



УДК 691.16

doi: 10.55287/22275398_2026_60_22

ДОБАВКА НА ОСНОВЕ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

А. В. Курлыкина

М. А. Высоцкая

М. И. Самойлов

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

В статье представлены результаты исследования модифицирующей добавки на основе активированной резиновой крошки. Изучено ее влияние на реологические свойства битумного вяжущего при концентрациях: 4%, 7% и 10% от массы битума. Установлено, что оптимальное содержание добавки, обеспечивающее оптимальное сочетание вязкости и однородности системы составляет 7%. Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего изучения механизмов взаимодействия резиновой крошки с битумной матрицей, оптимизации составов и технологических режимов приготовления модифицированных вяжущих, что обеспечит более интенсивное внедрение резиносодержащих добавок в дорожное строительство.

Ключевые слова

Модифицированный битум, активированная резиновая крошка, комплексный модификатор, динамическая вязкость, микроструктура.

Дата поступления в редакцию

30.08.2026

Дата принятия к печати

03.09.2026

Новым направлением развития асфальтобетонных смесей стало вовлечение в технологию их приготовления техногенных отходов, побочных продуктов производства и вторичных ресурсов, что обусловлено пристальным вниманием мировой общественности к вопросам экологии и ресурсосбережения [1]. При этом предпочтение отдается материалам, которые с технической и технологической точек зрения характеризуются стабильностью химического состава и физических свойств, а с экономической — доступны и способствуют снижению затрат на производство новых материалов [2]. Подобным сырьем является резиновая крошка (РК), получаемая при переработке изношенных автомобильных шин. Благодаря своей эластичности и химической стойкости она рассматривается как перспективный компонент для модификации битумов.

Однако, эффективное применение РК в составе асфальтобетонных смесей сопряжено с необходимостью учитывать ряд факторов: дисперсность резиновой крошки, ее состав и химические свойства, групповой состав битума, зерновой состав минеральной части асфальтобетона, а также технологию введения и способа активации резиновой крошки [3 – 10]. Ключевым недостатком использования дробленной ре-

зины в исходном виде является ее склонность к набуханию с течением времени, приводящая к разуплотнению и разрушению покрытия уже через 2–3 года эксплуатации. По этой причине специалисты ведущих стран мира отказались от применения РК в неизменном виде в пользу более сложных, но эффективных комплексных добавок, способствующих направленному протеканию процессов деструкции и девулканизации резины в составе дорожного композита [3–10].

Актуальность разработки добавок на основе активированной РК в комбинации с функциональными компонентами, заключается в возможности получить инструмент, регулирующий технологические, реологические и эксплуатационные характеристики битума и асфальтобетона на его основе.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования использовались: измельченная резиновая крошка фр. 0–0,6 мм, пластификатор, окисленный синтетический воск, нефтеполимерная смола, целлюлозное волокно, битум нефтяной дорожный БНД 50/70.

Технологическая схема приготовления добавки предусматривает предварительную обработку дисперсной РК пластификатором. Перемешивание компонентов осуществляется до полного покрытия частиц РК пластифицирующим составом, затем смесь термостатируется в течение 12 ч при температуре 60–80°C. На завершающем этапе в композицию, согласно рецептуре, вводятся остальные компоненты. Готовая смесь поступает в лабораторный гранулятор «ZLSP-200» R-type, где посредством интенсивного сдвигового и сжимающего воздействия (1000–1200 кг/см²) осуществляется девулканизация и активация РК. Таким образом, механическое воздействие способствует разрыву поперечных серных связей, а пластификатор, распределенный в структуре резины, снижает энергию активации процесса, стабилизирует образующиеся фрагменты полимерной цепи и предотвращает их деструкцию. За счет комбинации высокой сдвиговой нагрузки, умеренной температуры и пластифицирующей среды запускаются процессы механохимической деструкции РК, которая вступает во взаимодействие с химически активированной мастичной частью.

Определение динамической вязкости осуществлялось согласно ГОСТ Р 58400.10-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения свойств с использованием динамического сдвигового реометра (DSR)». Сущность метода заключается в оценке сдвиговой устойчивости битумного вяжущего путем осцилляционной сдвиговой деформации образца и определения значений комплексного модуля сдвига и фазового угла. Для проведения измерений использовался динамический сдвиговый реометр (DSR) SmartPave 102.

Оценка степени диспергирования и распределения частиц добавки на основе РК в битуме осуществлялась методом сканирующей электронной микроскопии на приборе TESCAN MIRA 3 LMU.

Результаты исследования

Добавка представляет собой многокомпонентную систему, объединяющую модифицирующие (резиновая крошка, воск, пластификатор) и структурирующие (смола, целлюлоза, битум) компоненты. Синергетический эффект композиции обусловлен функциональным взаимодействием составляющих элементов, где РК выступает как эластичный армирующий наполнитель, воск и пластификатор регулируют вязкость и совместимость системы, целлюлоза и смола выполняют функцию структурирующих агентов, а битум связывает компоненты в единую гранулу, *рисунок 1*.

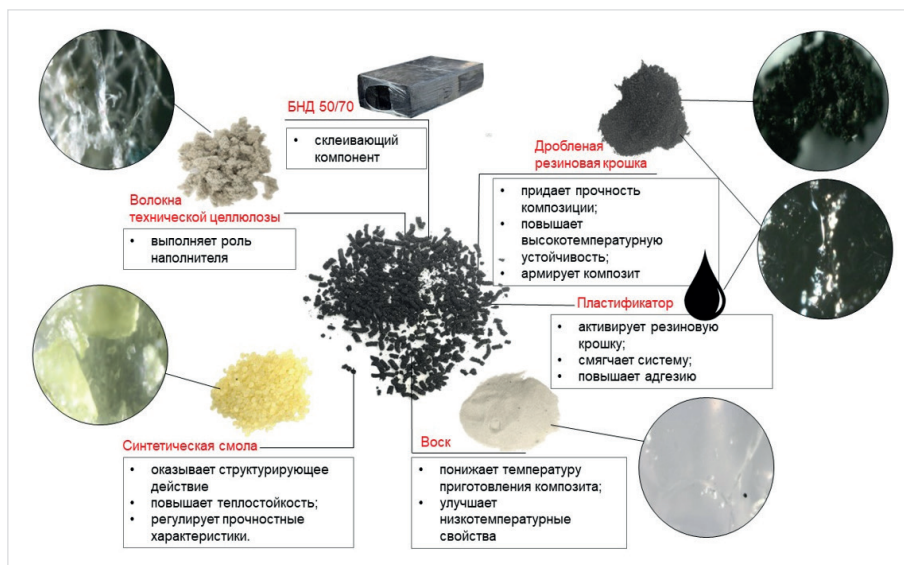


Рис. 1. Состав гранулированной добавки на основе резиновой крошки

Добавка вводилась в битум в трех концентрациях: 4%, 7% и 10% от массы битума, после чего было изучено ее влияние на структуру и реологические свойства битумного вяжущего. Процесс смешения осуществлялся при температуре 165°C. Перемешивание проводилось в течение различных временных интервалов с последующим отбором проб для оценки динамической вязкости и фиксации микроструктуры. Комплексный подход, включающий исследование реологических свойств и микроструктурный анализ на каждом этапе перемешивания, позволил установить взаимосвязь между концентрацией добавки, продолжительностью смешения, характером распределения модификатора в битумной матрице и реологическими характеристиками системы. Полученные зависимости позволили обосновать выбор оптимальной дозировки и времени перемешивания композиции.

Показатели динамической вязкости, полученные при варьировании концентрацией добавки и временем смешения, систематизированы на **рисунке 2**.

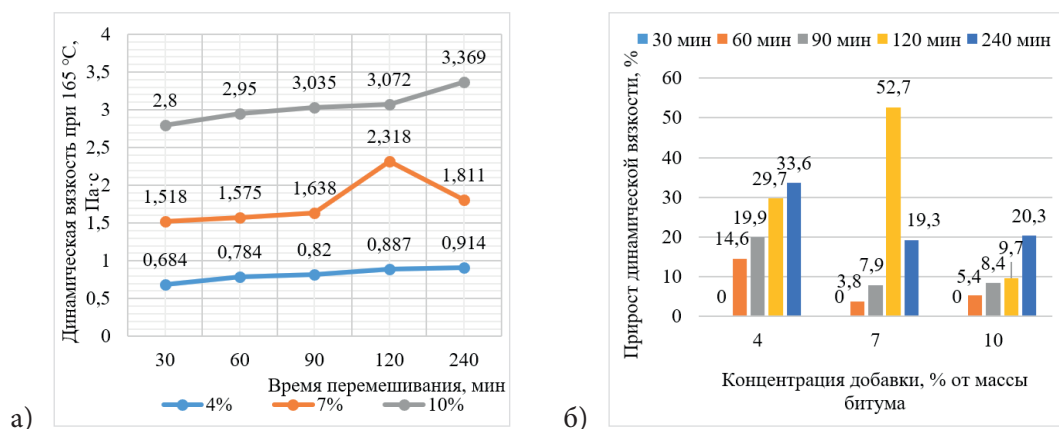


Рис. 2. Влияние концентрации модифицирующей добавки и времени: а) — динамическая вязкость битума; б) — прирост динамической вязкости битума

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что повышение содержания модифицирующей добавки от 4 до 10% от массы битума закономерно приводит к возрастанию динамической вязкости. При этом выявленные зависимости свидетельствуют о различных механизмах структурообразования в исследуемом диапазоне концентраций и времени смешивания. Так, при введении 4% добавки от массы битума зафиксирован плавный рост динамической вязкости. Изменение показателя при перемешивании от 30 до 240 мин составило с 0,684 до 0,914 Па·с, что соответствует приросту 33,6%. Подобная зависимость свидетельствует о равномерном протекании процессов набухания РК и структурирования под действием смолы и целлюлозного волокна без признаков деструкции. Система демонстрирует высокую стабильность во времени, однако значения вязкости остаются на относительно низком уровне, очевидно, что данная дозировка недостаточна для изменения эксплуатационных свойств вяжущего.

При концентрации добавки 7% наблюдается интенсивное увеличение динамической вязкости системы с 1,518 до 2,318 Па·с в интервале 30 – 120 мин, что соответствует приросту показателя на 52,7%. Данный временной интервал характеризуется активной фазой модификации битумного вяжущего, с физико-химическими преобразованиями в структуре композиционного материала. Очевидно, что рост вязкости обусловлен комплексом взаимосвязанных процессов: активным набуханием частиц активированной РК, формированием новых межмолекулярных связей и взаимодействием компонентов модифицирующей системы. На данном этапе происходит существенное изменение реологических характеристик вяжущего, при этом пластификатор и воск перестают маскировать увеличение вязкости, а нефтеполимерная смола инициирует процесс сшивания полимерных цепочек. Снижение вязкости на 240 мин перемешивания с 2,318 до 1,811 Па·с (уменьшение показателя на 21,9%), является свидетельством термоокислительной деструкции полимерной сетки. Длительное нагревание при 165°C в течение четырех часов в условиях интенсивного механического перемешивания и доступа кислорода воздуха инициирует разрыв сформировавшихся поперечных связей, приводит к разжижению системы и необратимой потере достигнутых реологических характеристик.

Повышение концентрации добавки до 10% сопровождается равномерным ростом вязкости на протяжении всего эксперимента. В течение 240 мин динамическая вязкость системы возросла с 2,8 до 3,369 Па·с (прирост 20,3%). Отсутствие деструктивного снижения показателя, зафиксированного для вяжущего с 7% добавки, возможно объяснить тем, что повышенное содержание РК в композиции генерирует активные радикалы и сажистые частицы, выполняющие роль ингибиторов окислительных процессов, затормаживая деструкцию. Также, высокий объем наполнителя создает развитый пространственный каркас из частиц резины и целлюлозных волокон, который позволяет сохранить структурную целостность даже при частичном разрыве полимерных цепей, компенсируя потерю химической сшивки за счет физического армирования.

Не смотря на это, предпочтительным с практической точки зрения является образец с концентрацией 7%, поскольку он обеспечивает сбалансированное повышение вязкости, достаточное для эффективного структурирования системы, в то время как увеличение дозировки до 10% приводит к избыточному загущению и переструктурированию, что, согласно данным микроструктурного анализа, **рисунок 3**, сопровождается сохранением мелких нерастворившихся включений даже при длительном перемешивании и свидетельствует о предельном насыщении битумной матрицы модификатором.

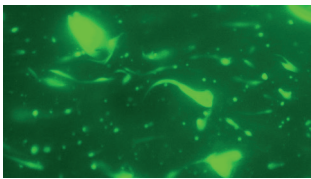
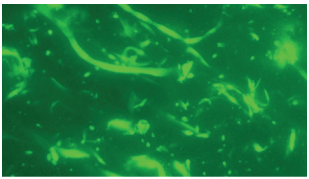
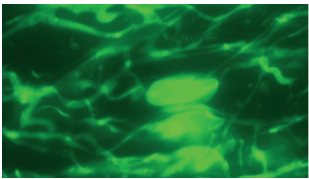
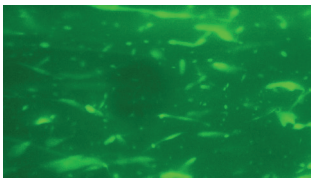
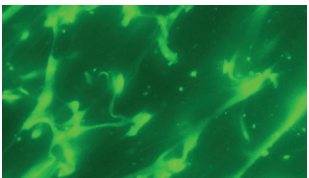
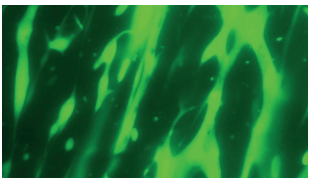
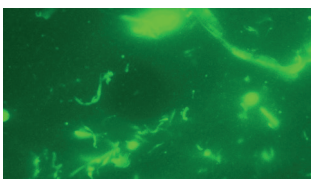
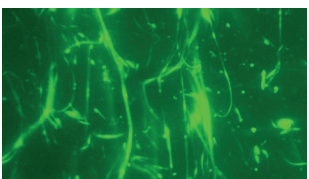
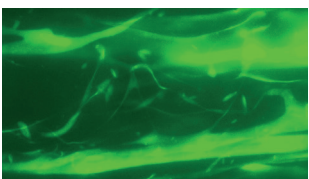
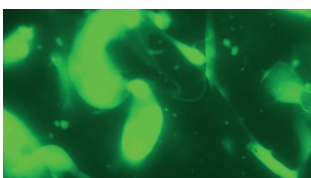
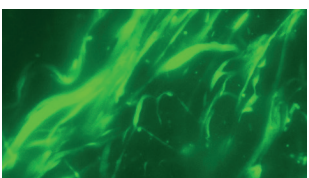
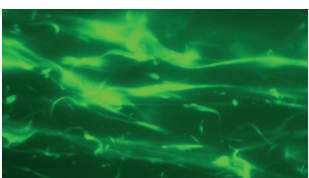
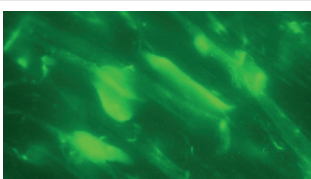
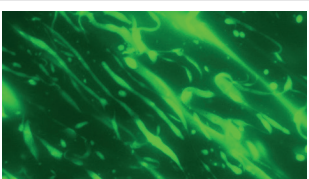
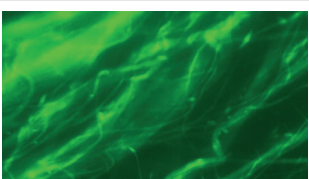
Время перемешивания	Концентрация добавки, % от массы битума		
	4%	7%	10%
30 мин			
60 мин			
90 мин			
120 мин			
240 мин			

Рис. 3. Микроструктура модифицированного битумного вяжущего

Как видно из рисунка, образцы с 4% добавки характеризуются недостаточной степенью модификации: на всех временных интервалах фиксируются крупные нерастворенные фрагменты полимера, что свидетельствует о недостаточной степени модификации и неполном диспергировании добавки даже при увеличении времени перемешивания до 240 мин. Визуальный контроль показал, что для образца с 7 % добавки при перемешивании в течение 90 мин характерно растворение основной массы полимера, а мелкие нерастворяющиеся включения, фиксируемые до окончания эксперимента, не оказывают критического влияния на однородность системы. Таким образом, концентрация 7% от массы битума является оптимальной, обеспечивающей высокие реологические характеристики при оптимальных технологических параметрах приготовления композиции.

Заключение

Проведенные исследования демонстрируют перспективность использования активированной резиновой крошки в составе комплексных модифицирующих добавок для битумного вяжущего. Разработанная многокомпонентная система, объединяющая модифицирующие и структурирующие

компоненты, в перспективе должна проявиться как инструмент эффективного управления реологическими и технологическими свойствами асфальтобетонных смесей.

Установлено, что оптимальная дозировка модифицирующей добавки составляет 7% от массы битума. Несмотря на рост динамической вязкости до 120 мин перемешивания, рациональным временем смешения следует считать 90 мин, поскольку окончательное структурирование вяжущего будет происходить на последующих технологических этапах приготовления и укладки асфальтобетонной смеси. Данный режим обеспечивает достаточное повышение вязкости без избыточного загущения вяжущего, при этом достигается максимальная однородность распределения модификатора в битумной матрице.

Библиографический список

1. Environmental implications of recycled materials in pavement construction: A comprehensive review and future research directions / S. Khan, H. Li, M. H. Ncube [et al.] // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2025. — Vol. 140. — P. 104642. — DOI 10.1016/j.trd.2025.104642. — EDN SIHNRZ.
2. Игнатьев, А. А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы / А. А. Игнатьев // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. — 2023. — № 1(63). — С. 14–30. — DOI 10.52409/20731523_2023_1_14. — EDN EXDWYX.
3. Roy, A. Crumb Rubber Modified Asphalt: Fundamentals to Recent Developments / A. Roy, K. Rajkumar, B. Kapgate // *Asphalt Materials — Recent Developments and New Perspective [Working Title]* / ed. F. Tahmoorian. — London: IntechOpen, 2024. — DOI: 10.5772/intechopen.1004314.
4. Сачкова, А. В. Резиновая крошка для модификации асфальтобетона. Определение свойств / А. В. Сачкова, Г. С. Духовный, Д. В. Карпенко // *Успехи современной науки и образования*. — 2016. — Т. 5, № 12. — С. 144–146. — EDN XHEBQX.
5. Долинская, Р. М. Влияние резиновой крошки на свойства нефтяного битума / Р. М. Долинская, Н. Р. Прокончук // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. — 2021. — № 1 (241). — С. 172–175. — EDN PHTUNJ.
6. Борисова, А. А. Влияние модификации резиновой крошки на межфазное взаимодействие в резинобитумных композитах / А. А. Борисова, М. Д. Соколова, Н. В. Шадрин // *Клеи. Герметики. Технологии*. — 2019. — № 5. — С. 26–28. — DOI 10.31044/1813-7008-2019-0-5-26-28. — EDN ZJGORF.
7. Каблов, В. Ф. Перспективные способы активации резиновой крошки / В. Ф. Каблов, А. В. Перфильев, В. П. Шабанова // *Каучук и резина*. — 2016. — № 3. — С. 44–47. — EDN WDECQR.
8. Резина покрышек автотранспорта — ценный ресурс для повторного использования в дорожно-строительном сегменте / М. А. Высоцкая, В. С. Лесовик, А. В. Курлыкина, М. И. Самойлов // *Строительные материалы*. — 2025. — № 11. — С. 55–67. — DOI 10.31659/0585-430X-2025-841-11-55-67. — EDN FCYOZE.
9. Ворожцов, Е. П. Химическая модификация резиновой крошки в процессах переработки изношенных автомобильных шин / Е. П. Ворожцов, С. В. Бортников // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. — 2021. — № 1-2 (52). — С. 43–47. — DOI 10.24411/2500-1000-2021-1077. — EDN BNKZXR.

10. Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор / В. А. Токарев, М. Д. Кабалин, М. С. Грищенко, М. А. Высоцкая // Вестник МГСУ. — 2025. — Т. 20, № 6. — С. 899–919. — DOI 10.22227/1997-0935.2025.6.899-919. — EDN VUCNSM.
11. Абдуллаев Э. Р., Окольников Г. Э. Влияние композитного армирования на повышение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных аэродромных и дорожных покрытий // Системные технологии. 2024. № 1 (50). С. 103–109.
12. Ляпидевская О. Б. Инновационные подходы к разработке строительных материалов нового поколения // Системные технологии. 2024. № 3 (52). С. 42–46.
13. Окольников Г. Э., Куликова К. П., Бочукова М. И., Краюшкина Е. О. Актуальность применения внешнего армирования с использованием композитных материалов // Системные технологии. 2023. № 2 (47). С. 93–100.

ADDITIVE BASED ON RUBBER CRUMBLES AND ITS EFFECT ON THE STRUCTURE AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BITUMINOUS BINDER

A. V. Kurlykina
M. A. Vysotskaya
M. I. Samoilov

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

Abstract

The article presents the results of a study of a modifying additive based on activated rubber crumb. Its effect on the rheological properties of bitumen binder was studied at concentrations of 4%, 7%, and 10% of the bitumen mass. It was established that the optimal content of the additive, which ensures the optimal combination of viscosity and homogeneity of the system, is 7%. The obtained results confirm the need for further study of the mechanisms of interaction between rubber crumb and the bitumen matrix, as well as for optimizing the compositions and technological regimes for the preparation of modified binders, which will ensure more intensive use of rubber-containing additives in road construction.

The Keywords

Modified bitumen, activated rubber crumb, complex modifier, dynamic viscosity, microstructure.

Date of receipt in edition

30.08.2026

Date of acceptance for printing

03.09.2026

Ссылка для цитирования:

А. В. Курлыкина, М. А. Высоцкая, М. И. Самойлов. Добавка на основе резиновой крошки и ее влияние на структуру и реологические свойства битумного вяжущего. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 22–28.