

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-32-46

Высоцкая М.А., Токарев В.А., Курлыкина А.В., Грищенко М.С. Самойлов М.И.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: tokareval61@mail.ru*

РЕЦИКЛИНГ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ. ОБЗОР

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме утилизации изношенных автомобильных шин, которые представляют собой значительный источник отходов, негативно влияющих на окружающую среду. Авторы рассматривают современные методы переработки шин, включая механическое, криогенное, гидроструйное и мокрое измельчение. В исследовании представлен обобщённый анализ современных методов рециклинга автомобильных шин в резиновую крошку. Каждый из методов анализируется с точки зрения эффективности, энергозатрат и качества получаемой резиновой крошки. Особое внимание уделено применению резиновой крошки в строительных материалах, таких как бетон. Исследования показывают, что добавление резины улучшает звукоизоляционные свойства, пластичность и устойчивость к динамическим нагрузкам, хотя и снижает механическую прочность. Для преодоления этих ограничений предложены методы предварительной обработки резины, такие как щелочная обработка, и введение добавок, улучшающих адгезию на границе раздела дисперсной резины и цементной матрицы. Статья также затрагивает законодательные аспекты утилизации шин, включая нормативы и обязанности производителей. В заключение подчеркивается необходимость дальнейших исследований и разработки инновационных технологий для повышения эффективности переработки и расширения областей применения резиновой крошки. Решение проблемы утилизации шин требует комплексного подхода, объединяющего усилия науки, бизнеса и государства для достижения экологической устойчивости и рационального использования ресурсов.

Ключевые слова: автомобильные шины, резиновая крошка, рециклинг, методы переработки шин, устойчивое развитие, бетонные смеси.

Введение. В современном мире проблема утилизации отходов становится все более актуальной, особенно в контексте экологической устойчивости и рационального использования ресурсов. Одним из значимых источников отходов являются изношенные автомобильные шины, накапливающиеся в огромных количествах по всему миру. Заканчивая свой срок службы эти шины становятся отходами, требующими правильной утилизации [1, 2]. На сегодняшний день, в виду относительно низкой стоимости шин и сложностей, связанных с их переработкой, порядка 41 % отработанных шин оказывается на свалках или складах без дальнейшей переработки [3]. Химический состав шин делает их устойчивыми к естественному разложению, поэтому процесс их распада может занимать от 100 до 140 лет [4]. Осознание столь негативного воздействия автомобильных шин на окружающую среду, диктует необходимость дуального подхода к сложившейся проблематике: целесообразность увеличения ресурсного срока службы шин и наращивание темпов экологичной утилизации с последующим их вовлечением в объекты строительства или предметы народного хозяйства. Учитывая массовость использования шин и интенсивность отработки своего ресурса, вопрос их рециклинга приобретает все большую актуальность.

В начале XX века уровень переработки резины превышал 50 % благодаря ее высокой стоимости. Однако в 1960-х годах, появление дешевой нефти и широкое распространение синтетических каучуков снизили этот показатель до 20 %. Введение в обращение радиальных шин со стальным кордом еще больше усложнило процесс переработки. Поэтому уже к 1995 году уровень переработки шин в резиновую крошку сократился до 2 % [5]. В 1990 году около 89 % использованных шин в США отправлялись на свалку, для Европы этот показатель составлял в 1995 г. – 80 % [6]. Несмотря на то, что сегодня уровень утилизации шин в Европе и США достигает 90 %, по оценкам [7], на свалках по всему миру находится около 4 миллиардов шин, и к 2030 году их количество может увеличиться до 5 миллиардов.

Проанализируем динамику спроса на автомобильные шины. Так, в 2020 г. в Европе было продано 324 миллиона новых шин, из которых:

- 89,5 % (70 % по весу) предназначались для легковых автомобилей;
- 4,9 % (20 % по весу) – для грузовиков и автобусов;
- 3,6 % (1 % по весу) – для мотоциклов и скутеров;
- 1,9 % (9 % по весу) – для сельскохозяйственной и внедорожной техники [8].

В России, по данным Федеральной службы государственной статистики, за тот же период было произведено 55,3 миллиона шин, включая 37,6 миллиона для легковых автомобилей, 6,8 миллиона для автобусов, троллейбусов и грузовиков, а также 0,8 миллиона для мотоциклов и велосипедов.

Подобное разделение шин по видам транспорта с технологической точки зрения переработки сырья крайне важно. Более того, критичным параметром сырья, подлежащего переработке, является конструкция автомобильной шины. Конструкция различных типов представлены ниже (рис. 1.)

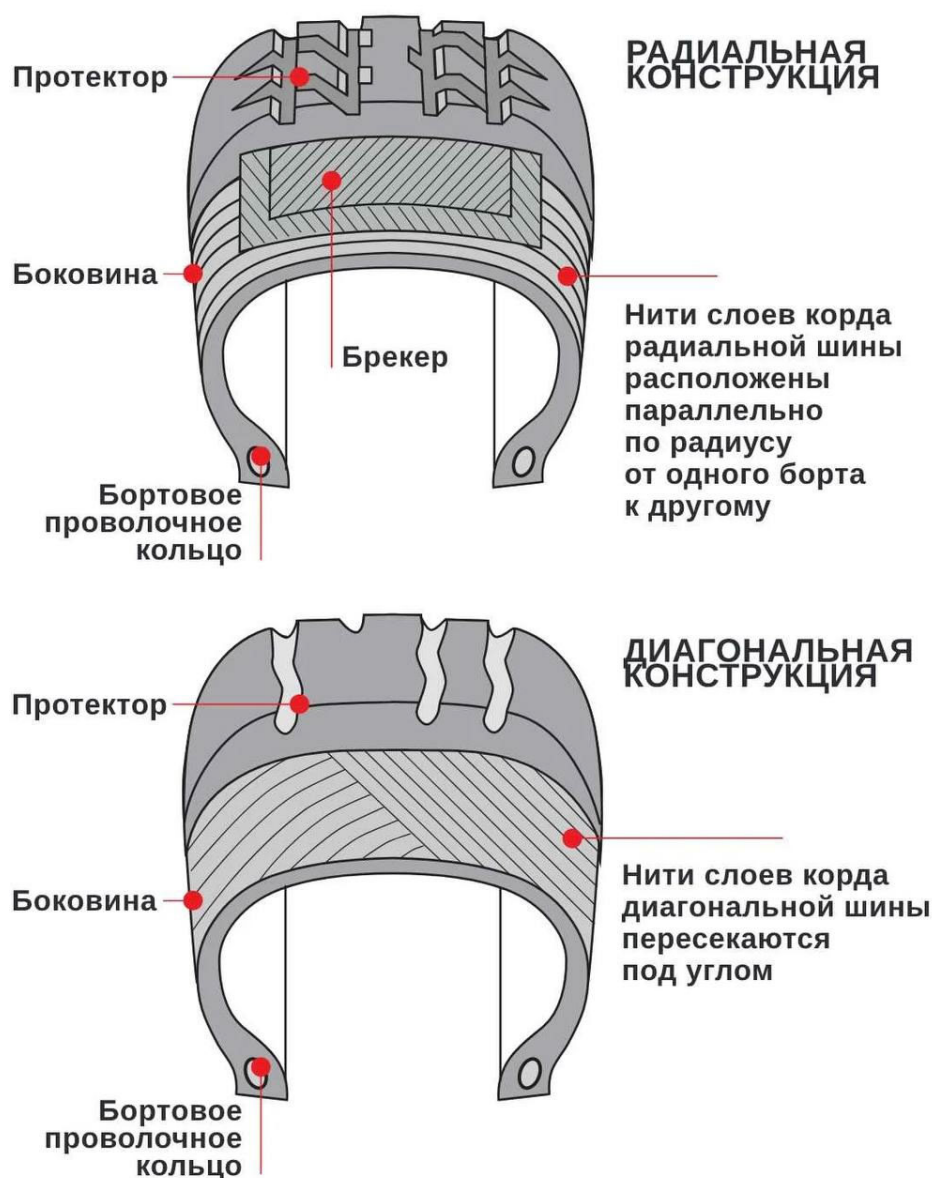


Рис. 1. Конструкция автомобильной шины

Важно подчеркнуть различия между радиальными и диагональными шинами. В радиальных шинах стальные нити используются только в части конструкции, например, в брекере, при этом остальные слои могут быть выполнены из текстильных или полимерных материалов. В диагональных шинах металлический корд используется во всех слоях, включая каркас. Это делает шину более прочной и устойчивой к нагрузкам. Диагональные шины в основном устанавливаются на грузовики, строительную технику или

большие автобусы, а радиальные шины используются на легковых автомобилях [9]. Конструктивные особенности и эксплуатационный комфорт предопределили популярность одних шин над другими, так ежегодное количество отработанных диагональных шин намного меньше, чем радиальных [10].

Рассмотрим компонентный состав шин, представленный в таблице 1.

Таблица 1

Состав автомобильных шин [11]

Материал	Диагональная шина	Радиальная шина
Каучук, %	47,0	45,0
Технический углерод и диоксид кремния, %	22,5	21,0
Металлы, %	14,0	23,5
Технический текстиль, %	5,5	1,0
Вулканизирующие агенты, %	2,5	3,0
Добавки, %	8,5	6,5

Как видно, использованные шины состоят из материалов, не разлагающихся в естественных условиях, что создает серьезную экологическую проблему. В то же время, они представляют собой ценный ресурс для повторного использования. Согласно Федеральному закону № 89-ФЗ от 24.06.1998 года «Об отходах производства и потребления» и ГОСТ Р 54095-2023 «Требования к сбору, накоплению, транспортированию, обработке и утилизации отходов шин, покрышек, камер», изношенные шины относятся к отходам IV класса опасности и подлежат обязательной утилизации. Обременение по утилизации шин или утилизационный сбор распределяется между производителями, импортерами, продавцами, а также владельцами транспортных средств. В виду все большего ужесточения экологических норм, складирование шин на свалках в текущих объемах становится недопустимым. Нарушение законодательства в части захоронения и рециклинга автомобильных шин влечет штрафные санкции, определяемые статусом нарушителя.

Реализация утилизации отработавших шин в части финансирования осуществляется через утилизационный сбор, в соответствии с Федеральным законом № 89-ФЗ (редакция от 08.08.2024 года), либо за счет производителей. В виду этого, крупными компаниями, производящими шины была организована Ассоциация производителей шин (АППШ), которая участвует в разработке государственных нормативов по утилизации и активно пропагандирует самостоятельный сбор и рециклинг вторичного резинового сырья.

Правительством РФ устанавливаются нормативы утилизации, определяющие годовой объем обязательств в процентах от объема выпущенных на рынок новых товаров. Эти нормативы постоянно увеличиваются и определяются уровнем развития технологий переработки. Например, для шин нормативы утилизации выросли с 15 % в 2016 году до 30 % в 2024 году. В конце 2023 года было принято решение о ежегодном увеличении нормативов на 10 %, что приведет к росту с 40 % в 2025 году до 80 % в 2029 году [12].

Интерес к вторичному использованию автомобильных шин побудил ученых всего мира к активной исследовательской деятельности [13–16]. Одним из направлений исследований стало вовлечение переработанной резины в бетонную смесь [17–19]. При введении резины в бетон наблюдались два основных эффекта: механическая прочность снижалась, в то время как долговечность, вязкость, ударопрочность, деформационная способность и звукоизоляционные свойства улучшались [20–22]. Поскольку прочность на сжатие и изгиб являются двумя основными критериями проектирования бетонных конструкций, снижение прочности «прорезиненного» бетона ограничивало его применение [23]. Однако желаемые характеристики, включая снижение плотности, увеличение пластичности, звукоизоляции и устойчивости к растрескиванию, сделали его приемлемым вариантом для неструктурного бетона с низкими требованиями к прочности [24].

В последние годы выполнен ряд исследований [25–27], нацеленных на изучение влияния размера частиц резины и шероховатости ее поверхности на механические характеристики резинобетона. Результаты этих работ свидетельствуют, что добавление резиновых частиц в бетонную смесь снижает ее прочность на сжатие, растяжение и сдвиг [28–30]. Это ухудшение свойств объясняется тремя основными факторами: замена твердых частиц природного заполнителя на более мягкие резиновые частицы, слабая адгезия между резиной и цементной матрицей, а также образование микротрещин на границах раздела и снижение целостности материала.

Известны гидрофобные свойства резины, приводящие к увеличению количества внутренних дефектов и пор, что дополнительно ухудшает механические свойства бетона. Преодоление этих ограничений исследователи видят в различных методах оптимизации свойств резинобетона, включая введение добавок, таких как микрокремнезем, зола-унос и доменный шлак, а также применении предварительной обработки резины [31, 32].

Ключевым преимуществом резинобетона является его способность поглощать энергию благодаря эластичности резиновых частиц. Это

делает материал устойчивым к динамическим нагрузкам, обеспечивая высокую пластичность и усталостную прочность [33, 34]. Кроме того, резинобетон демонстрирует улучшенные характеристики в условиях циклического замораживания-оттаивания, а также повышенную устойчивость к теплопередаче и проницаемости благодаря способности резины заполнять поры и компенсировать деформации матрицы [35–37]. Несмотря на эти преимущества, до сих пор отсутствуют стандартизированные подходы к определению оптимального размера частиц резины, их концентрации в бетонной смеси и методы обработки поверхности.

Материалы и методы. В исследовании выполнена аналитическая оценка отечественных и зарубежных научных трендов, посвященных применению резиновой крошки из автомобильных шин. Изучен иностранный и отечественный

опыт по применению различных методов модифицирования свойств резиновой крошки. Проанализировано влияние различных технологий переработки автомобильных шин на свойства получаемой резиновой крошки. Продемонстрированы общие тенденции и различия в подходах для решения поднятой в публикации проблематики. Для проведения библиометрического анализа использовались такие платформы, как российская электронная библиотека Elibrary, а также международные базы данных Scopus и Google Scholar. Эти ресурсы были выбраны в виду их широкой популярности и обширному охвату научных публикаций, что позволяет получать комплексные данные по различным направлениям исследований. В таблице 2 приведено количество результатов поиска по ключевым словам на февраль 2025 года.

Таблица 2

Поиск по ключевым словам

Ключевое слово	Количество выданных результатов		
	Google Scholar	Scopus	Elibrary
Способы получения резиновой крошки	1900	-	1513
Methods of obtaining rubber crumbs	41100	3115	939
Методы переработки автомобильных шин	12200	-	6999
Car tire recycling methods	36900	238	6733
Резиновая крошка из автомобильных шин	2230	-	2297
Ground tire rubber	183000	1230	13897

В таблице приведено количество поисковых откликов независимо от года публикаций. Поэтому основное внимание было уделено работам, опубликованным за последние 10 лет. На первом этапе исследования был осуществлен предварительный отбор статей и аннотаций, посвященных изучаемой тематике. Затем были определены более узкие категории для поисковых запросов, что позволило провести углубленный анализ и отбор релевантных публикаций. Научные исследования демонстрируют что только 5–10 % исследований представляют реальную научную ценность и соответствуют заявленной тематике. Особое внимание стоит уделить на малое количество отечественных публикаций относительно обилия иностранных трудов. Основная часть информации для обзорной статьи была получена из англоязычных источников.

Основная часть. Европейская ассоциация производителей шин и резины подсчитала, что порядка 65 % общего производства резиновых изделий предназначено для автомобильного сектора: шины, щетки стеклоочистителей, уплотнители, шланги, ремни безопасности, прокладки, изоляторы и т. д. [38]. При этом результаты исследования [39] показали, что две трети резины,

использованной в легковых автомобилях, составляют шины. Это указывает на то, что основной поток отходов резины – отслужившие свой срок шины. Согласно прогнозам, к 2030 году количество отработанных шин, складываемых в окружающей среде, увеличится до 1200 миллионов шин в год [40]. Если предположить, что прогнозные данные верны и динамика переработки резины сохранится на текущем, относительно низком уровне, то в течение следующих 10 лет рост количества отходов увеличится на 20 %.

Растущее количество отработанных шин представляет серьезную угрозу для экосистемы и здоровья человека. Традиционные методы утилизации, такие как захоронение или сжигание, не только наносят вред экосистеме, но и являются экономически неэффективными. Незаконно выброшенные или складированные отработанные шины представляют потенциальный риск неконтролируемого возгорания. Например, в 2016 году порядка 9000 человек были эвакуированы из своих домов, расположенных в Сесенье недалеко от Мадрида (Испания), из-за возгорания крупнейшей незаконной свалки отработанных шин в Европейском Союзе (ЕС). Оценки показали, что в Сесенье за более чем 15 лет накопилось порядка 70–90 тысяч тонн шин [41]. В связи с этим, поиск

инновационных способов переработки и рециклинга автомобильных шин становится важной задачей для науки и промышленности.

В настоящее время около 90 % переработки отходов резины производится механическим методом. Для обеспечения эффективной переработки отходов резины перед измельчением и помолом автомобильные шины целесообразно разделить по источнику их происхождения на грузовые и легковые. Это позволяет повысить управляемость процесса и улучшить качество получаемой продукции. В зависимости от технологии и условий измельчения получаемое сырье характеризуется различными размерами частиц, характеристиками поверхности и т. д.

При переработке механическим методом отходы резины пропускаются через ножницы или двухвалковые мельницы, работающие при комнатной температуре. Однако при измельчении отходов резины при температуре окружающей среды, температура измельченной резины может повышаться до 130 °С [42]. Это явление увеличивает риск неконтролируемого возгорания резины во время измельчения.

Вторым по популярности методом измельчения отработанных шин является криогенный метод, основанный на охлаждении отходов резины. В результате эластичный резиновый материал преобразуется в замороженную хрупкую форму, которую можно легко измельчить с помощью молотковой мельницы [43]. Отличием механического метода от криогенного является то, что измельченная механическим методом резина характеризуется неправильной формой частиц и губчатой, хорошо развитой поверхностью, в то время как при криогенном методе частицы резины правильные и гладкие, характеризующиеся

низкой площадью поверхности. Различают три способа заморозки переработанных шин.

В первом из них охлаждающей средой выступает жидкий азот. Использование жидкого азота при криогенном измельчении резиновой крошки позволяет реализовать два технологических принципа: замораживание объекта до требуемой температуры и последующие измельчение; комплексное дробление, включающее в себя на первом этапе механическое дробление при комнатной температуре до проектного размера частиц, второму этапу соответствует замораживание предварительно подготовленного сырья и его вторичное измельчение. Другой вариацией этого способа является замораживание шин до необходимой температуры при помощи жидкого азота с последующим измельчением без использования дробления при комнатной температуре [44].

Технология измельчения с использованием холодильного оборудования с воздушным расширением – это метод переработки резины, при котором охлаждение материала происходит за счет расширения сжатого воздуха. Основная идея заключается в использовании эффекта Джоуля-Томсона, при котором сжатый воздух, расширяясь, охлаждается [45]. Охлаждающей средой является воздух, являющийся доступным и дешевым сырьем. Это эффективное охлаждение при относительно низких затратах.

С развитием индустрии сжиженного природного газа использование холодного энергетического охлаждения СПГ привлекло внимание исследователей. Выделяющийся при испарении холод может быть использован в качестве хладагента при переработке отработанных шин [46]. Преимущества и недостатки различных технологий криогенного измельчения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Методы криогенного измельчения

Метод	Преимущества	Недостатки
Жидкий азот	Быстрое время предварительного охлаждения. Жидкий азот предотвращает окисление	Высокий расход охлаждающего материала. Сложность транспортировки жидкого азота
Воздушное расширение	Низкое энергопотребление. Не требует использования вредных химических веществ. Используется сжатый воздух, который может быть произведен на месте	Необходима очистка воздуха для предотвращения загрязнения резины. Медленный процесс
Сжиженный природный газ	Меньше отходов. Технология может быть интегрирована с терминалами СПГ, где уже есть доступ к сжиженному газу	Криогенные камеры и системы рекуперации холода требуют значительных начальных капиталовложений

Метод гидроструйного измельчения был предложен около 30 лет назад [47], однако высокая энергопотребность, связанная с перекачкой воды до требуемого давления, делает его коммер-

чески выгодным только для шин автобусов и грузовиков [48]. Процесс включает распыление концентрированной струи воды на перерабатываемый материал. Другими словами, энергия воды

используется для выполнения механической работы, т.е. удаление материала прямо в том месте, на которое попадает вода. Повреждения, вызываемые струей воды сверхвысокого давления, возникают по нескольким причинам: кавитационное повреждение, воздействие водяной струи, динамическое давление водяной струи, усталостное разрушение сверхвысокой мощности и водяной клин. Это приводит к отделению резины и текстиля от металлических частей шины. Когда отработанные шины разрезаются струей воды, резина в шинах отделяется, в то время как корд не может быть отрезан из-за высокой твердости. Таким образом, его можно автоматически отделить от резины. Это является главным достоинством использования данного метода [49]. Основными недостатками гидроструйного метода являются высокая стоимость оборудования и его быстрый износ, необходимость дополнительной очистки воды и значительные энергозатраты.

При гидроструйном измельчении пропила имеет Y-образную форму. Верхняя часть пропила широкая, и уменьшается с увеличением глубины пропила, образуя верхнюю секцию Y-образной формы. Когда ширина достигает критического значения, пропил тянется вниз по прямой линии, составляющей дно сечения пропила. При ударе высокоскоростной струи воды о резиновую пластину поверхность резины подвергается упругой деформации из-за особых физических свойств резиновых материалов. Ткани резины в ямке, вызванные упругой деформацией, находятся под действием силы как растяжения, так и сдвига. Превышение максимального значения упругой деформации, сопровождается смятием поверхности резины и появлением начальной точки разрыва. С увеличением времени подачи струи диапазон измельчения и глубина пропила постепенно увеличиваются. Однако увеличение диапазона смятия требует больших усилий для концентрации напряжения. Так же, увеличение глубины приводит к увеличению дистанции отвода струи, что будет способствовать рассеиванию большего количества энергии. Таким образом, ширина становится узкой. Когда ширина достигает критического значения, воздействие струи на поверхность резины резко уменьшается, а разрушение в основном сопровождается растеканием воды по щелям и коррозией измельченного резинового порошка. Поэтому направление разреза идет вдоль мест с самыми слабыми молекулярными силами. Именно по этой причине пропил получается неровным [50].

Метод мокрого измельчения характеризуется медленно работающей мельницей с зацепляющимися шлифовальными кругами с добавле-

нием воды. Поверхность измельчения (длина зазора для измельчения) значительно увеличивается за счет зацепляющих дисков. Эти диски отличаются высокопрофилированной поверхностью для обеспечения сбора и измельчения материала. Вода добавляется непосредственно в процессе помола, для поддержания низкой температуры материала, которая на выходе крошки из мельницы не превышает 90 °С. Примерно через 30 секунд после упаковки в мешки температура материала составляет уже всего 40 °С. Это существенное преимущество, так как при механическом измельчении в обычных условиях часто используются критически высокие температуры материала, что может привести к неконтролируемому возгоранию. Несмотря на добавление воды, полученный материал выходит очень сухим [51].

Еще одним вариантом получения резиновой крошки является так называемая озоновая резка. Это процесс, приводящий к растрескиванию резины и отделению от нее армирующих элементов без механического разрезания или дробления в первую очередь в местах концентрации напряжений. Процесс происходит в озоновой камере. Озон действует как «химический нож», в то время как резина отделяется от металлического и текстильного каркасов. Поэтому процесс озонирования происходит по полостям «разреза», при этом резина практически полностью сохраняет свои свойства [52].

Также известны методы получения резиновой крошки с помощью ультразвука [53]. Такой подход позволяет получать измельченную резину с хорошим гранулярным составом крошки и средним размером частиц в диапазоне 100–150 мкм. Более того, результаты показали, что применение ультразвука во время измельчения отходов резины снижает потребление энергии и одновременно повышает эффективность производства за счет увеличения скорости измельчения.

Выполненный анализ существующих методов переработки автомобильных шин в резиновую крошку, позволил разработать обобщенную схему по методам переработки автомобильных шин, которая представлена ниже (рис. 2).

Как неполярный материал, резиновая крошка имеет слабую способность к связыванию с цементирующими материалами. Для улучшения некоторых ее свойств, было предложено резиновую крошку предварительно обрабатывать. Кроме того, на поверхности отходов резины присутствуют кислотные вещества, которые влияют на процессы цементации между резиновой крошкой и цементом. Чтобы улучшить связывание систем, в исследовании [54] резиновую крошку по-

гружали в 3 % щелочной раствор NaOH, в результате такой обработки наблюдается удаление кислотных вещества с поверхности резины и обнажение полярных связей внутри резины, которые могут тесно связываться с цементом [55]. Последовательность предположительного процесса можно описать следующим образом, сначала модификатор добавляют постепенно, при этом в резиновую крошку выливают половину раствора

NaOH и непрерывно перемешивают. Через 15 мин выливают оставшийся модификатор и перемешивают еще 15 мин. Смесь оставляют на 12 ч, затем промывают чистой водой несколько раз, пока поверхность резиновой крошки не очистится от любой обнаруживаемой жирности. Затем ее кладут на ровную поверхность и сушат для последующего использования.

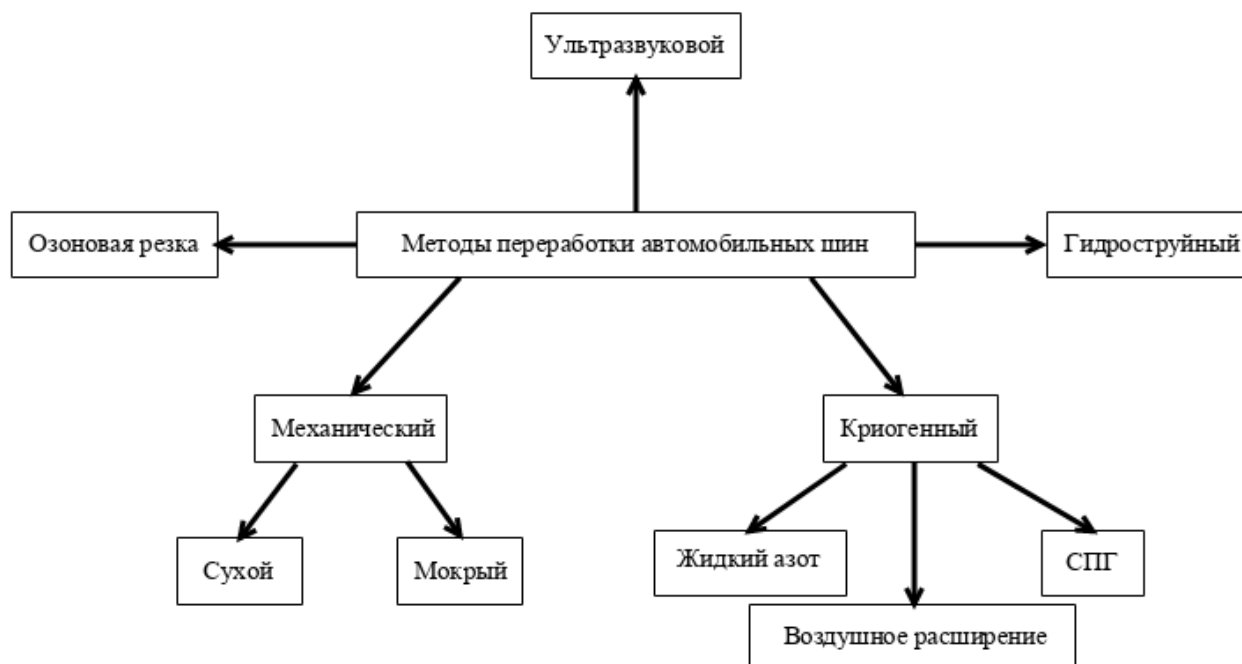


Рис. 2. Методы переработки автомобильных шин

С помощью подготовленной таким образом резиновой крошки были приготовлены бетонные смеси с коэффициентами замены мелких заполнителей 10 % и 20 %, а также контрольная смесь

бетона марки С30 [54]. Составы смесей представлены в таблице 4.

Таблица 4

Состав бетонных смесей [54]

Состав смеси	Контрольный образец	Смесь № 1	Смесь № 2
Цемент, кг/м ³	280	280	280
Резиновая крошка, кг/м ³	0	34,7	69,4
Мелкий заполнитель, кг/м ³	848,0	763,2	678,4
Крупный заполнитель, кг/м ³	1037	1037	1037
Зола, кг/м ³	70	70	70
Вода, кг/м ³	175	175	175
Пластификатор, кг/м ³	5,7	5,7	5,7

Для обеспечения равномерного смешивания, резиновая крошка и мелкий заполнитель сначала смешивались в смесителе в сухом виде в течение 5 мин со скоростью 60 об/мин. Цемент, зола и крупный заполнитель последовательно добавлялись в смеситель и перемешивались в течение 3 мин со скоростью 60 об/мин. Вода и пластификатор равномерно смешивались, выливались в смеситель и перемешивались в течение 3 мин со скоростью 90 об/мин. Подготовленная бетонная

смесь закладывалась форму куб в два этапа, примерно одинаковыми порциями. В процессе заполнения формы использовалась ручная вибрация для предотвращения всплывания резиновой крошки. При первой вибрации трамбовочный стержень вставлялся несколько раз в спиральном направлении от края к центру, для устранения воздуха внутри смеси. При второй вибрации трамбовочный стержень должен был оставаться вертикальным, полностью проникать в верхний

слой и на 20-30 мм в нижний слой. Через 24 ч образец распалубливался и помещался в камеру для выдерживания при постоянной температуре 20 ± 1 °С и относительной влажностью 95 % на 28 дней. Далее выполнялось тестирование свойств образцов после их нагрева до 300 °С, 500 °С и 700 °С.

С увеличением температуры нагрева, цвет образцов становился светлее, поверхностные трещины раскрывались, а потеря массы образца увеличивалась. С повышением содержания резиновой крошки, трещины на поверхности образца становились шире, потеря массы увеличивалась, а теплопроводность бетона уменьшалась. С повышением температуры нагрева, прочность на сжатие куба контрольной смеси увеличивалась при 300 °С, в то время как прочность на сжатие бетона с добавлением резиновой крошки уменьшалась. Прочность на разрыв при расколе, прочность на осевое сжатие и модуль упругости уменьшались для всех видов бетона. Прочность на сжатие, прочность на растяжение при скалывании и модуль упругости уменьшались более заметно с увеличением содержания резиновой крошки.

Выводы. Проблема утилизации изношенных автомобильных шин остается одной из наиболее актуальных в контексте экологической устойчивости и рационального использования ресурсов. Шины, состоящие из материалов, устойчивых к естественному разложению, накапливаются в огромных количествах, создавая серьезные экологические и экономические проблемы. Несмотря на прогресс в области переработки, значительная часть шин по-прежнему оказывается на свалках. В связи с этим, поиск инновационных методов рециклинга шин становится важной задачей для науки и промышленности.

В статье рассмотрены различные методы переработки автомобильных шин, включая основные: механическое, криогенное, гидроструйное и мокрое измельчение. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, связанные с энергозатратами, качеством получаемой резиновой крошки и экономической эффективностью. Механическое измельчение, несмотря на свою распространенность, сопровождается риском возгорания из-за повышения температуры материала. Криогенные методы, основанные на использовании жидкого азота или сжиженного природного газа, позволяют получать резиновую крошку с более гладкой поверхностью, но требуют значительных капиталовложений. Гидроструйное измельчение, хотя и эффективно для отделения резины от металлических элементов, отличается высокой стоимостью обо-

рудования и энергозатратами. Мокрое измельчение и ультразвуковая обработка предлагают альтернативные подходы, снижающие температуру процесса и повышающие эффективность производства.

Особое внимание уделено применению резиновой крошки в строительных материалах, таких как бетон. Исследования показали, что добавление резиновой крошки в бетонные смеси улучшает их звукоизоляционные свойства, пластичность и устойчивость к динамическим нагрузкам, хотя и снижает механическую прочность. Для преодоления этих ограничений предложены методы предварительной обработки резины, такие как щелочная обработка, а также введение добавок, улучшающих адгезию между резиной и цементной матрицей.

В заключение важно отметить, что утилизация автомобильных шин требует комплексного подхода, включающего как совершенствование технологий переработки, так и разработку новых областей применения резиновой крошки. Увеличение нормативов утилизации, установленных законодательством, стимулирует производителей и исследователей к поиску более эффективных решений. Однако для достижения значительных результатов необходимы дальнейшие исследования, нацеленные на оптимизацию процессов переработки и расширение возможностей использования резиновой крошки в различных отраслях промышленности. Только при условии интеграции усилий науки, бизнеса и государства можно достичь устойчивого баланса между экологическими и экономическими интересами в области утилизации отходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sitepu M.H., Matondang A.R., Sembiring M.T. Used tires recycle management and processing: A review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 801. №. 1. 012116. DOI: 10.1088/1757-899X/801/1/012116
2. Čabalová I., Ház A., Krilek J., Bubeníková T., Melicherčík J., Kuvík T. Recycling of wastes plastics and tires from automotive industry // Polymers. 2021. Vol. 13. №. 13. Pp. 2210–2223. DOI: 10.3390/polym13132210
3. Torretta V., Rada E. C., Ragazzi M., Trulli E., Istrate I. A., Cioca L. I. Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review // Waste management. 2015. Vol. 45. Pp. 152–160. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.04.018

4. Антонова Е. Л., Сышко В. Е., Кузьменкова Н. В., Шаповалов В. М., Зотов С. В. Экологические проблемы переработки отходов // ICTAI-2022–2022. Pp. 88–90.
5. Reschner K. Scrap tire recycling // A summary of prevalent disposal and recycling methods. Entire-Engineering, Berlin. 2008. Vol. 1. Pp. 215–240.
6. Valentini F., Pegoretti A. End-of-life options of tyres. A review // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2022. Vol. 5. №. 4. Pp. 203–213. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.08.006
7. Cerminara G., Cossu R. Waste input to landfills // Solid Waste Landfilling; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2018. 1190 p.
8. Jiang Y., Li X., Luo H., Yin, S., Kaynak O. Quo vadis artificial intelligence? // Discover Artificial Intelligence. 2022. Vol. 2. №. 1. Pp. 4–9. DOI: 10.1007/s44163-022-00022-8
9. Chen R., Li Q., Zhang Y., Xu X., Zhang D. Pyrolysis kinetics and mechanism of typical industrial non-tire rubber wastes by peak-differentiating analysis and multi kinetics methods // Fuel. 2019. Vol. 235. Pp. 1224–1237. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.121
10. Chen B., Zheng D., Xu R. Disposal methods for used passenger car tires: one of the fastest growing solid wastes in China // Green Energy Environ. 2022. Vol. 7. №. 6. Pp. 1298–1309. DOI: 10.1016/j.gee.2021.02.003
11. Bockstal L., Berchem T., Schmetz Q., Richel A. Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 236. 117574. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.07.049
12. Крюкова М.А., Баранова О.Н., Пастухов С.А., Синицин В.Ю. Как утилизируют шины в России // Наука, студенчество, образование: актуальные вопросы. 2023. С. 33.
13. Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А., Ткачева А.И. Одежда ездового полотна мостового сооружения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №. 4. С. 21–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-21-35
14. Гусев А.Д., Петухова Н.А., Карпущин Г.А. К вопросу переработки изношенных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №. 6. С. 11–14.
15. Shymchuk O., Protsiuk V. Exploring the possibility of using recycled car tires in road construction // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2023. Vol. 2684. №. 1. DOI: 10.1063/5.0133507
16. Kida M., Ziembowicz S., Pochwat K., Koszelnik P. Experimental and computational hazard prediction associated with reuse of recycled car tire material // Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 438. 129489. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129489
17. Ren F., Mo J., Wang Q., Ho J. C. Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: An overview // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 343. 128049. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128049
18. Youssf O., Mills J. E., Ellis M., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Gravina R. J. Practical application of crumb rubber concrete in residential slabs // Structures. Elsevier, 2022. Vol. 36. Pp. 837–853. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.062
19. Bisht K., Ramana P.V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete // Construction and building materials. 2017. Vol. 155. Pp. 811–817. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131
20. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 73. Pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107
21. Mohammadi I., Khabbaz H., Vessalas K. In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 71. Pp. 456–471. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085
22. Corinaldesi V., Mazzoli A., Moriconi G. Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles // Materials & Design. 2011. Vol. 32. №. 3. Pp. 1646–1650. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.013
23. Adeboje A. O., Kupolati W. K., Sadiku E. R., Ndambuki J. M. Characterization of modified crumb rubber concrete // International Journal of Sustainable Development and Planning, IIETA. 2020. Vol. 15. №. 3. Pp. 377–383.
24. Akinyele J. O., Salim R. W., Kupolati W. K. Production of lightweight concrete from waste tire rubber crumb // Engineering Structures and Technologies. 2016. Vol. 8. №. 3. Pp. 108–116. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1209727
25. Cai H., Yuan B., Yang F., Chen L., Feng W., Liang Y. Dynamic three-point flexural performance of unsaturated polyester polymer concrete at different curing ages // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. 103449. DOI: 10.1016/j.job.2021.103449
26. Roychand R., Gravina R. J., Zhuge Y., Ma X., Youssf O., Mills J. E. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 237. 117651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117651
27. Si R., Guo S., Dai Q. Durability performance of rubberized mortar and concrete with

NaOH-Solution treated rubber particles // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 153. Pp. 496–505. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.085

28. Li P., Khan M. A., Galal A. M., Awan H. H., Zafar A., Javed M. F. Sustainable use of chemically modified tyre rubber in concrete: Machine learning based novel predictive model // *Chemical Physics Letters*. 2022. Vol. 793. 139478. DOI: 10.1016/j.cplett.2022.139478

29. Hernandez-Olivares F., Barluenga G., Bollati M., Witoszek B. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete // *Cement and concrete research*. 2002. Vol. 32. №. 10. Pp. 1587–1596.

30. Yu Z., Tang R., Li F., Hu Y., Liu G., Qin Y., Huang Q. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete (RC) with different rubber replacement ratio // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. Pp. 123105. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123105

31. Assaggaf R.A., Ali M.R., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M. Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber—A review // *Journal of materials research and technology*. 2021. Vol. 11. Pp. 1753–1798. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.019

32. He L., Cai H., Huang Y., Ma Y., Van Den Bergh W., Gaspar L. Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 35. 101991. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101991

33. He S., Jiang Z., Chen H., Chen Z., Ding J., Deng H., Mosallam A. S. Mechanical properties, durability, and structural applications of rubber concrete: A state-of-the-art-review // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. №. 11. Pp. 8541–8557. DOI: 10.3390/su15118541

34. Liu M., Lu J., Jiang W., Ming P. Study on fatigue damage and fatigue crack propagation of rubber concrete // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 65. 105718. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105718

35. Assaggaf R.A., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Amoudi O.S.B., Ahmad S., Ibrahim M. Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 318. 126030. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126030

36. Gupta T., Patel K. A., Siddique S., Sharma R. K., Chaudhary S. Prediction of mechanical properties of rubberised concrete exposed to elevated temperature using ANN // *Measurement*. 2019. Vol. 147. 106870. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106870

37. Khern Y.C., Paul S.C., Kong S.Y., Babafemi A.J., Anggraini V., Miah M.J., Šavija B. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete // *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Pp. 90–99. DOI: 10.3389/fmats.2020.00090

38. Formela K. Sustainable development of waste tires recycling technologies—recent advances, challenges and future trends // *Advanced industrial and engineering polymer research*. 2021. Vol. 4. №. 3. Pp. 209–222. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004

39. Mohajerani A., Burnett L., Smith J. V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M. T. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. 104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

40. Liu L., Cai G., Zhang J., Liu X., Liu K. Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 126. 109831. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109831

41. Nadal M., Rovira J., Díaz-Ferrero J., Schuhmacher M., Domingo J. L. Human exposure to environmental pollutants after a tire landfill fire in Spain: Health risks // *Environment international*. 2016. Vol. 97. Pp. 37–44. DOI: 10.1016/j.envint.2016.10.016

42. Adhikari J., Das A., Sinha T., Saha P., Kim J. K. Grinding of waste rubber. 2018. 337 p.

43. Yerezhep D., Tychengulova A., Sokolov D., Aldiyarov A. A. multifaceted approach for cryogenic waste tire recycling // *Polymers*. 2021. Vol. 13. №. 15. Pp. 2494–2501. DOI: 10.3390/polym13152494

44. Wang Q., Huang Z., Liu Z. Overview of high-value reuse and grinding at sub-zero temperature of scrap rubber tires // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, - 2019. Vol. 472. №. 1. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/472/1/012071

45. Li L. Research progress and trend of low temperature grinding technology for waste rubber powder // *Recyclable Resources and Circular Economy*. 2011. T. 10. Pp. 38–41.

46. Xiong Y., Hua B., Luo D. The pressure of natural gas pipe network can be used for the refrigeration equipment of waste rubber crushing J // *Modern Chemical Industry*. 2007. Vol. 1. Pp. 49–52.

47. Bowles A.J., Fowler G.D., O'Sullivan C., Parker K. Sustainable rubber recycling from waste tyres by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis // *Sustainable materials and technologies*. 2020. Vol. 25. e00173. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00173

48. Wang Z., Kang Y., Cheng Y. Multiresponse optimization of process parameters in water jet pulverization via response surface methodology // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2017. Vol. 18. Pp. 1855–1871. DOI: 10.1007/s12541-017-0215-0
49. Hu Y., Kang Y., Wang X. C., Li X. H., Long X. P., Zhai G. Y., Huang M. Mechanism and experimental investigation of ultra high pressure water jet on rubber cutting // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. Vol. 15. Pp. 1973–1978. DOI: 10.1007/s12541-014-0553-0
50. Zefeng W., Yong K., Zhao W., Yi C. Recycling waste tire rubber by water jet pulverization: Powder characteristics and reinforcing performance in natural rubber composites // Journal of Polymer Engineering. 2018. Vol. 38. №. 1. Pp. 51–62. DOI: 10.1515/polyeng-2016-0383
51. Hoyer S., Kroll L., Sykutera D. Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 43. Pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.135
52. Lapkovskis V., Mironovs V., Kasperovich A., Myadelets V., Goljandin D. Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: A short review of end-of-life mechanical processing methods // Recycling. 2020. Vol. 5. №. 4. Pp. 32–40. DOI: 10.3390/recycling5040032
53. Dobrotă D., Dobrotă G. An innovative method in the regeneration of waste rubber and the sustainable development // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. Pp. 3591–3599. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.022
54. Ahmad J., Zhou Z., Majdi A., Alqurashi M., Deifalla A. F. Overview of Concrete Performance Made with Waste Rubber Tires: A Step toward Sustainable Concrete // Materials. 2022. Vol. 15. №. 16. Pp. 5518–5527. DOI: 10.3390/ma15165518
55. Liu J., Tran P. Cement mortar containing crumb rubber coated with geopolymer: From microstructural properties to compressive strength // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 383. 131284. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131284

Информация об авторах

Высоцкая Марина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: roruri@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Токарев Владимир Алексеевич, аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: tokareva161@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Курлыкина Анастасия Владимировна, аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: anastasiyakurlikina@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Грищенко Михаил Сергеевич, студент кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: misha10944@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Самойлов Максим Игоревич, аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги им. А.М. Гридчина». E-mail: sanvstaaj651a@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.02.2025 г.

© Высоцкая М.А., Токарев В.А., Курлыкина А.В., Грищенко М.С., Самойлов М.И., 2025

***Vysotskaya M.A., Tokarev V.A., Kurlykina A.V., Grishchenko M.S., Samoylov M.I.**

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: tokareva161@mail.ru

RECYCLING OF CAR TIRES. METHODS OF OBTAINING RUBBER CRUMB. REVIEW

Abstract. The article is devoted to the urgent problem of recycling worn-out car tires, which represent a significant source of waste that negatively affects the environment. The authors consider modern tire recycling methods, including mechanical, cryogenic, water jet, and wet shredding. The study presents a generalized analysis of modern methods of recycling automobile tires into rubber chips. Each of the methods is analyzed

in terms of efficiency, energy consumption, and quality of the resulting rubber chips. Special attention is paid to the use of rubber chips in building materials such as concrete. Studies show that the addition of rubber improves sound insulation properties, ductility and resistance to dynamic loads, although it reduces mechanical strength. To overcome these limitations, methods of pretreatment of rubber, such as alkali treatment, and the introduction of additives that improve adhesion at the interface of dispersed rubber and cement matrix are proposed. The article also touches on the legislative aspects of tire recycling, including regulations and obligations of manufacturers. In conclusion, the need for further research and development of innovative technologies is emphasized in order to increase the efficiency of processing and expand the areas of application of rubber chips. Solving the tire recycling problem requires an integrated approach that combines the efforts of science, business and government to achieve environmental sustainability and rational use of resources.

Keywords: automobile tires, rubber chips, recycling, tire recycling methods, sustainable development, concrete mixes.

REFERENCES

1. Sitepu M.H., Matondang A.R., Sembiring M. T. Used tires recycle management and processing: A review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 801. No. 1. 012116. DOI: 10.1088/1757-899X/801/1/012116
2. Čabalová I., Ház A., Krilek J., Bubeníková T., Melicherčík J., Kuvik T. Recycling of wastes plastics and tires from automotive industry. *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 13. Pp. 2210–2223. DOI: 10.3390/polym13132210
3. Torretta V., Rada E. C., Ragazzi M., Trulli E., Istrate I.A., Cioca L.I. Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste management*. 2015. Vol. 45. Pp. 152–160. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.04.018
4. Antonova Ye. L., Sitsko V. E., Kuzmenkova N. V., Shapovalov V. M., Zotov S. V. Environmental problems of waste recycling [Ekologicheskie problemi pererabotki otkhodov]. ICTAI-2022. 2022. Pp. 88–90.
5. Reschner K. Scrap tire recycling. A summary of prevalent disposal and recycling methods. *Entire-Engineering*, Berlin. 2008. Vol. 1. Pp. 215–240.
6. Valentini F., Pegoretti A. End-of-life options of tyres. A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. Vol. 5. No. 4. Pp. 203–213. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.08.006
7. Cerminara G., Cossu R. Waste input to landfills. *Solid Waste Landfilling*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2018. 1190 p.
8. Jiang Y., Li X., Luo H., Yin, S., Kaynak O. Quo vadis artificial intelligence? *Discover Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 2. No. 1. Pp. 4–9. DOI: 10.1007/s44163-022-00022-8
9. Chen R., Li Q., Zhang Y., Xu X., Zhang D. Pyrolysis kinetics and mechanism of typical industrial non-tyre rubber wastes by peak-differentiating analysis and multi kinetics methods. *Fuel*. 2019. Vol. 235. Pp. 1224–1237. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.121
10. Chen B., Zheng D., Xu R. Disposal methods for used passenger car tires: one of the fastest growing solid wastes in China. *Green Energy Environ* 7 (6). 2022. Vol. 7. No. 6. Pp. 1298–1309. DOI: 10.1016/j.gee.2021.02.003
11. Bockstal L., Berchem T., Schmetz Q., Richel A. Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 236. 117574. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.07.049
12. Kryukova M. A., Baranova O.N., Pastukhov S.A., Sinitsin, V.YU. How tires are recycled in Russia [Kak utiliziruyut shiny v Rossii]. *Nauka, studentchestvo, obrazovanie: aktual'nye voprosy*. 2023. Pp. 33. (rus)
13. Vysotskaya M.A., Kurlykina A.V., Kuznetsov D.A., Tkacheva A.I. Clothing of the roadway of a bridge structure [Odezhda ezdovogo polotna mostovogo sooruzheniya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. No. 4. Pp. 21–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-21-35 (rus)
14. Gusev A.D., Petukhova N.A., Karpukhin G.A. On the issue of recycling worn-out car tires [K voprosu pererabotki iznoshennykh avtomobil'nykh shin]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2014. No. 6. Pp. 11–14. (rus)
15. Shymchuk O., Protsiuk V. Exploring the possibility of using recycled car tires in road construction. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2023. Vol. 2684. No. 1. DOI: 10.1063/5.0133507
16. Kida M., Ziembowicz S., Pochwat K., Koszelnik P. Experimental and computational hazard prediction associated with reuse of recycled car tire material. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 438. 129489. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129489
17. Ren F., Mo J., Wang Q., Ho J. C. Crumb rubber as partial replacement for fine aggregate in concrete: An overview. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 343. 128049. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128049
18. Youssf O., Mills J. E., Ellis M., Benn T., Zhuge Y., Ma X., Gravina R. J. Practical application of crumb rubber concrete in residential slabs. *Structures*. Elsevier, 2022. Vol. 36. Pp. 837–853. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.062

19. Bisht K., Ramana P. V. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and building materials*. 2017. Vol. 155. Pp. 811–817. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.131
20. Holmes N., Browne A., Montague C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73. Pp. 195–204. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.107
21. Mohammadi I., Khabbaz H., Vessalas K. In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 71. Pp. 456–471. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085
22. Corinaldesi V., Mazzoli A., Moriconi G. Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. No. 3. Pp. 1646–1650. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.013
23. Adeboje A.O., Kupolati W.K., Sadiku E.R., Ndambuki J.M. Characterization of modified crumb rubber concrete. *International Journal of Sustainable Development and Planning, IIETA*. 2020. Vol. 15. No. 3. Pp. 377–383.
24. Akinyele J.O., Salim R.W., Kupolati W.K. Production of lightweight concrete from waste tire rubber crumb. *Engineering Structures and Technologies*. 2016. Vol. 8. No. 3. Pp. 108–116. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1209727
25. Cai H., Yuan B., Yang F., Chen L., Feng W., Liang Y. Dynamic three-point flexural performance of unsaturated polyester polymer concrete at different curing ages. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 45. 103449. DOI: 10.1016/j.job.2021.103449
26. Roychand R., Gravina R.J., Zhuge Y., Ma X., Youssf O., Mills J. E. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 237. 117651. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117651
27. Si R., Guo S., Dai Q. Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 153. Pp. 496–505. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.085
28. Li P., Khan M. A., Galal A. M., Awan H. H., Zafar A., Javed M. F. Sustainable use of chemically modified tyre rubber in concrete: Machine learning based novel predictive model. *Chemical Physics Letters*. 2022. Vol. 793. 139478. DOI: 10.1016/j.cplett.2022.139478
29. Hernandez-Olivares F., Barluenga G., Bollati M., Witoszek B. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and concrete research*. 2002. Vol. 32. No. 10. Pp. 1587–1596.
30. Yu Z., Tang R., Li F., Hu Y., Liu G., Qin Y., Huang Q. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete (RC) with different rubber replacement ratio. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 288. Pp. 123105. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123105
31. Assaggaf R.A., Ali M.R., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M. Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber—A review. *Journal of materials research and technology*. 2021. Vol. 11. Pp. 1753–1798. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.019
32. He L., Cai H., Huang Y., Ma Y., Van Den Bergh W., Gaspar L. Research on the properties of rubber concrete containing surface-modified rubber powders. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 35. 101991. DOI: 10.1016/j.job.2020.101991
33. He S., Jiang Z., Chen H., Chen Z., Ding J., Deng H., Mosallam A. S. Mechanical properties, durability, and structural applications of rubber concrete: A state-of-the-art-review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 11. Pp. 8541–8557. DOI: 10.3390/su15118541
34. Liu M., Lu J., Jiang W., Ming P. Study on fatigue damage and fatigue crack propagation of rubber concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 65. Pp. 105718. DOI: 10.1016/j.job.2022.105718
35. Assaggaf R.A., Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Amoudi O. S. B., Ahmad S., Ibrahim M. Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 318. 126030. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126030
36. Gupta T., Patel K. A., Siddique S., Sharma R. K., Chaudhary S. Prediction of mechanical properties of rubberised concrete exposed to elevated temperature using ANN. *Measurement*. 2019. Vol. 147. 106870. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106870
37. Khern Y.C., Paul S.C., Kong S.Y., Babafemi A.J., Anggraini V., Miah M.J., Šavija B. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete. *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Pp. 90–99. DOI: 10.3389/fmats.2020.00090
38. Formela K. Sustainable development of waste tires recycling technologies—recent advances, challenges and future trends. *Advanced industrial and engineering polymer research*. 2021. Vol. 4. No. 3. Pp. 209–222. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004
39. Mohajerani A., Burnett L., Smith J. V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M. T. Recycling

waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. 104679. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104679

40. Liu L., Cai G., Zhang J., Liu X., Liu K. Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 126. 109831. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109831

41. Nadal M., Rovira J., Díaz-Ferrero J., Schuhmacher M., Domingo J. L. Human exposure to environmental pollutants after a tire landfill fire in Spain: Health risks. *Environment international*. 2016. Vol. 97. Pp. 37–44. DOI: 10.1016/j.envint.2016.10.016

42. Adhikari J., Das A., Sinha T., Saha P., Kim J. K. Grinding of waste rubber. 2018. 337 p.

43. Yerezhep D., Tychengulova A., Sokolov D., Aldiyarov A. A. multifaceted approach for cryogenic waste tire recycling. *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 15. Pp. 2494–2501. DOI: 10.3390/polym13152494

44. Wang Q., Huang Z., Liu Z. Overview of high-value reuse and grinding at sub-zero temperature of scrap rubber tires. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 472. No. 1. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/472/1/012071

45. Li L. Research progress and trend of low temperature grinding technology for waste rubber powder. *Recyclable Resources and Circular Economy*. 2011. Vol. 10. Pp. 38–41.

46. Xiong Y., Hua B., Luo D. The pressure of natural gas pipe network can be used for the refrigeration equipment of waste rubber crushing J. *Modern Chemical Industry*. 2007. Vol. 1. Pp. 49–52.

47. Bowles A.J., Fowler G.D., O'Sullivan C., Parker K. Sustainable rubber recycling from waste tyres by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis. *Sustainable materials and technologies*. 2020. Vol. 25. e00173. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00173

48. Wang Z., Kang Y., Cheng Y. Multiresponse optimization of process parameters in water jet pulverization via response surface methodology. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2017. Vol. 18. Pp. 1855–1871. DOI: 10.1007/s12541-017-0215-0

49. Hu Y., Kang Y., Wang X. C., Li X. H., Long X. P., Zhai G. Y., Huang M. Mechanism and experimental investigation of ultra high pressure water jet on rubber cutting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2014. Vol. 15. Pp. 1973–1978. DOI: 10.1007/s12541-014-0553-0

50. Zefeng W., Yong K., Zhao W., Yi C. Recycling waste tire rubber by water jet pulverization: Powder characteristics and reinforcing performance in natural rubber composites. *Journal of Polymer Engineering*. 2018. Vol. 38. No. 1. Pp. 51–62. DOI: 10.1515/polyeng-2016-0383

51. Hoyer S., Kroll L., Sykutera D. Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 43. Pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.135

52. Lapkovskis V., Mironovs V., Kasperovich A., Myadelets V., Goljandin D. Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: A short review of end-of-life mechanical processing methods. *Recycling*. 2020. Vol. 5. No. 4. Pp. 32–40. DOI: 10.3390/recycling5040032

53. Dobrotă D., Dobrotă G. An innovative method in the regeneration of waste rubber and the sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 172. Pp. 3591–3599. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.022

54. Ahmad J., Zhou Z., Majdi A., Alqurashi M., Deifalla A. F. Overview of Concrete Performance Made with Waste Rubber Tires: A Step toward Sustainable Concrete. *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 16. Pp. 5518–5527. DOI: 10.3390/ma15165518

55. Liu J., Tran P. Cement mortar containing crumb rubber coated with geopolymer: From microstructural properties to compressive strength. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 383. 131284. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131284

Information about the authors

Vysotskaya, Marina A.I. PhD, Assistant professor. E-mail: roruri@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tokarev, Vladimir A.I. Postgraduate student. E-mail: tokareva161@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kurlykina, Anastasia V. Postgraduate student. E-mail: anastasiyakurlikina@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Grishchenko Mihail S. Student. E-mail: mishal10944@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Samoylov, Maksim I. Postgraduate student. E-mail:sanvstaaj651a@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 27.02.2025

Для цитирования:

Высоцкая М.А., Токарев В.А., Курлыкина А.В., Грищенко М.С. Самойлов М.И. Рециклинг автомобильных шин. Способы получения резиновой крошки. Обзор// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-32-46

For citation:

Vysotskaya M.A., Tokarev V.A., Kurlykina A.V., Grishchenko M.S., Samoylov M.I. Recycling of car tires. Methods of obtaining rubber crumb. Review. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 10. Pp. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-32-46