

Научная статья

УДК 665.775

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-501-509>

CC BY 4.0

Производство наноструктурного модификатора битумов при переработке автомобильных покрышек

Марина Павловна Красновских^{1*}, Сергей Юрьевич Чудинов², Наталья Николаевна Слюсарь³,
Константин Георгиевич Пугин^{4,3}, Яков Иосифович Вайсман³

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

² ООО «Буматика», Пермь, Россия

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

⁴ Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: krasnovskih@yandex.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Инновационными наносвязующими для устройства асфальтобетонных покрытий являются полимерно-битумные вяжущие. Введение полимерного модификатора улучшает характеристики битума и асфальтобетона. Применение резины отработанных покрышек для модификации битума считалось экологически чистым решением, но ограничено вследствие плохой совместимости резины с битумом. Для преодоления этого ограничения известны различные методы, основанные на активации поверхности резины, диспергировании резины до наноразмерных частиц и термохимических превращениях резины до индивидуальных органических соединений. **Методы и материалы.** Предложено использовать метод совместного с кислородсодержащим маслом пиролиза резины под давлением для преобразования в наноструктурный модификатор битумов. Полученный продукт исследован методами термогравиметрии, ЯМР-спектроскопии, хромато-масс-спектрометрии, сканирующей электронной микроскопии и растворимости в толуоле. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что резина при совместном пиролизе подвергается девулканизации, крекингу и диспергированию до наноразмерных частиц, в результате чего продукт оказывается совместимым с битумом. Термохимическую переработку автомобильных покрышек можно рассматривать как перспективный метод производства наноструктурного модификатора битумов. **Заключение.** Использование термохимической обработки под давлением резины отработанных покрышек в присутствии кислородсодержащего масла позволяет получить наноструктурированный продукт, совместимый с битумом для дальнейшего использования полученного модификатора в производстве асфальтобетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноструктурный модификатор, битум, автомобильные покрышки.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FSNM-2020-0024 «Развитие научных основ фундаментальных экологических и природоподобных технологий и экологического управления в нефтяной промышленности».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Красновских М.П., Чудинов С.Ю., Слюсарь Н.Н., Пугин К.Г., Вайсман Я.И. Производство наноструктурного модификатора битумов при переработке автомобильных покрышек // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 6. С. 501–509. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-501-509>. – EDN: WHOMRF.

ВВЕДЕНИЕ

Инновационными наносвязующими для устройства асфальтобетонных покрытий являются полимерно-битумные вяжущие. Введение полимерного модификатора улучшает характеристики битума и асфальтобетона. Необходимым условием получения модификатора битума является его способность растворяться или набухать в дисперсионной

среде битума [1]. Качество битумов как нефтяных дисперсных систем непосредственно связано с их структурой и свойствами, которые определяются количественным соотношением масел, смол и асфальтенов, образующих микрогетерогенную нанодисперсную структуру [2].

Отработанные покрышки являются распространенным крупнотоннажным видом отходов, а их первичное производство нефтехимической промышлен-

© Красновских М.П., Чудинов С.Ю., Слюсарь Н.Н., Пугин К.Г., Вайсман Я.И., 2022

ностью предполагает совместимость отработанных покрышек с другими нефтехимическими продуктами. Ежегодно производится почти 1,5 миллиарда шин [3], что составляет более 17 миллионов тонн. Резина, составляющая основу покрышек, обладает высокой устойчивостью к разложению в природной среде. Прогресс, достигнутый в последние годы в области обращения с отходами, привел к тому, что шины начинают восприниматься как потенциальный источник ценного сырья [4]. Исследовательские работы, направленные на разработку экономически эффективных и экологически чистых методов переработки шин, полностью оправданы, такой подход позволяет устойчиво развивать промышленно применимые технологии переработки [5].

Резиновая крошка, полученная из отработанных покрышек, представляет собой достаточно химически инертный материал вследствие наличия трехмерной структуры, созданной на этапе формирования изделия и дополнительной сшивки полимера межмолекулярными связями атомов серы и частицами наполнителя в виде высокодисперсного углерода. Поэтому кажущееся очевидным решение по утилизации резиновой крошки путем создания композита с дорожным битумом для возможности формования асфальтобетона в реальности оказывается неосуществимым вследствие невысокой или отсутствующей адгезии поверхности отработанной резины с битумом.

Резиновая крошка, получаемая в результате измельчения утилизируемых шин, успешно используется в качестве модификатора для асфальтобетонного покрытия в целях обеспечения экологичности, и конечный продукт был широко известен как прорезиненный асфальт [6]. Хотя прорезиненный асфальт считался экологически чистым материалом для мощения с благоприятными инженерными преимуществами, он страдает от плохой совместимости с другими компонентами асфальтобетона, в частности с битумом, что серьезно ограничивало его применение. Эта проблема несовместимости вызвана большими различиями в химической природе (размер молекул и полярность) и физических характеристиках (плотность и растворимость) между резиновой крошкой и асфальтовой матрицей. В этом случае резиновая крошка, получаемая из шин с истекшим сроком службы, становится ресурсом, необходимым в другом производственном процессе для создания слоев дорожного покрытия [7].

Наиболее простым техническим решением для достижения совместимости битума и резиновой крошки можно считать измельчение резиновой крошки. Авторы [8] показали, что добавление резиновой крошки в битум при создании асфальтобетонных композиций улучшает свойства готового мате-

риала только при использовании резиновой крошки размером менее 100 мкм и в некоторых случаях при размерах частиц 100–200 мкм. Использование резиновой крошки большего размера приводит к потере улучшений, достигнутых за счет взаимодействия битума и резины.

Более технически сложным решением для совместимости резины и битума является активация поверхности крошки. Активация резиновой крошки возможна методом высокотемпературного сдвигового соизмельчения бинарного смесового порошка на основе резиновой крошки и бутадиен-стирольного термоэластопласта [9]. Авторы предлагают [10] в процессе ультразвуковой обработки резины в экструдере получать девулканизированный продукт, который может быть использован в качестве заполнителя в асфальтобетонной смеси.

На практике резиновую крошку подвергают термохимической обработке и измельчению в коллоидной мельнице для получения совместимого с битумом модификатора. Так, Татнефть и венгерская MOL Group приступили к реализации проекта по строительству установки по производству резиномодифицированного битума на комплексе ТАНЕКО. Технология была запатентована MOL Group и группой ученых Паннонского университета (патент HU226481) [11]. Однако механическая обработка резиновой крошки в шаровой мельнице требует значительных временных и энергетических затрат, поэтому химические методы диспергирования резины до наноструктурного размера частиц и соответствующей совместимости с коллоидной битумной системой представляются более перспективными.

Модификация измельченной резины шин для обеспечения ее совместимости с матрицей является более универсальным методом. Наиболее известными техническими решениями его осуществления являются химическая модификация и реакционная экструзия [12]. Химическая модификация поверхности резиновой крошки может быть проведена самим битумом, если обеспечить эффективный теплоподвод методом микроволновой обработки [13]. В этом случае девулканизированная резина на поверхности зерен эффективно взаимодействует с битумом, обеспечивая в дальнейшем высокие адгезионные свойства поверхности.

Чтобы преодолеть проблему адгезии, используются поверхностные покрытия, компатибилизаторы, добавки и энергетические обработки. Предлагается [14] включение в композицию наночастиц с комбинацией других методов, что облегчает получение качественных композитов и создание конкурентоспособных материалов. Другим решением по созданию композита из резиновой крошки и полиэтилена высокой плотности является активация поверхности

материалов с применением сополимера олефин-малеинового ангидрида [15].

Термическая обработка резины приводит к девулканизации и активации поверхности материала с возможностью вступать во взаимодействие с добавками, улучшающими адгезию. Так, применение электромагнитной энергии СВЧ для девулканизации порошка резины приводит к получению из обработанного материала нового композита с улучшенными свойствами [16]. Во время обработки микроволновой энергией происходит разрыв связей сера-сера и углерод-сера.

При девулканизации происходит разрушение химических связей сера-сера (S–S) и углерод-сера (C–S) без разрушения основной сети и без разрушения материала. Девулканизированный каучук можно смешивать с первичным каучуком или с другими видами матриц для получения новых соединений без значительного снижения механических и физических свойств. В литературе представлено множество типов процессов девулканизации: химические, ультразвуковые, микроволновые, термомеханические и т.д. Термомеханическая девулканизация, основанная на экструзии, представляется более подходящей для применения в промышленных масштабах. Сверхкритический CO₂ был предложен в качестве экологически чистой атмосферы, которую можно использовать для улучшения этого типа девулканизации [17]. Есть предположение, что в сверхкритических условиях CO₂ разбухает в каучуке и растягивает сульфидные связи, облегчая их разрыв.

Анализ литературных источников дает основание предположить, что наличие любых кислородсодержащих соединений, а не только диоксида углерода, ускоряет процесс девулканизации и крекинга полимерных молекул. Вероятно, этот эффект связан с радикальным механизмом процесса пиролиза при температурах выше 500°C, когда гетероатомы кислорода легче, чем другие атомы, образуют радикалы, способствующие обрыву полимерных молекул [18]. Действительно, многие исследования подтверждают положительное влияние гетероатомов кислорода на деструкцию полимерных молекул, в том числе и на процесс девулканизации.

Поэтому было предложено активировать и диспергировать резиновую крошку термохимическим методом в присутствии кислородсодержащих соединений до совместимости с коллоидной битумной матрицей. Исходя из этого, целью данного исследования было определение возможности термохимической девулканизации резины с получением наноструктурного модификатора битума для дальнейшей утилизации в асфальтобетоне. Для практической реализации этой цели исследованы продукты пиролиза резиновой крошки совместно с кислород-

содержащим маслом растительного происхождения на предмет образования олигомеров и совместимости с битумом.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве резины отработанных покрышек использовали резиновую крошку фракции 1–3 мм производства ООО «Буматика». Кислородсодержащим компонентом было выбрано подсолнечное нерафинированное масло марки «Благо».

Пиролиз исследуемых образцов осуществляли в стальной реторте. Пиролиз проводили в течение 90 минут при 530°C. Масса пробы составляла 20,0 г. По окончании процесса давление в реакторе достигало 23–25 атм.

Структуру и размер частиц продуктов пиролиза анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с различным увеличением.

Термоаналитические исследования проводили в атмосфере аргона с помощью прибора синхронного термического анализа STA 449 F1 производства фирмы NETZSCH (Германия), позволяющего осуществлять анализ с одновременной регистрацией термогравиметрических и калориметрических характеристик.

Совместимость полученных продуктов с битумом определяли по растворимости в толуоле согласно ГОСТ 20739-75. «Битумы нефтяные. Метод определения растворимости».

Толуольные экстракты после растворения в битуме анализировались на спектрометре: BrukerAvance III HD (400 MHz ¹H, 101 MHz ¹³C), растворитель дейтерохлороформ CDCl₃. Химические сдвиги указаны относительно TMS по остаточному сигналу растворителя; температура съемки 40°C.

Качественный состав растворимых в толуоле продуктов пиролиза определяли методом хромато-масс-спектрометрии на приборе Agilent Technologies, хроматограф 7890B GS System, масс-спектрометр 5977A MSD, капиллярная колонка HP-1MS (длина 30 м, внутр. диаметр колонки 0,25 мм, толщина нанесенного слоя – 0,25 мкм), газ-носитель – гелий, 1 мл/мин. Программирование температуры проводили в следующем режиме: выдержка при 50°C 1 минуту, затем нагрев со скоростью 5 градусов в минуту до 300°C, 300°C изотерма на 9 минут, потом нагрев 5 градусов в минуту до 325°C и изотерма 325°C на 1 минуту. Температура инжектора – 270°C, температура выхода в масс-спектрометр – 350°C, режим работы масс-спектрометра: энергия ионизации – 70 эВ, температура источника – 230°C, массовый диапазон 16–500. Обработка результатов проводилась с использованием программного комплекса, поставля-

емого с прибором. Идентификацию продуктов проводили на основании сравнения их масс-спектров со спектрами соединений, имеющихся в библиотеке NIST 2017, прилагаемой к программе.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходя из вышеописанных предположений о механизме пиролиза резины в присутствии кислородсодержащих соединений, были получены продукты совместного пиролиза резины и растительного масла. На рис. 1 представлены результаты термогравиметрического анализа в атмосфере аргона исходной резины (1), образца резины, подвергнутой пиролизу в вышеописанных условиях, и образца, полученного пиролизом 76 масс.% резины и 24 масс.% растительного масла. Очевидно, что часть резины в условиях термического воздействия подвергается пиролизу и деструкции с образованием более низкомолекулярных продуктов даже без дополнительного химического воздействия кислородсодержащего масла.

В присутствии масла процесс деструкции полимера идет еще более интенсивно, и количество низкокипящих фракций увеличивается.

Количественная оценка деструкции резины и образования низкомолекулярных легких фракций может быть проведена путем нахождения доли углеводородов, испаряющихся в определенном температурном интервале. Методически этот способ показан на примере кривой 2. Фракция, выкипающая до 150°C, примерно соответствует фракции бензина в случае прямой перегонки нефти и для образца 2 составляет 4,83 масс.%. Средняя фракция, включающая керосин и дизельное топливо, перегоняется при температурах 150–360°C и для выбранного образца составляет 29,38 масс.%

Доли легкой и средней фракций для трех описываемых образцов приведены в табл. 1.

Для всех образцов характерно наличие термически устойчивого остатка в 38–42 масс.%, представляющего собой вероятно неорганические компоненты резины и углерод, вводимый в исходный

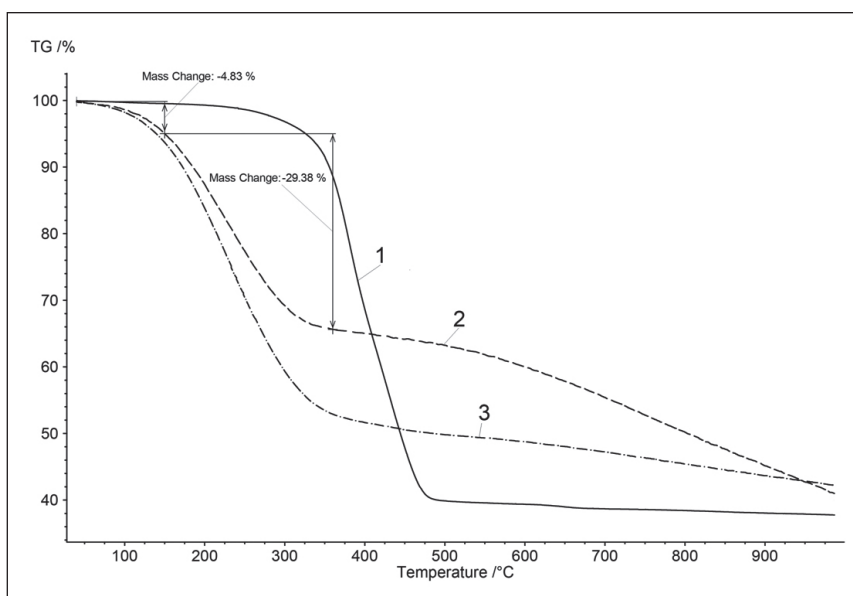


Рис. 1. Результаты термогравиметрического анализа в аргоне исходной резины (1), продукта пиролиза резины (2) и продукта совместного пиролиза резины и растительного масла (3)

Таблица 1

Доли легкой (до 150°C) и средней (150–360°C) фракций в составе образцов по данным термогравиметрии

Образец	Доля легкой фракции (до 150°C), масс.%	Доля средней фракции (150–360°C), масс.%
Исходная резина	0,47	10,89
Продукт пиролиза резины	4,83	29,38
Продукт совместного пиролиза резины и растительного масла	6,10	40,79

материал. Очевидно, что в результате термической обработки происходит деполимеризация полимерных молекул резины с образованием легких углеводородов, причем присутствие кислородсодержащего масла способствует этому процессу.

Очевидно, что ключевыми задачами утилизации резиновой крошки в асфальтобетоне является химическая совместимость продуктов переработки резины с битумом и размер частиц нерастворимых в битуме продуктов пиролиза резины. В первом случае химическая совместимость продуктов деполимеризации резины с битумом определяется как растворимость модифицирующих добавок в органических растворителях, главным образом в толуоле [19]. Исходя из этого, была определена растворимость резиновой крошки и продуктов ее совместного пиролиза с растительным маслом в толуоле. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Доля конденсированной фазы при индивидуальном пиролизе резиновой крошки и при совместном пиролизе с маслом оказывается практически одинаковой, но доля растворимой в толуоле фракции существенно возрастает во втором случае. Очевидно, что в случае совместного пиролиза процесс девулканизации резины и деструкции полимера протекает значительно глубже.

Данное предположение подтверждается данными анализа ЯМР, представленными в табл. 3.

Действительно, в случае совместного пиролиза доля алифатического углерода в продукте возрастает в 1,3 раза, и доля ароматического углерода снижается в 1,5 раза. При этом массы растительного масла в смеси было в 3,2 раза меньше, чем резиновой

крошки. Поэтому можно утверждать, что рост доли алифатического углерода в случае совместного пиролиза не может достигаться за счет разложения триглицеридов масла, а связан с крекингом полимеров резины, образованием олигомеров и их частичной деароматизацией. В результате полученный продукт теряет трехмерную структуру и приобретает растворимость в толуоле и соответственно оказывается совместимым с битумом.

Данный вывод также подтверждают результаты проведенного хроматомасс-спектрометрического исследования толуольных экстрактов продукта пиролиза резины и продукта совместного пиролиза резины и растительного масла. Полученные хроматограммы представлены на рис. 2.

По данным хроматографического анализа в обоих образцах фиксируется более 100 индивидуальных веществ. В табл. 4 представлено относительное содержание мажорных соединений, входящих в состав продуктов пиролиза, идентифицированных по данным масс-спектрометрии.

Отмечается снижение доли ароматических соединений и увеличение как доли, так и разнообразия алифатических углеводородов в продукте совместного пиролиза резины с растительным маслом в сравнении с продуктом пиролиза резины. Таким образом, полученный продукт получается совместимым с битумом по своей химической природе.

Кроме отмеченной выше химической совместимости с битумом продукта совместного пиролиза резины с растительным маслом, выявлено высокое диспергирование продукта до наноразмерных частиц, характерных для битумов. На рис. 3 пред-

Таблица 2
Растворимость образцов в толуоле

Образец	Доля конденсированной фазы от исходной массы, масс. %	Доля конденсированной фазы, нерастворимой в толуоле, масс. %
Исходная резина	100	100
Продукт пиролиза резины	74,2	58,6
Продукт совместного пиролиза резины и растительного масла	72,1	40,6

Таблица 3
Данные ЯМР-спектроскопии

Образец	C ₁₃ , интегрирование	
	Ароматический углерод, мол. %	Алифатический углерод, мол. %
Продукт пиролиза резины	43,78	56,22
Продукт совместного пиролиза резины и растительного масла	28,76	71,24

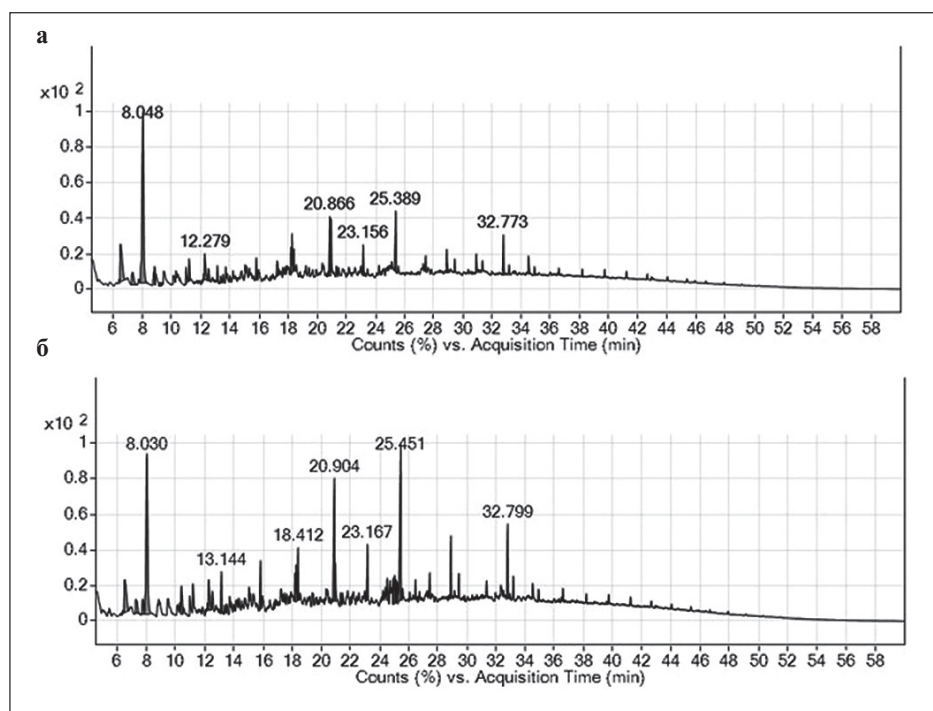


Рис. 2. Результаты хроматографического анализа продукта пиролиза резины (а) и продукта совместного пиролиза резины и растительного масла (б)

Таблица 4

Данные хроматомасс-спектрометрии

Продукт пиролиза резины		Продукт совместного пиролиза резины и растительного масла	
Соединение	мол. %	Соединение	мол. %
1-метил-4-проп-2-илбензол	23,3	1-метил-4-пропан-2-илбензол	14,4
3-метил-1-этилбензол	6,5	Гептадекан	8,9
Гептадекан	3,4	Пентадекан	5,9
2,6,10-триметилтетрадекан	3,1	1-метил-3-этилбензол	3,9
2,3,6-триметилнафталин	2,6	Октадеканнитрил	2,9
Оксадеканнитрил	2,2	1-бут-3-ен-2-ил-3-метилбензол	2,1
		Ундекан	1,9
		Тридекан	1,9
		2,6,10-триметилтетрадекан	1,8
		2,6-диметилнафталин	1,5

ставлены результаты электронномикроскопических исследований пленки продукта совместного пиролиза резины с растительным маслом, нанесенной из раствора толуола на керамическую поверхность с дальнейшим удалением растворителя.

Очевидно, что термохимическая обработка приводит помимо девулканизации и образования комплекса индивидуальных химических соединений

к диспергированию нерастворимой в толуоле полимерной части продукта до размера частиц, не превышающих 70–80 мкм (рис. 3а). Одновременно неорганические компоненты резины, такие, как оксиды кремния и магния, образуют наноразмерные частицы менее 900 нм. Известно, что подобные наноразмерные неорганические оксидные частицы улучшают стабильность асфальтобетонных смесей [20].

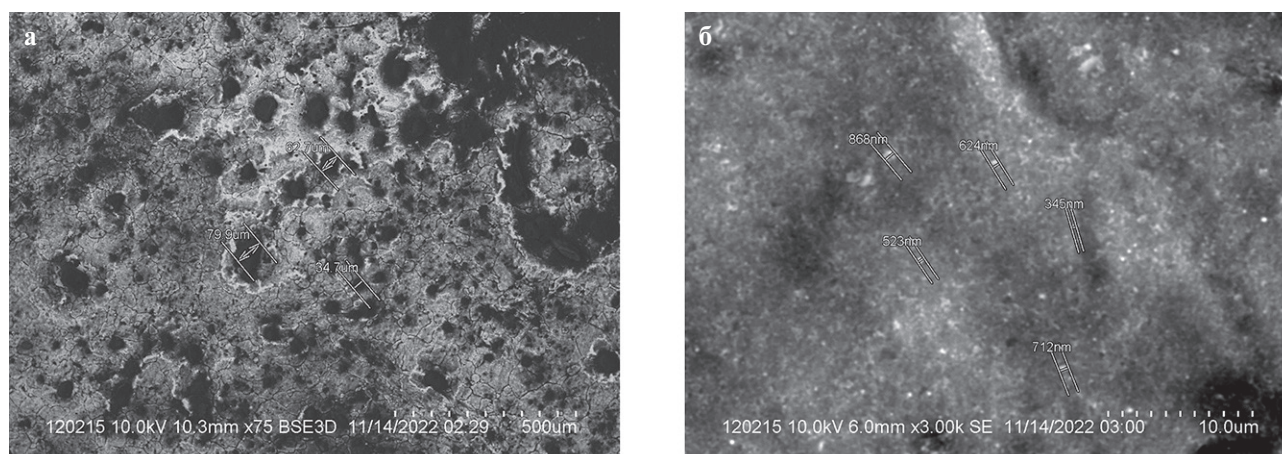


Рис. 3. Микрофотография (а) пленки органического продукта с частицами нерастворенного полимерного материала и микрофотография (б) пленки органического продукта с частицами неорганических примесей

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов установлено, что совместный пиролиз под давлением резиновой крошки отработанных покрышек и растительного масла приводит к получению наноструктурированного продукта, совместимого с битумом. В ходе термохимического процесса происходит девулканизация и крекинг полимерных молекул резины с образованием индивидуальных органических олигомеров и высокодисперсных частиц органической и неорганической природы. Эти результаты согласуются с исследованиями других авторов. Так, в работе [21] доказано, что совместный пиролиз при 550°C резины отработанных покрышек и полиолефинов из отработанной упаковки значительно ускоряется и увеличивает выход жидкого продукта в присутствии стеблей кукурузы. Достигается теплотворная способность полученного масла 39,93 МДж/кг. Добавка стеблей кукурузы увеличивала соотношение Н/С пиролизного масла с 1,43 до 1,50, что означало больше насыщенных углеводородов и лучшую стабильность масла. В этом случае возросло содержание кислорода в пиролизном масле и снижалось содержание азота и серы. Последний факт авторы объясняют связыванием серы и азота кислородом целлюлозы или лигнина в газообразные продукты.

В исследовании [22] листья ивы и отработанные шины подвергали совместному пиролизу при 300–500°C. Полученный жидкий продукт содержал кислорода 1,79% и в основном состоял из алканов и ароматических соединений, что придавало ему свойства, сходные с дизельным топливом при высокой теплоте сгорания. В ходе пиролиза сера эффективно удалялась в виде SO₂. Показано [23], что при совместном пиролизе отработанных шин и бамбуковых опилок при 550°C максимальный вы-

ход ароматических углеводородов был получен при соотношении компонентов 1:1. Очевидно, донором кислородсодержащих радикалов при пиролизе резины могут выступать любые кислородсодержащие соединения. В этом смысле к описываемому процессу получения битумоподобных материалов приближаются автоклавные методы обработки растительной биомассы с высоким содержанием атомов кислорода. Так, гидротермальная конверсия промышленных отходов водорослей *Spirulina sp.* при 260°C под автогенным давлением образует гидрофобную фазу, имеющую реологические свойства, аналогичные реологическим свойствам эластомерного биосвязывающего [24]. Удаление твердых остатков из гидрофобной фракции путем фильтрации приводит к получению чистого обычного битумоподобного материала.

Даже снижение температуры до определенных пределов может быть компенсировано увеличением давления. Так натуральный каучук, близкий по строению к резине отработанных покрышек, может успешно пройти процесс ожижения в автоклаве при 250–375°C и времени реакции 15–75 минут [25]. Жидкий продукт содержал различные углеводороды, преимущественно D-лимонен и изопрен, а также ароматические соединения и алкены с высшей теплотой сгорания до 46 МДж/кг, что обусловлено низким содержанием кислорода в 1,02%. Обращает на себя внимание тот факт, что низкое содержание кислорода в продукте происходит на фоне применения спиртов в качестве основного реагента. Высокая теплота сгорания делает полученную жидкость пригодной для использования в качестве замены традиционного ископаемого топлива. Таким образом, пиролиз резины в присутствии кислородсодержащих соединений приводит к девулканизации резины и крекингу

полимеров до соединений, которые с практической точки зрения представляют собой жидкие при нормальных условиях углеводороды. В результате кислород удаляется из системы в виде низкомолекулярных оксидов.

Предлагаемое техническое решение имеет преимущество перед пиролизом резины до жидкого топлива, заключающееся в том, что такие естественные примеси резины, как композиционный материал, в виде оксидов кремния и цинка, а также технический углерод естественным образом входят в состав асфальтобетонной смеси и в дальнейшем не представляют опасности для окружающей среды.

Таким образом, термохимическую переработку автомобильных покрышек можно рассматривать как

перспективный метод производства наноструктурного модификатора битумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование термохимической обработки под давлением резины отработанных покрышек в присутствии кислородсодержащего масла позволяет получить наноструктурированный продукт, совместимый с битумом для дальнейшего использования полученного модификатора в производстве асфальтобетона. Предложенный метод переработки отработанных покрышек позволяет снизить экологическую нагрузку на окружающую среду вследствие безопасной утилизации покрышек и отсутствия опасных выбросов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Евдокимова Н.Г., Лунева Н.Н., Егорова Н.А., Махмутова А.Р., Байгузина Ю.А., Имангулова Э.А. К выбору технологии производства полимерно-битумных вяжущих как инновационных наносвязующих для устройства асфальтобетонных покрытий // Нанотехнологии в строительстве. 2018. Т. 10, № 5. 20–37. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-20-37>
2. Боев Е.В., Исламудинова А.А., Аминова Э.К. Получение закрепителя для гидроизоляционных дорожных битумов // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 5. 319–327. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-5-319-327>
3. Czajczyńska D., Krzyżyńska R., Jouhara H., Spencer N. Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*. 2017; 134: 1121–1131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>
4. Sienkiewicz M., Kucinska-Lipka J., Janik H., Balas A. Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*. 2012; 32(10): 1742–1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>
5. Hejna A., Korol J., Przybysz-Romatowska M., Zedler Ł., Chmielnicki B., Formela K. Waste tire rubber as low-cost and environmentally-friendly modifier in thermoset polymers – A review. *Waste Management*. 2020; 108: 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.032>
6. Li J., Chen Z., Xiao F., Amirkhanian S. N. Surface activation of scrap tire crumb rubber to improve compatibility of rubberized asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 169: 105518. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105518>
7. Bressi S., Fiorentini N., Huang J., Losa M. Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the Art and Statistics. *Coatings*. 2019; 9(6): 384. <https://doi.org/10.3390/coatings9060384>
8. López-Moro F. J., Moro M. C., Hernández-Olivares F., Witoszek-Schultz B., Alonso-Fernández M. Microscopic analysis of the interaction between crumb rubber and bitumen in asphalt mixtures using the dry process. *Construction and Building Materials*. 2013; 48: 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.041>
9. Гордеева И.В., Наумова Ю.А., Дударева Т.В., Красоткина И.А., Никольский В.Г. Композиционный модификатор асфальтобетонов, получаемый методом высокотемпературного сдвигового соизмельчения шинной резины и СБС-термоэластомера // Тонкие химические технологии. 2018. Т. 13. № 5. С. 38–48. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2018-13-5-38-48>
10. Соколов М.В., Николюкин М.М., Полянский С.Н. Повышение степени экологической безопасности предприятий резиновой промышленности // Записки Горного института. 2013. Т. 203. С. 233–236.
11. Татнефть и МОЛ начали строительство установки по производству резиномодифицированного битума на ТАНЕКО – <https://neftegaz.ru/news/neftechim/687779-tatneft-i-mol-nachali-stroitelstvo-ustanovki-po-proizvodstvu-rezinomodifitsirovannogo-bituma-na-tane/> (дата обращения 16.11.2022).
12. Phiri M.M., Phiri M.J., Formela K., Wang S., Hlangothi S.P. Grafting and reactive extrusion technologies for compatibilization of ground tire rubber composites: Compounding, properties, and applications. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 369: 133084. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133084>
13. Zedler Ł., Klein M., Saeb M. R., Colom X., Cañavate J., Formela K. Synergistic Effects of Bitumen Plasticization and Microwave Treatment on Short-Term Devulcanization of Ground Tire Rubber. *Polymers*. 2018; 10(11): 1265. <https://doi.org/10.3390/polym10111265>

14. Archibong F. N., Sanusi O. M., Médéric P., Aït Hocine N. An overview on the recycling of waste ground tyre rubbers in thermoplastic matrices: Effect of added fillers. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 175: 105894. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105894>
15. Simon-Stöger L., Varga C. PE-contaminated industrial waste ground tire rubber: How to transform a handicapped resource to a valuable one. *Waste Management*. 2021; 119: 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.037>
16. Aoudia K., Azem S., Aït Hocine N., Gratton M., Pettarin V., Seghar S. Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*. 2017; 60: 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>
17. Asaro L., Gratton M., Seghar S., Aït Hocine N. Recycling of rubber wastes by devulcanization. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 133: 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.016>
18. Ketov A., Korotaev V., Sliusar N., Bosnic V., Krasnovskikh M., Gorbunov A. Baseline Data of Low-Density Polyethylene Continuous Pyrolysis for Liquid Fuel Manufacture. *Recycling*. 2022; 7: 2. <https://doi.org/10.3390/recycling7010002>
19. Мурузина Е.В. Оценка совместимости нефтяных битумов с термоэластомерами // Вестник МГСУ. 2010. № 3. С. 63–68.
20. Helal E., Sherif El-Badawy, Alaa G., Zaki S.I. Evaluation of asphalt enhanced with locally made nanomaterials. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2016; 8(4): 42–67. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-4-42-67>
21. Li H., Jiang X., Cui H., Wang F., Zhang X., Yang L., Wang C. Investigation on the co-pyrolysis of waste rubber/plastics blended with a stalk additive. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015; 115: 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.07.004>
22. Lu W., Guo Y., Zhang B. Co-deoxy-liquefaction of willow leaves and waste tires for high-caloric fuel production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2018; 35: 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.08.020>
23. Wang Y., Dai L., Fan L., Duan D., Liu Y., Ruan R., Yu Z., Liu Y., Jiang, L. Microwave-assisted catalytic fast co-pyrolysis of bamboo sawdust and waste tire for bio-oil production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017; 123: 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.11.025>
24. Rolland A., Sarda A., Colomines G., Madec Y., Queffelec C., Farcas F., Chailleux E., Leroy E. Biobased bitumen analogue formation during hydrothermal treatment of microalgae residues, part 2: Influence of residence time on reaction products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020; 152: 104940. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104940>
25. Ahmad N., Abnisa F., Wan Daud W. M. A. Synthesis of valuable intermediate products from natural rubber under supercritical alcohol conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2019; 139: 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.02.004>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Красновских Марина Павловна – кандидат технических наук, старший преподаватель, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, krasnovskih@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5187-5590>

Чудинов Сергей Юрьевич – директор, ООО Буматика, Пермь, Россия, s.chudinov@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6574-4914>

Слюсарь Наталья Николаевна – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия, nnslyusar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0123-6907>

Пугин Константин Георгиевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия; профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, 123zzz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>

Вайсман Яков Иосифович – доктор медицинских наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, eco@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4700-030X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022; одобрена после рецензирования 02.12.2022; принята к публикации 05.12.2022.