовательного добавления МАПП в расплавленную смесь. Первая подача МАПП проводится при 280 °С, вторая подача - при 200 °С. На первом этапе наблюдается более высокая химическая активность при добавлении МАПП до 4-6 %. Постоянный химический состав позволяет систематически сравнивать термические, реологические, морфологические и механические свойства в зависимости от содержания компатибилизатора. С увеличением степени межфазной реакции размер диспергированных доменов ПА66 уменьшается, что приводит к улучшению межфазной адгезии с матрицей ПП, повышению модуля Юнга и абсолютной прочности при разрыве изотропной матрицы.

Малеинизированный полипропилен зарекомендовал себя эффективным компатибилизатором не только смесей полимеров, но и модифицированного различными наполнителями полипропилена. В ряде опубликованных за последние годы работ показано значительное влияние МАПП на улучшение совместимости в полимерных композициях с различными волокнами [64-72] и древесно-полимерных композитах (ДПК) [73-75]

Для преодоления недостатков, связанных со свойствами волокон виноградных листьев (ВВЛ), и улучшения совместимости между ВВЛ и

полиэтиленом высокой плотности в качестве связующего агента был выбран полипропилен, привитый малеиновым ангидридом, существенно снизивший поверхностное натяжение между ВВЛ и ПЭВП и повысивший в результате адгезию волокна к полимерной матрице [64]. ВВЛ использовался в качестве армирующего наполнителя в различных концентрациях: 5, 10, 20 и 30 мас. %. Композиты ПЭ/ВВЛ с полипропиленом, привитым малеиновым ангидридом, или без него, получали с использованием двухшнекового экструдера.

Исследовано и проведено сравнение влияния трех образцов полипропилена, модифицированного малеиновым ангидридом, с различным содержанием МАН и степенью кристалличности на межфазную прочность на сдвиг (IFSS) полипропилена и углеродного волокна (УВ) с использованием микрокапельных тестов [65]. Значения IFSS показали незначительную зависимость от содержания МАН в МАПП. Экспериментально показана локализация МАПП на межфазной границе, что указывает на достаточные химические взаимодействия, включающие ковалентные и водородные связи на границе раздела, независимо от содержания МАН. Когда химические взаимодействия на границе раздела достаточны, значения IFSS объясняются кристалличностью на межфазной границе, которая зависит от кристалличности добавленного МАПП.

Изучалось влияние содержания МАПП на физические свойства композитов на основе ПП, содержащих длиноволокнистые углеродные волокна [66]. Подтверждено, что малеинизированный ПП действует как модификатор межфазной границы между УВ и ПП, и при добавлении соответствующего количества в 10 мас. % прочность при растяжении, модуль упругости при растяжении, ударная вязкость по Изоду и температура деформации при нагреве улучшаются на 110, 50, 87 и 13 % соответственно. С другой стороны, эффект смешивания МАПП, который является низкомолекулярным компонентом, был больше, чем эффект компатибилизации, когда содержание МАПП превышало соответствующее значение, что приводило к снижению физических свойств. Следовательно, содержание МАПП в качестве модификатора межфазной границы должно быть подобрано таким образом, чтобы оно было оптимальным с учетом содержания УВ, входящего в состав композитного материала, для оптимизации его физических свойств.

Предложена методика оценки эффекта компатибилизации полипропилена, модифицированного малеиновым ангидридом, введенного в полипропилен, армированный стекловолокном, путем исследования химической структуры с помощью ИК-Фурье микроскопии [67]. Состояние дисперсии МАПП в композитах исследовали с помощью ИК-Фурье-изображений, построенных с использованием интегрированной спектральной интенсивности, возникающей из карбонильных групп. МАПП преимущественно распределялся вокруг стекловолокон благодаря взаимодействию между карбонильными группами в

МАПП и поверхностными силанольными группами на волокнах. Влияние межфазных взаимодействий на адгезию матрицы к волокну в композите с волокнами было подтверждено наблюдением поверхности излома с помощью ИК-Фурье-изображений после испытания на растяжение. Обнаружено присутствие полимера на поверхности волокна, что показывает наличие когезионного разрушения в матричной части и объясняется улучшением межфазной адгезии. Таким образом, добавление МАПП необходимо для улучшения адгезии матрицы к наполнителю, что способствует повышению прочности и пластичности за счет эффективной передачи напряжений и предотвращения разрушения на границе раздела матрица-волокно. Предложенный метод может быть использован в качестве универсального инструмента для выявления механизмов компатибилизации полимерных композитов.

Изучена корреляция между микроструктурой и механическими свойствами полипропиленовых композитов, армированных целлюлозными нановолокнами (ЦНВ), содержащих в качестве компатибилизатора ПП, модифицированный малеиновым ангидридом [68]. Для анализа морфологии и дисперсности ЦНВ и МАПП в матрице ПП при различных условиях обработки использовали высокоэффективную просвечивающую электронную микроскопию. Выявлено, что в ПП/ЦНВ/МАПП-композитах с более низкими прочностными характеристиками МАПП образовывал агрегаты, которые чрезмерно концентрировались на некоторых микрофибриллах ЦНВ. Напротив, композиты ПП/ЦНВ/МАПП, демонстрирующие превосходные прочностные характеристики, содержали хорошо диспергированные микрофибриллы ЦНВ диаметром приблизительно 20 нм. Кроме того, общая дисперсность была значительно улучшена в композитах с высоким относительным удлинением при разрыве. Результаты показывают, что механические характеристики композитов ПП/ЦНВ/МАПП могут быть значительно улучшены за счет достижения высокой дисперсности ЦНВ и их взаимодействия с МАПП.

Гибридные композиты из полипропилена, армированные банановыми и кокосовыми волокнами, получали с использованием двухшнекового экструдера и литьевой машины [69]. Образцы готовили из необработанных и обработанных гибридных композитов с добавлением 4 и 8 % МАПП для повышения их совместимости с полипропиленовой матрицей. Использовались три варианта соотношения волокон банан/кокос: 15/5, 10/10 и 5/15 %. Исследовали механические характеристики (прочность при растяжении, изгибе и ударе) гибридных композитов. Образцы, армированные волокнами МАПП, показали лучшие механические свойства по сравнению с необработанными композитами. Прочностные свойства увеличивались с ростом концентрации связующего агента по сравнению с гибридными композитами МАПП без связующего агента. Полимерные композиты, армированные волокнами

банан/кокос, продемонстрировали более высокую прочность при растяжении, изгибе и ударе при 5 % содержании бананового волокна, 15 % кокосового волокна и 8 % МАПП по сравнению с 4 % МАПП и необработанными гибридными композитами. Также был проведен анализ водопоглощения и термогравиметрический анализ.

Смешением получены химически обработанные волокна (ХОВ) из отходов кукурузной соломы [70]. Экспериментальные результаты показывают, что после химической обработки часть лигнина в ХОВ была удалена, что привело к образованию гладкой поверхности, лучшей термической стабильности и более высокой степени кристалличности ХОВ. Кроме того, волокна использовали для создания композиций с полипропиленом. Добавление МАПП и силанового связующего агента (ССА) улучшило совместимость между ХОВ и ПП, и, следовательно, привело к росту механических характеристик композитов на их основе. В то же время прочность при растяжении ($54,9 \pm 5,4$ МПа), модуль Юнга (1950 ± 246 МПа), удельная прочность ($49,4 \pm 3,9$ МПа·г⁻¹·см³) и ударная вязкость ($3,6 \pm 0,3$ кДж/м²) композита ПП/ХОВ/МАПП/ССА (50/50/6/0,95) увеличились примерно на 51, 177, 20 и 113 % соответственно по сравнению с чистым полипропиленом.

Предлагается термопластичный препрег, армированный непрерывным стекловолокном (СВ), с использованием полипропилена, привитого малеиновым ангидридом в качестве матрицы [71]. Оптимизированы параметры компрессионного формирования и последовательность укладки слоев. При параметрах процесса 155 °С и 15 МПа достигаются максимальные значения прочности при растяжении и изгибе, а последовательность укладки слоев (0°/90°) обеспечивает сбалансированные механические характеристики. На основе разработанного материала изготовлены ламинаты МАПП/СВ/А1 с волокнисто-металлическим каркасом в двух конфигурациях укладки: 2/1 и 3/2. Результаты механических испытаний показали, что прочность при растяжении и изгибе в основном сохраняется на прежнем уровне, в то время как модуль упругости значительно увеличивается на 115 и 135 % в ламинатах с волокнисто-металлическим каркасом (ВМК) соотношением 2/1 и 3/2 соответственно по сравнению с контрольными образцами МАПП/СВ. Кроме того, значительные деформации при испытаниях на изгиб для многослойных композитов свидетельствуют о синергетическом эффекте МАПП/СВ и алюминиевого сплава, обусловленном прочной связью между металлическим слоем и термопластичной смолой. Оптическая микроструктура также показала, что межслойная адгезия между компонентами композита достаточно высока. Результаты данного исследования важны с точки зрения проектирования многослойных композитов, поскольку они отличаются более низкой стоимостью материала, меньшим временем обработки и массой, что потенциально позволяет использовать их в качестве конструктивных элементов в автомобильной промышленности.

Настоящее исследование [72] посвящено оценке механических и термических характеристик полипропиленовых композитов, армированных короткими базальтовыми волокнами (БВ), изготовленных методом смешения в расплаве. В качестве компатибилизатора композитов использовался малеиновый ангидрид в количестве 3 мас. %. Механические свойства композитов улучшались с увеличением содержания БВ от 10 до 40 мас. % с последующим снижением. Химическое взаимодействие между волокном и матрицей оценивалось с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Для определения температуры кристаллизации, температуры плавления и кристалличности композита использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Согласно динамическому механическому анализу, армирование ПП БВ улучшило демпфирующие свойства. Сканирующая электронная микроскопия выявила хорошее межфазное взаимодействие между волокном и матрицей, а рентгеновская дифракция была использована для изучения кристалличности композита.

Целью работы [73] являлось получение композитов из первичного и переработанного полипропилена, наполненных древесной мукой красного дерева (*Swietenia macrophylla*), и определение влияния полипропилена, модифицированного малеиновым ангидридом, на межфазную совместимость, плотность и физико-механические свойства полученных материалов. При получении композитов использовали 40 мас. % древесной муки красного дерева, 60 мас. % полипропилена, 3 мас. % МАПП, 1,5 мас. % стеарата цинка и 1,5 мас. % воска. Образцы для испытаний изготавливали методом экструзии и литья под давлением. Определены прочность на изгиб, при растяжении, ударе и твердость всех образцов. Сканирующая электронная микроскопия использовалась для изучения морфологии и межфазной совместимости наполнителя в разработанных композитах. Результаты испытаний показали, что использование МАПП и наполнителя влияет на плотность и деформационно-прочностные свойства образцов.

Изучено влияние компатибилизаторов на основе полипропилена с малеиновым ангидридом на физико-механические свойства композитов ПП/древесина [74]. Для получения гранул ПП 10 мас. % древесной муки смешивали с гранулами ПП, УФ-стабилизатором и МАПП различной концентрации (1, 3, 5 мас. %) в двухшнековом экструдере. Гранулы композита перерабатывали методом литья под давлением для получения образцов, испытываемых на растяжение. Для определения деструкции ПП под воздействием внешних факторов образцы для испытаний на растяжение подвергали воздействию окружающей среды в течение 0, 336 (14 дней) и 672 ч (28 дней) перед испытаниями. После указанного времени воздействия образцы подвергали механическим испытаниям на растяжение. Разработаны методики экспериментов и проведены

анализы, включая дисперсионный анализ ANOVA, регрессионное уравнение и прогностические тесты, для исследования влияния параметров на деформацию разрушения ДПК. Кроме того, в ходе исследования изучено влияние таких параметров как концентрация МАПП и время на деформацию разрушения композитов. На основании экспериментальных результатов установлено, что композиты, содержащие 1 мас. % МАПП, показали лучшую устойчивость к деструкции по сравнению с композитами, содержащими 3 и 5 мас. % МАПП.

В качестве связующего агента в композиты из древесины, муки/полипропилена/полифосфата аммония (огнестойкие ДПК) использован полипропилен, модифицированный малеиновым ангидридом [75]. Изучено влияние содержания МАПП (5, 10 и 15 мас. %) на физико-механические свойства и воспламеняемость огнестойких ДПК. Испытания на водостойкость показали, что добавление МАПП снижает гигроскопичность огнестойких ДПК. Механические свойства композита оценивались с помощью испытаний на трехточечный изгиб, ударную вязкость по Изоду без надреза и динамического механического анализа. Результаты показали, что огнестойкий ДПК, содержащий 10 мас. % МАПП, продемонстрировал наилучшую прочность при изгибе, высокую ударную вязкость, значение E' и $\tan \delta$ при комнатной температуре. Испытания на предельный кислородный индекс (LOI) и конусная калориметрия показали, что добавление 10 мас. % МАПП обеспечило огнестойкому древесно-полимерному композиту наивысшее значение LOI, наименьшую пиковую скорость выделения тепла, общее выделение тепла, весовое соотношение CO/CO_2 и общее выделение дыма. Более того, анализ остатков сгорания ДПК показал, что ДПК с 10 мас. % МАПП имел наиболее полную углеродную структуру с наивысшей степенью графитизации после сгорания. В целом, добавление 10 мас. % МАПП может придать огнестойкому ДПК оптимальные физико-механические свойства и огнестойкость.

В настоящее время активно развивается еще одна область применения малеинизированного полипропилена – полимерные диэлектрики. Данные материалы, обладающие такими уникальными преимуществами как высокой электрической прочностью на пробой и высокой мощностью накопления энергии, крайне важны для разработки передовых тонкопленочных конденсаторов. Полипропиленовая мембрана является наиболее распространенной полимерной мембраной, на долю которой приходится 70 % общего рынка продукции. Благодаря низким диэлектрическим потерям она обладает высокой эффективностью заряда-разряда (η). Однако ее изначально низкая диэлектрическая постоянная (2,2 при 1 кГц) серьезно препятствует увеличению плотности хранения энергии (1–2 Дж/см³).

В работе [76] получены нанокомпозитные пленочные конденсаторы с функционализированным малеиновым ангидридом полипропиленом в качестве матрицы и органическим Na⁺-ММТ (орг-ММТ) в качестве наномодификатора методом простого

смешивания в расплаве и горячего прессования. Полярность МАПП способствовала равномерному диспергированию орг-ММТ в нанокомпозитах. Добавление орг-ММТ не влияло на кристаллическую структуру МАПП, но уменьшало размер сферолитов из-за гетерогенной нуклеации орг-ММТ. По сравнению с обычным полипропиленом, полярный МАПП обладал значительно более высокой диэлектрической постоянной и аналогичными диэлектрическими потерями. Введение органического ММТ незначительно снизило диэлектрическую постоянную нанокомпозитов из-за ограничения движения цепей на границе раздела фаз в МАПП. С другой стороны, органический ММТ улучшил прочность на пробой нанокомпозитов за счет подавления развития электрических древовидных структур. Пленочный нанокомпозит МАПП с оптимизированным содержанием органического ММТ 0,4 мас. % обладал высокой прочностью на пробой 530 МВ/м и плотностью энергии разряда 5,21 Дж/см³. Исследование открывает новое направление в разработке тонкопленочных конденсаторов на основе ПП для применения в системах хранения энергии.

Получен тройной ПП-нанокомпозит методом смешивания в расплаве и сшивания методом прессования в матрице, что значительно улучшило емкостные свойства ПП-пленок [77]. Плотность энергии разряда (U_e) ПП-нанокомпозитных пленок увеличилась с 1,63 Дж/см³ до 4,11 Дж/см³ за счет добавления небольшого количества (1 мас. %) наночастиц нитрида бора (BNNS) в матрицу ПП. Благодаря использованию особой слоистой структуры, обеспечиваемой наночастицами BNNS, значительно повышается емкость накопления энергии в композите ПП/МАПП/BNNS.

Изучены морфология, состав и адгезионная прочность различных алюминиевых субстратов, обработанных хромом, с полипропиленом, модифицированным малеиновым ангидридом [78]. Покрытие из хрома в основном состоит из оксидов и гидроксидов металлов, а прочность межфазной адгезии повышается на 93 % благодаря обработке Cr(III). Влияние обработки хромом на кислотно-основные характеристики алюминия определялось путем измерения краевого угла смачивания. Результаты показывают, что обработка хромом повышает кислотность поверхности алюминия. Механизм связывания на границе раздела был изучен дополнительно. Так, для исследования реакции на границе раздела МАПП/Al фольга использовали технологию нанесения покрытия методом испарения для создания нанослоя МАПП на алюминиевой фольге. Морфология и толщина покрытия из МАПП на подложке проанализированы с помощью атомно-силовой микроскопии, а межфазная реакция была охарактеризована методом инфракрасной спектроскопии с ослабленным полным внутренним отражением и преобразованием Фурье. Механизм связывания на молекулярном уровне был дополнительно исследован с помощью квантово-химических расчетов на основе теории функционала плотности. Результаты теоретических расчетов

дополнительно указывают на то, что прочность межфазного взаимодействия между МАПП и оксидами и гидроксидами хрома сильнее, чем между МАПП и оксидами и гидроксидами алюминия.

Одностадийный метод смешивания в расплаве использован для получения нанокомпозитов на основе ПП с целью улучшения его характеристик накопления энергии [79]. Привитой малеиновым ангидридом полипропилен использовался в качестве полярного компатибилизатора для обеспечения равномерного распределения органического Na^+ -монтмориллонита (орг-ММТ) в матрице ПП. Кроме того, введение МАПП улучшило диэлектрическую постоянную нанокомпозитов ПП и увеличило количество ловушек заряда. Орг-ММТ повысил кристалличность и уменьшил размер кристаллов ПП. С другой стороны, слоистая структура орг-ММТ подавляла ветвление и рост электрических древовидных структур. Нанокомпозиты на основе ПП обладают относительно высокой диэлектрической постоянной 3,35 и чрезвычайно низкими диэлектрическими потерями 0,0012 при 1000 Гц. Нанокомпозит ПП/МАПП/орг-ММТ с оптимизированным содержанием орг-ММТ (0,2 мас. %) продемонстрировал плотность энергии разряда 5,2 Дж/см³ при электрическом поле 500 МВ/м с превосходной эффективностью заряда-разряда 93,5 %, что благоприятствует его применению в качестве материалов для пленочных конденсаторов.

Для повышения эффективности сепаратора на основе полипропилена применяли ПП, модифицированный малеиновым ангидридом, в различных концентрациях, а также коронное излучение для ионизации поверхности при различном времени модификации [80]. Определенные микроструктурные характеристики показали улучшение пористости сепаратора на 6-139 % при растяжении на 700-900 %, однако дальнейшее растяжение ухудшило механические свойства. Электростатические взаимодействия, образующиеся между электролитами и ангидридами, увеличили сорбционную способность электролитов в образцах и смачиваемость поверхности на 740 и 25 % соответственно. Результаты электрических испытаний показали, что присутствие ангидридов приводит к захвату электролитов в сепараторе и создает сопротивление диффузии ионов. Данное явление снизило сопротивление сепаратора с 475 до 165 Ом и увеличило емкость заряда и ионную проводимость с 585 до 871 мАч/г и с 0,29 до 0,34 С см⁻¹ соответственно, при этом содержание МАПП увеличилось с 20 до 60 мас. %. Полученные данные ИК-спектроскопии показали, что ионизация привела к образованию большего количества полярных групп в сепараторе литий-ионного аккумулятора, что увеличило объемную и поверхностную смачиваемость на 420 и 21 % соответственно, без каких-либо изменений в микроструктуре сепаратора. Однако увеличение времени облучения привело к разрушению поверхности образца и повреждению микроструктуры сепаратора, что привело к снижению пористости сепаратора, а также

количества абсорбированного электролита и ионной проводимости.

Заключение

Работа посвящена обзору современных научных публикаций, касающихся изучения влияния малеинового ангидрида на структуру полипропилена, смесей на его основе и других модифицированных объектов, разработки альтернативных методов его синтеза и областей применения.

Показано, что в последние годы наряду с традиционными методами синтеза малеинизированного полипропилена активно развиваются и альтернативные направления, которые в основном заключаются либо в модификации реакционной среды различными химическими соединениями, либо в поиске новых способов синтеза и аппаратного оформления. Среди множества опубликованных работ, выделяются труды, посвященные поверхностной прививке МАН с использованием микроволновых технологий и применением нанореакторов.

Перспективным способом улучшения условий синтеза и свойств получаемого продукта является поиск и усовершенствование инициаторов реакции и других активных добавок.

Также установлено, что при прививке малеинового ангидрида к полипропилену существенно изменяются не только его эксплуатационные свойства, но и структура полимера. В особенности МАН способен воздействовать на кристаллическую структуру полипропилена и смесей на его основе.

Традиционно малеинизированный полипропилен находит эффективное применение в качестве компатибилизатора для смесей на основе полипропилена, улучшая его совместимость с другими полиолефинами, а также натуральными высокомолекулярными соединениями и эластомерами.

Также, в ряде опубликованных за последние годы работ показано значительное влияние МАПП на улучшение совместимости в полимерных композициях с различными волокнами и древесно-полимерных композитах.

В настоящее время активно развивается еще одна область применения малеинизированного полипропилена – полимерные диэлектрики.

Исследование выполнено при в рамках Государственного задания № 075-00021-26-00 от 12.01.2026 (FZSG-2026-0003).

Литература

1. J. Karger-Kocsis, T. Barany, *Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites*. Springer International Publishing, Berlin/Heidelberg, 2019. 641 p. DOI: 10.1007/978-3-030-12903-3.
2. M.K. Naqvi, M.S. Choudhary, *Journal of Macromolecular Science. Part C: Polymer Reviews*, **36**, 3, 601-629 (1996). DOI: 10.1080/15321799608009648.

3. S.V. Tutov, K.B. Vernigorov, Kh.S. Abzal'Dinov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov, *Polymer Science, Series D*, **18**, 2, 351-360 (2025). DOI: 10.1134/S1995421225700182.
4. С.В. Тутов, К.Б. Вернигоров, Х.С. Абзальдинов, Ю.М. Казаков, О.В. Стоянов, *Вестник Технологического университета*, **27**, 6, 65-69 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_6_65.
5. А.Е. Заикин, С.В. Тутов, К.Б. Вернигоров, Ю.М. Казаков, О.В. Стоянов, *Вестник Технологического университета*, **27**, 7, 5-17 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_7_5.
6. А.Е. Заикин, А.Ф. Яруллин, К.Б. Вернигоров, С.В. Тутов, В.И. Машуков, Ю.М. Казаков, О.В. Стоянов, *Вестник Технологического университета*, **28**, 7, 47-51 (2025). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_7_47.
7. A. Galia, R. De Gregorio, G. Spadaro, O. Scialdone, G. Filardo, *Macromolecules*, **37**, 12, 4580-4589 (2004).
8. G.R. Henry, X. Drooghaag, D.D. Rousseaux, M. Sclavons, J. Devaux, J. Marchand-Brynaert, V. Carlier, *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, **46**, 9, 2936-2947 (2008). DOI: 10.1002/pola.22628.
9. T. Liu, G.-H. Hu, G.-S. Tong, L. Zhao, G.-P. Cao, W.-K. Yuan, *Industrial and Engineering Chemical Research*, **44**, 12, 4292-4299 (2005). DOI: 10.1021/ie0501428.
10. D. Li, B. Han, Z. Liu, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **202**, 11, 2187-2194 (2001). DOI: 10.1002/1521-3935(20010701)202:113.0.CO;2-G.
11. F. Berzin, J.-J. Flat, B. Vergnes, *Journal of Polymer Engineering*, **33**, 8, 673-682 (2013). DOI: 10.1515/polyeng-2013-0130.
12. A. Oromiehie, H. Ebadi-Dehaghani, S. Mirbagheri, *International Journal of Chemical Engineering and Application*, **5**, 2, 117-122 (2014). DOI: 10.7763/IJCEA.2014.V5.363.
13. S.N. Sathe, G.S. Rao, S. Devi, *Journal of Applied Polymer Science*, **53**, 2, 239-245 (1994). DOI: 10.1002/app.1994.070530212.
14. C. Tzoganakis, *Advances in Polymer Technology*, **9**, 321-330 (1989). DOI: 10.1002/adv.1989.060090406.
15. H. Tang, W. Dai, B. Chen, *Polymer Engineering and Science*, **48**, 7, 1339-1344 (2008). DOI: 10.1002/pen.21105.
16. P.A.R. Munoz, S.H.P. Bettini, *Journal of Applied Polymer Science*, **133**, 1-9 (2016). DOI: 10.1002/app.44134.
17. O.P. Grigoryeva, J. Karger-Kocsis, *European Polymer Journal*, **36**, 7, 1419-1429 (2000). DOI: 10.1016/S0014-3057(99)00205-0.
18. B. De Roover, M. Sclavons, V. Carlier, J. Devaux, R. Legras, A. Momtaz, *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, **33**, 5, 829-842 (1995). DOI: 10.1002/pola.1995.080330509.
19. Y. Seo, J. Kim, K.U. Kim, Y.C. Kim, *Polymer*, **41**, 7, 2639-2646 (2000). DOI: 10.1016/S0032-3861(99)00425-5.
20. D.P. Harper, G.L. Marie-Pierre, M.P. Wolcott, *Journal of Applied Polymer Science*, **111**, 2, 753-758 (2009). DOI: 10.1002/app.29100.
21. A. Menyhard, G. Faludi, J. Varga, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **93**, 937-945 (2008). DOI: 10.1007/s10973-007-8569-7.
22. L. Jingru, L. Jiayi, *Polymer Bulletin*, **76**, 9, 4369-4387 (2019). DOI: 10.1007/s00289-018-2609-2.
23. J. Balart, V. Fombuena, J.M. Espana, L. Sanchez-Nacher, R. Balart, *Materials and Design*, **33**, 1-10 (2012). DOI: 10.1016/j.matdes.2011.06.069.
24. F. Kucera, J. Petrus, R. Balkova, J. Jancar, *Polymer Engineering and Science*, **60**, 5, 1076-1082 (2020). DOI: 10.1002/pen.25363.
25. Z.Y. Lian, Y.Y. Xu, J. Zuo, H. Qian, Z.W. Luo, W.J. Wei, *Polymers*, **12**, 9, Article 2157 (2020). DOI: 10.3390/polym12092157.
26. F. Lopez-Saucedo, C. Alvarez-Lorenzo, A. Concheiro, E. Bucio, *Radiation Physics and Chemistry*, **132**, 1-7 (2017). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.11.006.
27. Q. Shao, W.B. Song, *Petrochemical Technology*, **46**, 1428-1433 (2017).
28. Z.W. Luo, H.N. Chen, J.J. Xu, M.L. Guo, Z.Y. Lian, W.J. Wei, B.H. Zhang, *Journal of Applied Polymer Science*, **135**, 17, Article 46171 (2018). DOI: 10.1002/app.46171.
29. C. Burgstaller, T. Hofberger, B. Gallnbock-Wagner, W. Stadlbauer, *Polymer Engineering and Science*, **61**, 1, 39-54 (2021). DOI: 10.1002/pen.25553.
30. Y.W. Ouyang, M. Mauri, A.M. Pourrahimi, I. Ostergren, A. Lund, T. Gkourmpis, O. Prieto, X.D. Xu, P.O. Hagstrand, C. Muller, *ACS Applied Polymer Materials*, **2**, 2389-2396 (2020). DOI: 10.1021/acsapm.0c00320.
31. C. Kock, M. Gahleitner, A.M. Schausberger, E. Ingolic, *Journal of Applied Polymer Science*, **128**, 1484-1496 (2013). DOI: 10.1002/app.38289.
32. M.K. Bilici, *Journal of Elastomers and Plastics*, **53**, 7, 922-940 (2021). DOI: 10.1177/00952443211001526.
33. H. Gao, Y. Xie, R. Ou, Q. Wang, *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, **43**, 1, 150-157 (2012). DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.10.001.
34. D.G. Dikobe, A.S. Luyt, *Express Polymer Letters*, **4**, 11, 729-741 (2010). DOI: 10.3144/expresspolymlett.2010.88
35. M. Kannan, S.S. Bhagawan, S. Thomas, K. Joseph, *Polymer Composites*, **35**, 9, 1671-1682 (2014). DOI: 10.1002/pc.22820.
36. N. Aranburu, J.I. Eguiazabal, *International Journal of Polymer Science*, **2015**, Article 742540 (2015). DOI: 10.1155/2015/742540.
37. A. Tariq, N.M. Ahmad, M.A. Abbas, M.F. Shakir, Z. Khaliq, S. Rafiq, Z. Ali, A. Elaissari, *Polymers*, **13**, 4, Article 495 (2021). DOI: 10.3390/polym13040495.
38. J.M. Sandoval, M.D. Failla, L.M. Quinzani, *Polymer Composites*, **45**, 5, 4636-4649 (2024). DOI: 10.1002/pc.28086.
39. H.N. Maroofy, M.-J. Hafezi, *Journal of Polymer Research*, **31**, Article 243 (2024). DOI: 10.1007/s10965-024-04062-9.
40. X. Yang, H. Zhao, Ch. Li, X. Zhao, J. Yang, X. Wang, *ACS Applied Polymer Materials*, **5**, 1, 247-258 (2023). DOI: 10.1021/acsapm.2c01476.
41. I.P. Kay, J.M. Goddard, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 41, Article e56085 (2024). DOI: 10.1002/app.56085.
42. M. Korcuskova, J. Petrus, P. Lepcio, F. Kucera, J. Jancar, *Polymer*, **238**, Article 124398 (2022). DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124398.
43. L. Liu, H. Wang, X. Liu, L. Pang, H. Shi, *Journal of Energy Storage. Part A*, **97**, Article 112845 (2024). DOI: 10.1016/j.est.2024.112845.
44. W. Jiang, L. Feng, X. Gu, J. Duan, C. Zhang, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **60**, 17556-17563 (2021). DOI: 10.1021/acs.iecr.1c03701.
45. W.-X. Jiang, J.-T. Duan, L.-F. Feng, X.-P. Gu, C.-L. Zhang, G.-H. Hu, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **190**, Article 109428 (2023). DOI: 10.1016/j.cep.2023.109428.
46. F. Kucera, J. Petrus, R. Balkova, J. Jancar, *Polymer Engineering and Science*, **60**, 5, 1076-1082 (2020). DOI: 10.1002/pen.25363.
47. P.A.R. Munoz, S.V. Canevarolo, S.H.P. Bettini, *Chemical Engineering Science*, **230**, Article 116229 (2021). DOI: 10.1016/j.ces.2020.116229.
48. Y. Wang, Y. Shi, W. Shao, Y. Ren, W. Dong, F. Zhang, L.-Zh. Liu, *Polymers*, **12**, 3, Article 675 (2020). DOI: 10.3390/polym12030675.
49. W. Shao, L. Liu, Y. Wang, X. Hua, F. Zhang, Y. Shi, *Journal of Polymer Research*, **29**, Article 354 (2022). DOI: 10.1007/s10965-022-03211-2.

50. W. Shao, L. Liu, Y. Wang, Y. Cui, Y. Wang, L. Song, Y. Shi, *Iranian Polymer Journal*, **32**, 12, 1595-1606 (2023). DOI: 10.1007/s13726-023-01226-0.
51. S. Choi, S. Jang, G. Do, P.C. Lee, D. Choi, *Scientific Reports*, **16**, 1234 (2026). DOI: 10.1038/s41598-025-30883-9.
52. Y. Ouyang, M. Mauri, A.M. Pourrahimi, I. Ostergren, A. Lund, T. Gkourmpis, O. Prieto, X. Xu, P.-O. Hagstrand, Ch. Muller, *ACS Applied Polymer Materials*, **2**, 6, 2389-2396 (2020). DOI: 10.1021/acsapm.0c00320.
53. F. Hafidzah, M. Bijarimi, W. Alhadadi, S. Salleh, M. Norazmi, E. Normaya, *Indonesian Journal of Chemistry*, **21**, 1, 234-242 (2021). DOI: 10.22146/ijc.54036
54. X. Li, Q. Yang, K. Zhang, L. Pan, Y. Feng, Y. Jia, N. Xu, *Journal of Cleaner Production*, **375**, Article 134097 (2022). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134097.
55. E. Cordeiro, A.A.P. Gabino, R.R. Henriques, B.G. Soares, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 25, Article e55533 (2024). DOI: 10.1002/app.55533.
56. T.A. Lin, M.-Ch. Lin, J.-Y. Lin, J.-H. Lin, Y.-Ch. Chuang, Ch.-W. Lou, *Journal of Polymer Research*, **27**, Article 34 (2020). DOI: 10.1007/s10965-019-1974-3.
57. R. Li, X. Zhang, Y. Hou, R. Wang, J. Han, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **31**, 6, 1354-1365 (2025). DOI: 10.1002/vnl.22225.
58. F. Shafaattalab, A. Jalali-Arani, *Journal of Applied Polymer Science*, **142**, 24, Article e57006 (2025). DOI: 10.1002/app.57006.
59. T.N. Lima, Th.C.P. de Macedo, M.M. Ueki, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **35**, 4, 451-466 (2022). DOI: 10.1177/0892705719889997.
60. A. Bakhtiari, F.A. Ghasemi, Gh. Naderi, M.R. Nakhaei, *Polymer Composites*, **41**, 6, 2330-2343 (2020). DOI: 10.1002/pc.25541.
61. Ch. Li, X. Hou, M. Zhang, J. Wang, J. Yu, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, **33**, 25991-26004 (2022). DOI: 10.1007/s10854-022-09289-0.
62. M. Xu, J. Liao, Zh. Luo, R. He, Sh. Yang, H. Li, Y. Yang, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 42, Article e56117 (2024). DOI: 10.1002/app.56117.
63. J. Seo, L.T. Kearney, S. Datta, M.D. Toomey, J.K. Keum, A.K. Naskar, *Polymer Engineering and Science*, **62**, 8, 2419-2434 (2022). DOI: 10.1002/pen.26016.
64. D. Hammami, M. Khlif, F. Tounsi, Ch. Bradai, *Biomass Conversion and Biorefinery*, **14**, 15251-15263 (2024). DOI: 10.1007/s13399-023-03963-x.
65. A. Yamaguchi, M. Urushisaki, H. Uematsu, T. Sakaguchi, T. Hashimoto, *Polymer Journal*, **55**, 153-161 (2023). DOI: 10.1038/s41428-022-00733-w.
66. J.-U. Jang, S.J. Youn, S.Y. Kim, M. Park, *Functional Composites and Structures*, **2**, 4, Article 045008 (2020). DOI: 10.1088/2631-6331/abd374.
67. R. Watanabe, A. Sugahara, H. Hagihara, J. Mizukado, H. Shinzawa, *Composites Science and Technology*, **199**, Article 108379 (2020). DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108379.
68. N. Kamiuchi, Y. Hikima, M. Koshino, K. Sakakibara, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **200**, Article 109317 (2026). DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.109317.
69. G. Bujjibabu, V.C. Das, M. Ramakrishna, K. Nagarjuna, *Nano Hybrids and Composites*, **32**, 85-97 (2021). DOI: 10.4028/www.scientific.net/NHC.32.85.
70. J. Ge, J. Zhang, Y. Gao, J. Jin, W. Jiang, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 14, Article e55202 (2024). DOI: 10.1002/app.55202.
71. J. Xing, Sh. Liu, Sh. Gao, Sh. Qu, L. Sang, *Polymer Composites*, **43**, 9, 6180-6190 (2022). DOI: 10.1002/pc.26922.
72. Ch. Poornima, M.U. Shivanna, S. Sathyanarayana, *Polymer Composites*, **44**, 1, 57-68 (2023). DOI: 10.1002/pc.27026.
73. V. Cavus, *BioResources*, **15**, 2, 2227-2236 (2020). DOI: 10.15376/biores.15.2.2227-2236.
74. M. Baig, B. Almeshari, A. Aabid, H. Junaedi, A. Almajid, *Heliyon*, **10**, 9, Article e30510 (2024). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30510.
75. W. Wang, H. Chen, J. Li, *Fibers and Polymers*, **22**, 4, 1137-1144 (2021). DOI: 10.1007/s12221-021-0202-z.
76. J. Hu, X. Zhao, J. Xie, Y. Liu, Sh. Sun, *Journal of Polymer Research*, **29**, Article 182 (2022). DOI: 10.1007/s10965-022-03047-w.
77. C. Wang, Zh. Xing, Sh. Yan, L. Shi, Ch. Hao, Q. Lei, *Materials Research Bulletin*, **155**, Article 111978 (2022). DOI: 10.1016/j.materresbull.2022.111978.
78. J. Xu, Sh. Xu, J. Hao, H. Cao, H. Miao, *Materials Today Communications*, **38**, Article 107958 (2024). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107958.
79. J. Hu, X. Zhao, J. Xie, Y. Liu, Sh. Sun, *Journal of Applied Polymer Science*, **139**, 17, Article 52047 (2022). DOI: 10.1002/app.52047.
80. Z. Azizi, M. Fasihi, S. Rasouli, *Electrochimica Acta*, **507**, Article 145184 (2024). DOI: 10.1016/j.electacta.2024.145184.

References

- J. Karger-Kocsis, T. Barany, *Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites*. Springer International Publishing, Berlin/Heidelberg, 2019. 641 p. DOI: 10.1007/978-3-030-12903-3.
- M.K. Naqvi, M.S. Choudhary, *Journal of Macromolecular Science. Part C: Polymer Reviews*, **36**, 3, 601-629 (1996). DOI: 10.1080/15321799608009648.
- S.V. Tutov, K.B. Vernigorov, Kh.S. Abzal'Dinov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov, *Polymer Science, Series D*, **18**, 2, 351-360 (2025). DOI: 10.1134/S1995421225700182.
- C.W. Tutov, K.B. Vernigorov, Kh.S. Abzal'dinov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov, *Herald of Technological University*, **27**, 6, 65-69 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_6_65.
- A.E. Zaikin, S.V. Tutov, K.B. Vernigorov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov, *Herald of Technological University*, **27**, 7, 5-17 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_7_5.
- A.E. Zaikin, A.F. Yarullin, K.B. Vernigorov, S.V. Tutov, V.I. Mashukov, Yu.M. Kazakov, O.V. Stoyanov, *Herald of Technological University*, **28**, 7, 47-51 (2025). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_7_47.
- A. Galia, R. De Gregorio, G. Spadaro, O. Scialdone, G. Filardo, *Macromolecules*, **37**, 12, 4580-4589 (2004).
- G.R. Henry, X. Drooghaag, D.D. Rousseaux, M. Sclavons, J. Devaux, J. Marchand-Brynaert, V. Carlier, *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, **46**, 9, 2936-2947 (2008). DOI: 10.1002/pola.22628.
- T. Liu, G.-H. Hu, G.-S. Tong, L. Zhao, G.-P. Cao, W.-K. Yuan, *Industrial and Engineering Chemical Research*, **44**, 12, 4292-4299 (2005). DOI: 10.1021/ie0501428.
- D. Li, B. Han, Z. Liu, *Macromolecular Chemistry and Physics*, **202**, 11, 2187-2194 (2001). DOI: 10.1002/1521-3935(20010701)202:113.0.CO;2-G.
- F. Berzin, J.-J. Flat, B. Vergnes, *Journal of Polymer Engineering*, **33**, 8, 673-682 (2013). DOI: 10.1515/polyeng-2013-0130.
- A. Oromiehie, H. Ebadi-Dehaghani, S. Mirbagheri, *International Journal of Chemical Engineering and Application*, **5**, 2, 117-122 (2014). DOI: 10.7763/IJCEA.2014.V5.363.
- S.N. Sathe, G.S. Rao, S. Devi, *Journal of Applied Polymer Science*, **53**, 2, 239-245 (1994). DOI: 10.1002/app.1994.070530212.

14. C. Tzoganakis, *Advances in Polymer Technology*, **9**, 321-330 (1989). DOI: 10.1002/adv.1989.060090406.
15. H. Tang, W. Dai, B. Chen, *Polymer Engineering and Science*, **48**, 7, 1339-1344 (2008). DOI: 10.1002/pen.21105.
16. P.A.R. Munoz, S.H.P. Bettini, *Journal of Applied Polymer Science*, **133**, 1-9 (2016). DOI: 10.1002/app.44134.
17. O.P. Grigoryeva, J. Karger-Kocsis, *European Polymer Journal*, **36**, 7, 1419-1429 (2000). DOI: 10.1016/S0014-3057(99)00205-0.
18. B. De Roover, M. Sclavons, V. Carlier, J. Devaux, R. Legras, A. Momtaz, *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, **33**, 5, 829-842 (1995). DOI: 10.1002/pola.1995.080330509.
19. Y. Seo, J. Kim, K.U. Kim, Y.C. Kim, *Polymer*, **41**, 7, 2639-2646 (2000). DOI: 10.1016/S0032-3861(99)00425-5.
20. D.P. Harper, G.L. Marie-Pierre, M.P. Wolcott, *Journal of Applied Polymer Science*, **111**, 2, 753-758 (2009). DOI: 10.1002/app.29100.
21. A. Menyhard, G. Faludi, J. Varga, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **93**, 937-945 (2008). DOI: 10.1007/s10973-007-8569-7.
22. L. Jingru, L. Jiayi, *Polymer Bulletin*, **76**, 9, 4369-4387 (2019). DOI: 10.1007/s00289-018-2609-2.
23. J. Balart, V. Fombuena, J.M. Espana, L. Sanchez-Nacher, R. Balart, *Materials and Design*, **33**, 1-10 (2012). DOI: 10.1016/j.matdes.2011.06.069.
24. F. Kucera, J. Petrus, R. Balkova, J. Jancar, *Polymer Engineering and Science*, **60**, 5, 1076-1082 (2020). DOI: 10.1002/pen.25363.
25. Z.Y. Lian, Y.Y. Xu, J. Zuo, H. Qian, Z.W. Luo, W.J. Wei, *Polymers*, **12**, 9, Article 2157 (2020). DOI: 10.3390/polym12092157.
26. F. Lopez-Saucedo, C. Alvarez-Lorenzo, A. Concheiro, E. Bucio, *Radiation Physics and Chemistry*, **132**, 1-7 (2017). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.11.006.
27. Q. Shao, W.B. Song, *Petrochemical Technology*, **46**, 1428-1433 (2017).
28. Z.W. Luo, H.N. Chen, J.J. Xu, M.L. Guo, Z.Y. Lian, W.J. Wei, B.H. Zhang, *Journal of Applied Polymer Science*, **135**, 17, Article 46171 (2018). DOI: 10.1002/app.46171.
29. C. Burgstaller, T. Hofberger, B. Gallnbock-Wagner, W. Stadlbauer, *Polymer Engineering and Science*, **61**, 1, 39-54 (2021). DOI: 10.1002/pen.25553.
30. Y.W. Ouyang, M. Mauri, A.M. Pourrahimi, I. Ostergren, A. Lund, T. Gkourmpis, O. Prieto, X.D. Xu, P.O. Hagstrand, C. Muller, *ACS Applied Polymer Materials*, **2**, 2389-2396 (2020). DOI: 10.1021/acspapm.0c00320.
31. C. Kock, M. Gahleitner, A.M. Schausberger, E. Ingolic, *Journal of Applied Polymer Science*, **128**, 1484-1496 (2013). DOI: 10.1002/app.38289.
32. M.K. Bilici, *Journal of Elastomers and Plastics*, **53**, 7, 922-940 (2021). DOI: 10.1177/00952443211001526.
33. H. Gao, Y. Xie, R. Ou, Q. Wang, *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, **43**, 1, 150-157 (2012). DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.10.001.
34. D.G. Dikobe, A.S. Luyt, *Express Polymer Letters*, **4**, 11, 729-741 (2010). DOI: 10.3144/expresspolymlett.2010.88
35. M. Kannan, S.S. Bhagawan, S. Thomas, K. Joseph, *Polymer Composites*, **35**, 9, 1671-1682 (2014). DOI: 10.1002/pc.22820.
36. N. Aranburu, J.I. Eguiazabal, *International Journal of Polymer Science*, **2015**, Article 742540 (2015). DOI: 10.1155/2015/742540.
37. A. Tariq, N.M. Ahmad, M.A. Abbas, M.F. Shakir, Z. Khaliq, S. Rafiq, Z. Ali, A. Elaissari, *Polymers*, **13**, 4, Article 495 (2021). DOI: 10.3390/polym13040495.
38. J.M. Sandoval, M.D. Failla, L.M. Quinzani, *Polymer Composites*, **45**, 5, 4636-4649 (2024). DOI: 10.1002/pc.28086.
39. H.N. Maroofy, M. - J. Hafezi, *Journal of Polymer Research*, **31**, Article 243 (2024). DOI: 10.1007/s10965-024-04062-9.
40. X. Yang, H. Zhao, Ch. Li, X. Zhao, J. Yang, X. Wang, *ACS Applied Polymer Materials*, **5**, 1, 247-258 (2023). DOI: 10.1021/acspapm.2c01476.
41. I.P. Kay, J.M. Goddard, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 41, Article e56085 (2024). DOI: 10.1002/app.56085.
42. M. Korcuskova, J. Petrus, P. Lepcio, F. Kucera, J. Jancar, *Polymer*, **238**, Article 124398 (2022). DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124398.
43. L. Liu, H. Wang, X. Liu, L. Pang, H. Shi, *Journal of Energy Storage. Part A*, **97**, Article 112845 (2024). DOI: 10.1016/j.est.2024.112845.
44. W. Jiang, L. Feng, X. Gu, J. Duan, C. Zhang, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **60**, 17556-17563 (2021). DOI: 10.1021/acs.iecr.1c03701.
45. W.-X. Jiang, J.-T. Duan, L.-F. Feng, X.-P. Gu, C.-L. Zhang, G.-H. Hu, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **190**, Article 109428 (2023). DOI: 10.1016/j.cep.2023.109428.
46. F. Kucera, J. Petrus, R. Balkova, J. Jancar, *Polymer Engineering and Science*, **60**, 5, 1076-1082 (2020). DOI: 10.1002/pen.25363.
47. P.A.R. Munoz, S.V. Canevarolo, S.H.P. Bettini, *Chemical Engineering Science*, **230**, Article 116229 (2021). DOI: 10.1016/j.ces.2020.116229.
48. Y. Wang, Y. Shi, W. Shao, Y. Ren, W. Dong, F. Zhang, L.-Zh. Liu, *Polymers*, **12**, 3, Article 675 (2020). DOI: 10.3390/polym12030675.
49. W. Shao, L. Liu, Y. Wang, X. Hua, F. Zhang, Y. Shi, *Journal of Polymer Research*, **29**, Article 354 (2022). DOI: 10.1007/s10965-022-03211-2.
50. W. Shao, L. Liu, Y. Wang, Y. Cui, Y. Wang, L. Song, Y. Shi, *Iranian Polymer Journal*, **32**, 12, 1595-1606 (2023). DOI: 10.1007/s13726-023-01226-0.
51. S. Choi, S. Jang, G. Do, P.C. Lee, D. Choi, *Scientific Reports*, **16**, 1234 (2026). DOI: 10.1038/s41598-025-30883-9.
52. Y. Ouyang, M. Mauri, A.M. Pourrahimi, I. Ostergren, A. Lund, T. Gkourmpis, O. Prieto, X. Xu, P.-O. Hagstrand, Ch. Muller, *ACS Applied Polymer Materials*, **2**, 6, 2389-2396 (2020). DOI: 10.1021/acspapm.0c00320.
53. F. Hafidzah, M. Bijarimi, W. Alhadadi, S. Salleh, M. Norazmi, E. Normaya, *Indonesian Journal of Chemistry*, **21**, 1, 234-242 (2021). DOI: 10.22146/ijc.54036
54. X. Li, Q. Yang, K. Zhang, L. Pan, Y. Feng, Y. Jia, N. Xu, *Journal of Cleaner Production*, **375**, Article 134097 (2022). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134097.
55. E. Cordeiro, A.A.P. Gabino, R.R. Henriques, B.G. Soares, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 25, Article e55533 (2024). DOI: 10.1002/app.55533.
56. T.A. Lin, M.-Ch. Lin, J.-Y. Lin, J.-H. Lin, Y.-Ch. Chuang, Ch.-W. Lou, *Journal of Polymer Research*, **27**, Article 34 (2020). DOI: 10.1007/s10965-019-1974-3.
57. R. Li, X. Zhang, Y. Hou, R. Wang, J. Han, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **31**, 6, 1354-1365 (2025). DOI: 10.1002/vnl.22225.
58. F. Shafaattalab, A. Jalali-Arani, *Journal of Applied Polymer Science*, **142**, 24, Article e57006 (2025). DOI: 10.1002/app.57006.
59. T.N. Lima, Th.C.P. de Macedo, M.M. Ueki, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **35**, 4, 451-466 (2022). DOI: 10.1177/0892705719889997.
60. A. Bakhtiari, F.A. Ghasemi, Gh. Naderi, M.R. Nakhaei, *Polymer Composites*, **41**, 6, 2330-2343 (2020). DOI: 10.1002/pc.25541.
61. Ch. Li, X. Hou, M. Zhang, J. Wang, J. Yu, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, **33**, 25991-26004 (2022). DOI: 10.1007/s10854-022-09289-0.

62. M. Xu, J. Liao, Zh. Luo, R. He, Sh. Yang, H. Li, Y. Yang, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 42, Article e56117 (2024). DOI: 10.1002/app.56117.
63. J. Seo, L.T. Kearney, S. Datta, M.D. Toomey, J.K. Keum, A.K. Naskar, *Polymer Engineering and Science*, **62**, 8, 2419-2434 (2022). DOI: 10.1002/pen.26016.
64. D. Hammami, M. Khlif, F. Tounsi, Ch. Bradai, *Biomass Conversion and Biorefinery*, **14**, 15251-15263 (2024). DOI: 10.1007/s13399-023-03963-x.
65. A. Yamaguchi, M. Urushisaki, H. Uematsu, T. Sakaguchi, T. Hashimoto, *Polymer Journal*, **55**, 153-161 (2023). DOI: 10.1038/s41428-022-00733-w.
66. J.-U. Jang, S.J. Youn, S.Y. Kim, M. Park, *Functional Composites and Structures*, **2**, 4, Article 045008 (2020). DOI: 10.1088/2631-6331/abd374.
67. R. Watanabe, A. Sugahara, H. Hagihara, J. Mizukado, H. Shinzawa, *Composites Science and Technology*, **199**, Article 108379 (2020). DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108379.
68. N. Kamiuchi, Y. Hikima, M. Koshino, K. Sakakibara, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **200**, Article 109317 (2026). DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.109317.
69. G. Bujjibabu, V.C. Das, M. Ramakrishna, K. Nagarjuna, *Nano Hybrids and Composites*, **32**, 85-97 (2021). DOI: 10.4028/www.scientific.net/NHC.32.85.
70. J. Ge, J. Zhang, Y. Gao, J. Jin, W. Jiang, *Journal of Applied Polymer Science*, **141**, 14, Article e55202 (2024). DOI: 10.1002/app.55202.
71. J. Xing, Sh. Liu, Sh. Gao, Sh. Qu, L. Sang, *Polymer Composites*, **43**, 9, 6180-6190 (2022). DOI: 10.1002/pc.26922.
72. Ch. Poornima, M.U. Shivanna, S. Sathyanarayana, *Polymer Composites*, **44**, 1, 57-68 (2023). DOI: 10.1002/pc.27026.
73. V. Cavus, *BioResources*, **15**, 2, 2227-2236 (2020). DOI: 10.15376/biores.15.2.2227-2236.
74. M. Baig, B. Almeshari, A. Aabid, H. Junaedi, A. Almajid, *Heliyon*, **10**, 9, Article e30510 (2024). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30510.
75. W. Wang, H. Chen, J. Li, *Fibers and Polymers*, **22**, 4, 1137-1144 (2021). DOI: 10.1007/s12221-021-0202-z.
76. J. Hu, X. Zhao, J. Xie, Y. Liu, Sh. Sun, *Journal of Polymer Research*, **29**, Article 182 (2022). DOI: 10.1007/s10965-022-03047-w.
77. C. Wang, Zh. Xing, Sh. Yan, L. Shi, Ch. Hao, Q. Lei, *Materials Research Bulletin*, **155**, Article 111978 (2022). DOI: 10.1016/j.materresbull.2022.111978.
78. J. Xu, Sh. Xu, J. Hao, H. Cao, H. Miao, *Materials Today Communications*, **38**, Article 107958 (2024). DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107958.
79. J. Hu, X. Zhao, J. Xie, Y. Liu, Sh. Sun, *Journal of Applied Polymer Science*, **139**, 17, Article 52047 (2022). DOI: 10.1002/app.52047.
80. Z. Azizi, M. Fasihi, S. Rasouli, *Electrochimica Acta*, **507**, Article 145184 (2024). DOI: 10.1016/j.electacta.2024.145184.

© **Х. С. Абзальдинов** – канд. хим. наук, доцент каф. Технологии пластических масс (ТПМ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, abzaldinov@mail.ru, **С. В. Тутов** – директор по НИОКР и инновациям, ООО «Сибур», Москва, Россия; **К. Б. Вернигоров** – канд. хим. наук, генеральный директор, ООО «Сибур ПолиЛаб», Москва, Россия; доцент каф. ТПМ, КНИТУ; **В. И. Машуков** – канд. хим. наук, директор по прикладным разработкам ООО «Сибур ПолиЛаб», Москва, Россия; **С. Н. Русанова** – д-р хим. наук, доцент каф. ТПМ, КНИТУ; **Ю. М. Казаков** – д-р техн. наук, ректор, профессор каф. Химической Технологии Переработки Эластомеров, КНИТУ; **О. В. Стоянов** – д-р техн. наук, профессор, советник при ректорате, заведующий каф. ТПМ, КНИТУ.

© **Kh. S. Abzal'dinov** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Plastics Technology (PT) Department, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, abzaldinov@mail.ru; **S. V. Tutov** – Director of R&D and Innovations, Sibur LLC, Moscow, Russia; **K. B. Vernigorov** – PhD (Chemical Sci.), General Director, Sibur PolyLab LLC, Moscow, Russia; Associate Professor, the PT department, KNRTU; **V. I. Mashukov** – PhD (Chemical Sci.), Director of Applied Development, Sibur PolyLab LLC, Moscow, Russia; **S. N. Rusanova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Associate Professor, the PT department, KNRTU; **Yu. M. Kazakov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Rector, Professor, Department of Elastomers Chemistry and Processing Technology, KNRTU; **O. V. Stoyanov** – Doctor of Sciences (Technical Sci), Full Professor, Advisor to the Rector's Office, Head of the PT Department, KNRTU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 04.02.26

Дата принятия рукописи в печать – 11.02.26