

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-33-40

¹Васильев А. Ю., ²*Урханова Л.А.¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: urkhanova@mail.ru

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЦЕМЕНТОБЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО РЕЗИНОВОЙ КРОШКОЙ, ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗГИБНОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований усталостной долговечности цементобетона, модифицированного резиновой крошкой (резинобетона), при четырёхточечном циклическом изгибном нагружении. Испытаны составы с содержанием резиновой крошки 0, 5, 10, 15, 20 и 25 % по объёму мелкого заполнителя, а также оптимальный состав РБ-15-М с силановой обработкой поверхности. Усталостные испытания выполнены при уровнях напряжений $\sigma_{\max}/R_{tb} = 0,50; 0,60$ и $0,70$ с частотой нагружения 10 Гц. Построены кривые Вёлера ($S-N$) и определены параметры степенной регрессии вида $S = a - b \cdot \lg N$. Установлено, что введение 15 % резиновой крошки увеличивает усталостную долговечность при $\sigma_{\max}/R_{tb} = 0,60$ в 4,57 раза по сравнению с контрольным бетоном. Предел выносливости при $N = 10^7$ циклов возрастает с $0,300 \cdot R_{tb}$ для контрольного бетона до $0,369 \cdot R_{tb}$ для состава с 15 % резиновой крошки (РК). Вероятностный анализ усталостной долговечности выполнен с использованием двухпараметрического распределения Вейбулла. Рассмотрены механизмы повышения усталостной стойкости: рассеяние энергии вязкоупругими включениями, торможение трещин на границах раздела, повышенная вязкость разрушения. Удельная энергия трещинообразования G_F резинобетона с 15 % РК составила 148 Дж/м², что на 51 % выше контрольного состава. Результаты подтверждают перспективность применения резинобетона в конструкциях транспортного строительства, эксплуатируемых в условиях циклического нагружения.

Ключевые слова: резинобетон, резиновая крошка, усталостная долговечность, кривая Вёлера, циклический изгиб, демпфирование, энергия разрушения, транспортное строительство.

Введение. Конструкции транспортного строительства – дорожные покрытия, мостовые плиты, шпалы – в процессе эксплуатации подвергаются многократному циклическому нагружению от проходящего транспорта. Усталостное разрушение является одним из основных механизмов деградации бетонных покрытий: под действием повторяющихся изгибных напряжений, составляющих лишь 50–70 % от статической прочности, в бетоне зарождаются и развиваются микротрещины, приводящие к прогрессирующему снижению несущей способности и в конечном итоге к разрушению [1, 2]. По данным Федерального дорожного агентства России, до 40 % дефектов жёстких дорожных покрытий обусловлены именно усталостными процессами, что определяет актуальность поиска материалов с повышенной усталостной стойкостью.

Одним из перспективных путей повышения усталостной долговечности цементобетона является введение резиновой крошки (РК), получаемой при механическом измельчении изношенных автомобильных шин. Резинобетон (РБ) – композиционный материал, в котором часть мелкого заполнителя по объёму замещена частицами РК, – обладает рядом функциональных преимуществ, обусловленных вязкоупругой природой

резиновых включений: повышенным демпфированием, улучшенной ударной вязкостью, сниженным уровнем передаваемых вибраций и шума [3, 4]. Именно эти свойства создают предпосылки для повышения усталостной стойкости, поскольку вязкоупругие включения способны рассеивать энергию циклического деформирования и замедлять развитие усталостных трещин.

Вместе с тем введение РК закономерно снижает прочность бетона на сжатие и модуль упругости вследствие низкой жёсткости каучука и слабой адгезии на границе раздела «цементная матрица – резиновая крошка» [5,6]. Снижение прочности на сжатие при 15 % замещении мелкого заполнителя составляет 25–35 %, что ограничивает применение резинобетона в несущих конструкциях. Однако для конструкций транспортного строительства, работающих преимущественно на изгиб и подвергающихся циклическому нагружению, определяющими являются не столько прочностные, сколько деформативные и усталостные характеристики [3].

Основной характеристикой усталостной стойкости бетона является кривая Вёлера ($S-N$), связывающая уровень напряжений S с числом циклов до разрушения N . Для обычного бетона эта зависимость аппроксимируется уравнением:

$$S = a - b \cdot \lg N,$$

где a и b – эмпирические коэффициенты [1, 2].

Предел выносливости обычного бетона при изгибе при $N = 10^7$ циклов составляет 0,50–0,60 от статической прочности при изгибе [7].

Sohel K.M.A. и соавторы [8] создали базу данных усталостных испытаний бетонов с прочностью 25–65 МПа и предложили обобщённые уравнения Вёлера с учётом вероятности разрушения, показав, что двухпараметрическое распределение Вейбулла адекватно описывает рассеяние усталостной долговечности.

Механизм усталостного разрушения бетона включает три стадии. На первой стадии (5–10 % общего числа циклов) происходит быстрое развитие предсуществующих дефектов и зарождение микротрещин. На второй стадии (70–80 % циклов) микротрещины стабильно растут, накапливая повреждения. На третьей стадии (10–15 % циклов) происходит слияние трещин и лавинообразное разрушение [1, 9]. Данная трёхстадийная модель была подтверждена в работе Han X. и др. [10] и для резинобетона с тем существенным отличием, что вторая стадия значительно удлиняется за счёт рассеяния энергии резиновыми включениями.

Анализ литературы показывает, что исследования усталостной долговечности резинобетона находятся на начальной стадии. Авторы работы [11] впервые систематически исследовали изгибную усталость бетона класса C35/45 с заменой 5–25 % песка резиновой крошкой фракции 0,5–4 мм при трёх уровнях напряжений ($S = 0,65; 0,75; 0,85$). Результаты показали, что при $S = 0,75$ усталостная долговечность возрастает на 15–30 % при содержании РК 10–15 %, но снижается при 25 %. Автор объяснил снижение усталостной долговечности бетона при высоких дозировках резиновой крошки ослаблением цементной матрицы, преобладающим над эффектом рассеяния энергии.

Li Y. и соавторы [12] изучили влияние гибридного армирования стальной фиброй и переработанным полимерным волокном на изгибную усталость резинобетона, показав, что добавка 0,1 об. % РК увеличивает число циклов до разрушения на 2,6–10,0 %. Установлено, что усталостная долговечность всех составов описывается двухпараметрическим распределением Вейбулла (коэффициенты корреляции 0,92–0,96). Оптимальная дозировка – 1,5 об.% стальной фибры, 0,1 об.% полимерного волокна и 0,1 об.% РК – обеспечивала максимальное число циклов до разрушения. Авторы выделили три стадии эволюции усталостных деформаций, аналогичные классической трёхстадийной модели.

Han X. и др. [10] продемонстрировали, что предварительная обработка РК аппретом KH-570

увеличивает усталостную долговечность резинобетона на 21,2 % при содержании 10 % РК, причём основным механизмом является усиление рассеяния энергии на границах раздела. Обработка крошки создаёт «мостиковый» эффект на границе раздела, улучшает адгезию и позволяет полнее реализовать упругие деформационные свойства каучука, что усиливает рассеяние энергии при циклическом нагружении [10].

Xie J. И др. [13] испытали армированные плиты из резинобетона при четырёхточечном циклическом изгибе, рекомендовав ограничить содержание РК 10 % для обеспечения допустимой усталостной долговечности плит.

Однако имеющиеся данные фрагментарны и не дают целостной картины. Во-первых, большинство работ ограничивается двумя-тремя уровнями напряжений, что не позволяет достоверно построить полную кривую Вёлера. Во-вторых, практически отсутствуют данные об усталостном поведении резинобетона с обработанной поверхностью РК при широком варьировании содержания крошки. В-третьих, связь между демпфирующими свойствами и усталостной долговечностью резинобетона количественно не установлена. Наконец, вероятностный анализ усталостной долговечности с использованием функций распределения Вейбулла для резинобетона выполнен лишь в единичных работах [12, 14].

Целью настоящей работы является комплексное исследование усталостной долговечности цементобетона, модифицированного резиновой крошкой, при циклическом изгибном нагружении.

Материалы и методы. В работе исследованы семь составов бетона: контрольный (РБ-0) и шесть составов резинобетона с содержанием РК 5, 10, 15, 20 и 25 % по объёму мелкого заполнителя (РБ-5 – РБ-25), а также оптимальный состав РБ-15-М (15 % РК фракции 2–4 мм с силановой обработкой поверхности KH-550, В/Ц = 0,45). При подборе состава РБ использованы портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2020, кварцевый речной песок ($M_k = 2,4$), гранитный щебень фракции 5–20 мм, поликарбоксилатный суперпластификатор РСЕ в количестве 0,5–0,7 % от массы цемента. Резиновая крошка фракции 2–4 мм получена механическим измельчением изношенных шин (плотность 1090 кг/м³, водопоглощение 1,2 %). Обработка поверхности резиновой крошки (модифицированный состав) осуществлялась силановым аппретом KH-550, который является распространённым в Китае с торговым наименованием γ -Аминопропилтриэтоксисилан. Это универсальный силановый аппрет

(адгезионный промотор) amino-функционального типа, используемый для соединения неорганических материалов с органическими полимерами.

Усталостные испытания проведены на образцах-балках $100 \times 100 \times 400$ мм по схеме четырёхточечного изгиба (пролёт 300 мм, расстояние между нагрузками 100 мм) на сервогидравлическом стенде MTS 810 с частотой нагружения 10 Гц. Форма нагружения – синусоидальная, коэффициент асимметрии цикла $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,10$. Испытания выполнены при трёх уровнях напряжений: $S = \sigma_{\max}/R_{tb} = 0,50; 0,60$ и $0,70$, где R_{tb} – статическая прочность на растяжение при изгибе определенного состава. Для каждого сочетания «состав – уровень напряжений» испытано не менее трёх образцов. Испытания прекращались при полном разрушении образца или при достижении 10^7 циклов (базовое число циклов для определения предела выносливости).

Характеристики вязкости разрушения определены по RILEM TC 50-FMC на образцах-балках $100 \times 100 \times 400$ мм с предварительно выполненным надрезом глубиной 30 мм при трёхточечном изгибе. Определены критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} , удельная энергия трещинообразования G_F и критическое раскрытие трещины w_0 . Коэффициент демпфирования ξ определён методом свободных затухающих колебаний по логарифмическому декременту с использованием акселерометра Brüel & Kjær 4507-B.

Основная часть. Введение РК приводит к снижению предела прочности на растяжение при изгибе R_{tb} резинобетона: при 15 % замещении песка РК снижение прочности бетона составляет

18,0 %, при 25 % – 28,8 % (табл. 1). Состав РБ-15-М с силиановой обработкой достигает $R_{tb} = 4,80$ МПа, что на 8,8 % выше, чем у состава РБ-15 без обработки: модификация поверхности резиновой крошки силиановым связующим агентом в виде жидкости улучшает ее сцепление с цементной матрицей.

Таблица 1

Прочность на растяжение при изгибе исследованных составов бетона

Состав	Предел прочности на растяжение при изгибе R_{tb} , МПа, после 28 суток твердения	Снижение R_{tb} , %
РБ-0	5,38	–
РБ-5	5,14	4,5
РБ-10	4,69	12,8
РБ-15	4,41	18,0
РБ-20	3,98	26,0
РБ-25	3,83	28,8
РБ-15-М	4,80	10,8

Результаты усталостных испытаний при трёх уровнях напряжений однозначно свидетельствуют о положительном влиянии РК на усталостную долговечность цементобетона (табл. 2). При уровне напряжений $S = 0,50$ число циклов до разрушения контрольного бетона составляет 1 872 000, тогда как для состава РБ-15 – 4 950 000 (увеличение в 2,64 раза), для РБ-20 – 7 140 000 (увеличение в 3,81 раза), а для РБ-15-М – 5 230 000 (увеличение в 2,79 раза). При более жёстком режиме нагружения ($S = 0,60$) эффект ещё более выражен: N возрастает с 258 300 для контрольного состава до 1 180 000 для РБ-15-М, что соответствует увеличению в 4,57 раза.

Таблица 2

Усталостная долговечность бетона при циклическом изгибе

Состав	Предел прочности на растяжение при изгибе R_{tb} , МПа	Число циклов до разрушения N при напряжении S , равном		
		0,50	0,60	0,70
РБ-0	5,38	1 872 000	258 300	29 400
РБ-10	4,69	3 420 000	580 000	74 100
РБ-15	4,41	4 950 000	1 020 000	138 600
РБ-20	3,98	7 140 000	1 680 000	224 900
РБ-15-М	4,80	5 230 000	1 180 000	159 400

Следует отметить определенную зависимость усталостной долговечности цементобетона от содержания РК: максимальное абсолютное число циклов до разрушения наблюдается у состава РБ-20 (7 140 000 при $S = 0,50$) при низкой статической прочности данного состава ($R_{tb} = 3,98$ МПа). При фиксированном абсолютном уровне напряжений, например, $\sigma_{\max} = 2,69$ МПа, что соответствует $S = 0,50$ для контрольного бетона, составы с высоким содержанием РК разру-

шаются при меньшем числе циклов из-за пониженной статической прочности. Таким образом, оптимальным является содержание РК 15 % с обработкой поверхности, обеспечивающее наилучший баланс между повышением усталостной стойкости бетона и сохранением его прочности.

По полученным данным (табл. 2) были построены кривые Вёлера в координатах $S - \lg N$ и определены параметры степенной регрессии $S = a - b \cdot \lg N$ (табл. 3). Коэффициент a характеризует

условную прочность при $N = 1$ (начальную ординату), а коэффициент b – скорость снижения допустимого напряжения с ростом числа циклов.

Для всех составов коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,997$, что подтверждает адекватность степенной аппроксимации.

Таблица 3

Параметры кривых Вёлера для бетона без и с резиновой крошкой

Состав	a	b	R^2	Предел выносливости при $N=10^7$ циклов, $\sigma_{\max}/R_{tb}$
РБ-0	1,085	0,0784	0,998	0,300
РБ-10	1,116	0,0753	0,997	0,341
РБ-15	1,143	0,0729	0,998	0,369
РБ-20	1,168	0,0705	0,997	0,398

Анализ полученных данных позволяет установить две важные закономерности: во-первых, эмпирический коэффициент a возрастает с увеличением содержания РК, что отражает повышение «условной статической усталостной прочности». Во-вторых, коэффициент b убывает (от 0,0784 – для контрольного состава, до 0,0705 – для РБ-20), свидетельствуя о более пологом наклоне кривой Вёлера, то есть о меньшей чувствительности усталостной долговечности к уровню напряжений. Это означает, что резинобетон более равномерно рассеивает энергию циклического нагружения во всём диапазоне напряжений, а не только при низких уровнях.

Предел выносливости возрастает с $0,300 \cdot R_{tb}$ – для бетона контрольного состава, до $0,369 \cdot R_{tb}$ – для РБ-15 и $0,398 \cdot R_{tb}$ – для РБ-20. Увеличение предела выносливости на 23 % (для РБ-15) является существенным с практической точки зрения, поскольку при проектировании дорожных покрытий расчётное напряжение обычно принимается на уровне $0,40\text{--}0,55 \cdot R_{tb}$ [1]. Повышенный предел выносливости резинобетона позволяет либо уменьшить толщину покрытия при заданном сроке службы, либо увеличить срок службы при заданной толщине.

Полученные данные согласуются с литературными. Так, Murugan R.Bh. [11] получил предел выносливости $0,55\text{--}0,58$ при $N = 2 \cdot 10^6$ для бетона С35/45 с 10–15 % РК, что при экстраполяции до $N = 10^7$ согласуется с данными настоящего исследования ($S \approx 0,34\text{--}0,37$). Soheli K. M.A. с соавторами [8] для обычного бетона получили предел выносливости $0,50\text{--}0,55$ при $N = 2 \cdot 10^6$ (значение текущего исследования – 0,300 при $N = 10^7$ – более консервативное из-за большего базового числа циклов). В работе Han X. [10] представлены данные об увеличении усталостной долговечности на 21,2 % при 10 % предварительно обработанной РК, что согласуется с данными для РБ-15-М.

Для установления количественной связи между демпфирующими свойствами и усталостной долговечностью экспериментально был определен коэффициент демпфирования ξ бетона без резиновой крошки и использованием различного содержания РК методом свободных

затухающих колебаний по логарифмическому декременту. Зависимости коэффициента демпфирования ξ и логарифма числа циклов до разрушения $\lg N$ (при $S = 0,60$) от содержания РК показывают, что обе величины монотонно возрастают с увеличением содержания РК, причём между ξ и $\lg N$ ($S = 0,60$) наблюдается линейная корреляция ($R^2 = 0,98$) (рис.1).

Линейная зависимость $\lg N = 12,31 \cdot \xi + 4,76$ ($R^2 = 0,98$) позволяет прогнозировать усталостную долговечность по данным о демпфировании, что имеет практическое значение для неразрушающего контроля: измерение коэффициента демпфирования методом свободных колебаний является значительно менее трудоёмким, чем проведение полных усталостных испытаний.

Однако, следует отметить, что усталостные испытания бетона с резиновой крошкой выполнены при одной частоте нагружения (10 Гц) и одном коэффициенте асимметрии цикла ($R = 0,10$). Реальные транспортные нагрузки характеризуются широким спектром частот и амплитуд, что может приводить к иным закономерностям накопления повреждений.

Следующим этапом исследований было определение трещиностойкости бетона различного состава бетона (табл. 4). Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} снижается с увеличением содержания РК (с 0,71 до 0,55 МПа $\cdot$ м 0,5 при увеличении РК от 0 до 20 %), однако удельная энергия трещинообразования G_F существенно возрастает – с 98 до 165 Дж/м 2 . Состав РБ-15-М характеризуется $G_F = 155$ Дж/м 2 , что на 58,2 % выше контрольного бетона. Критическое раскрытие трещины w_0 увеличивается с 0,22 мм (контрольный состав) до 0,48 мм (РБ-20), что свидетельствует о значительно более вязком характере разрушения бетона с резиновой крошкой.

Разнонаправленная динамика K_{Ic} (снижение) и G_F (рост) объясняется тем, что K_{Ic} характеризует сопротивление зарождению трещины и определяется прочностью матрицы, тогда как G_F характеризует полную энергию, поглощённую при распространении трещины до полного разделения. Резиновые включения, являясь слабыми

по жёсткости, не препятствуют зарождению трещины, но существенно увеличивают энергию её распространения за счёт отклонения, ветвления и торможения на границах раздела [15,16]. Именно

этот механизм – увеличение «пути трещины» и поглощение энергии на границах раздела – является ключевым для повышения усталостной долговечности.

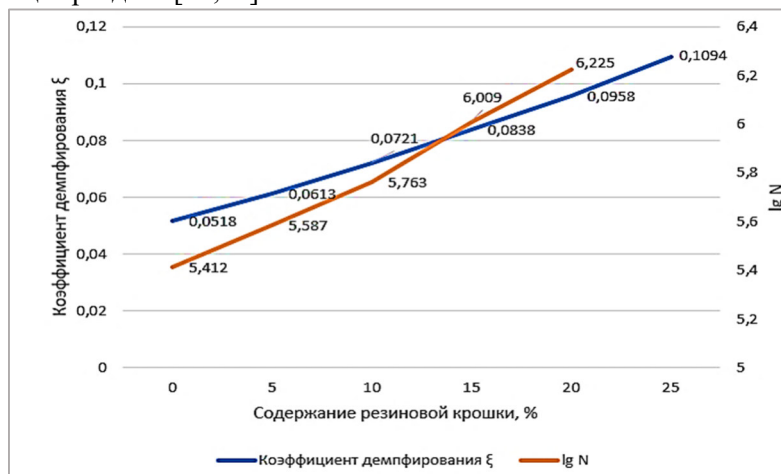


Рис. 1. Влияние содержания резиновой крошки в составе бетона на изменение коэффициента демпфирования и числа циклов до разрушения при $S=0,60$ (данные $\lg N$ для состава РБ-25 при $S = 0,60$ превышают 10^7 циклов).

Таблица 4

Влияние количества резиновой крошки на изменение характеристик вязкости разрушения бетона

Состав	K_{Ic} , МПа·м ^{0,5}	G_F , Дж/м ²	w_o , мм	ΔG_F , %
РБ-0	0,71	98	0,22	–
РБ-10	0,65	126	0,31	+28,6
РБ-15	0,61	148	0,39	+51,0
РБ-20	0,55	165	0,48	+68,4
РБ-15-М	0,64	155	0,41	+58,2

Таким образом, повышение усталостной стойкости резинобетона обусловлено несколькими взаимодополняющими механизмами. Во-первых, вязкоупругие резиновые включения рассеивают энергию циклического деформирования за счёт внутреннего трения (гистерезисные потери), что снижает амплитуду напряжений на фронте трещины [3, 17]. Во-вторых, слабые границы раздела «резина – матрица» выступают в роли барьеров для распространяющейся трещины: трещина, достигая резинового включения, отклоняется, ветвится или тормозится, что увеличивает путь распространения и поглощает дополнительную энергию [10, 16]. В-третьих, упругая деформация резиновых частиц компенсирует локальные концентрации напряжений и снижает коэффициент интенсивности напряжений на фронте трещины [15]. Наконец, повышенная пористость резинобетона обеспечивает демпфирование колебаний за счёт вязкого трения воздуха в порах [3].

Обобщая экспериментальные данные, можно выделить четыре основных механизма повышения усталостной стойкости резинобетона. Первый механизм – вязкоупругое рассеяние энергии. Резиновые включения обладают высоким коэффициентом потерь ($\tan \delta \approx 0,1–0,3$ для каучука), что обеспечивает преобразование части

механической энергии циклического нагружения в теплоту. Декомпозиция демпфирования показала, что вклад вязкоупругих потерь в резиновых включениях составляет 26,3 % от общего демпфирования, а рассеяние на границах раздела – 36,9 % (табл. 5).

Второй механизм – торможение и отклонение трещин. Трещина, распространяющаяся в цементной матрице, при достижении резинового включения вынуждена обходить его, что приводит к диссипации механической энергии, увеличивает эффективный путь распространения и поглощаемую энергию. Реи Н. и др. [15] показали численным моделированием, что в резинобетоне трещины преимущественно развиваются по переходным зонам ITZ «резина-цементная матрица», что приводит к многократному ветвлению и существенному увеличению G_F . Третий механизм – компенсация концентрации напряжений. Упругие резиновые частицы деформируются под нагрузкой, перераспределяя напряжения и снижая пиковые значения коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} на фронте трещины. Четвёртый механизм – повышенная деформативность. Модуль упругости резинобетона с 15 % РК ($E=24,2$ ГПа) на 24 % ниже контрольного ($E=31,8$ ГПа), что при фиксированном уровне относительных напряжений S означает более низкий

абсолютный уровень напряжений и, следовательно, меньшую скорость накопления усталостных повреждений.

Таблица 5

**Декомпозиция коэффициента
демпфирования (состав РБ-15)**

Механизм	Вклад в коэффициент демпфирования бетона ξ	Доля, %
Вязко-упругие потери в резиновых включениях	0,022	26,3
Рассеяние на границах раздела	0,031	36,9
Потери в цементной матрице (базовый)	0,052	61,9
Итого (с учётом взаимодействия)	0,084	100

Выводы. Повышенная усталостная долговечность резинобетона имеет непосредственное практическое значение для проектирования конструкций транспортного строительства. Для дорожного покрытия, эксплуатируемого при расчётном уровне напряжений $S = 0,50$, переход от обычного бетона класса В30 к резинобетону РБ-15-М увеличивает расчётное число циклов до разрушения с $1,87 \cdot 10^6$ до $5,23 \cdot 10^6$, что при среднесуточной интенсивности движения 3000 автомобилей/сутки соответствует увеличению срока службы с 20 до более чем 30 лет. Анализ стоимости жизненного цикла показал экономию 39,8 % за 30-летний период за счёт устранения промежуточных ремонтов. Кроме того, каждый кубометр резинобетона утилизирует 73,5 кг шинных отходов, что эквивалентно 7–8 легковым шинам, снижая экологическую нагрузку.

Таким образом, исследованы составы резинобетона с содержанием РК от 0 до 25 % по объёму, включая оптимальный состав с силановой обработкой поверхности резины. Построены полные кривые Вёлера, определены пределы выносливости, выполнен вероятностный анализ, исследована взаимосвязь между коэффициентом демпфирования и усталостной долговечностью, определены характеристики вязкости разрушения и рассмотрены механизмы повышения усталостной стойкости.

В настоящей работе не исследовано влияние условий окружающей среды (температура, влажность, циклы замораживания–оттаивания) на усталостную стойкость резинобетона. Кроме того, дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение влияния частоты и спектра нагружения, условий агрессивных воздействий, масштабного эффекта и разработку нормативных документов для проектирования конструкций из резинобетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lee M.K., Barr B.I.G. An Overview of the Fatigue Behaviour of Plain and Fiber Reinforced Concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2004. Vol. 26. No. 4. Pp. 299–305. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00139-7.
2. Hanson J.M., Ballinger C.A. Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading // *Reported by ACI Committee 215*. 1992. 215R-1 – 215R-24.
3. Thomas B.S., Gupta R.Ch. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. Pp. 1323–1333. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.092.
4. Fadiel A.A., Abu-Lebdeh T., Munteanu L.S., Mohammed N.S. Comprehensive Evaluation of the Mechanical Properties of Rubberized Concrete // *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7. No. 3. Art. 129. DOI: 10.3390/jcs7030129.
5. Eldin N.N., Senouci A.B. Rubber-tire particles as concrete aggregate // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1993. Vol. 5. No. 4. Pp. 478–496.
6. Topçu I.B. The properties of rubberized concretes // *Cement and Concrete Research*. 1995. Vol. 25. No. 2. Pp. 304–310.
7. Sohel K.M.A., Al-Jabri K., Zhang M.H., Liew Richard J.Y. Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 173. Pp. 90–100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.276.
8. Sohel K.M.A., Al-Hinai M.H.S., Alnuaimi A., Al-Shahri M., El-Gamal S. Prediction of flexural fatigue life and failure probability of normal weight concrete // *Materiales de Construcción*. 2022. Vol. 72. No. 347. Art. e285. DOI: 10.3989/mc.2022.03521.
9. Akbar M., Ahmed B., Qing W., Zaghloul Y.R., Alharbi A.S., Almutairi S.M., Alshammari M.A., Alotaibi F.S. Mechanical properties and fatigue analysis of rubber concrete under uniaxial compression modified by a combination of mineral admixture // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2025. Vol. 64. No. 1. Art. 0171. DOI: 10.1515/rams-2025-0171.
10. Han X., Cheng Z., Yang L., Liu Y., Chen A., Wang Z., Zhang Q. Improved flexural fatigue behavior and strengthening mechanisms of rubberized concrete using pretreated crumb rubber // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 36416. DOI: 10.1038/s41598-026-36416-2.
11. Murugan R.Bh., Rama Sai E., Chen Sh., Natarajan C. Flexural fatigue performance and mechanical properties of rubberized concrete // *Grđevinar*. 2017. Vol. 69. No. 11. Pp. 983–990. DOI: 10.14256/JCE.1427.2015.

12. Li Y., Chen M., Zhang T., Zhang M. Behavior of hybrid steel and recycled polymer fibres reinforced rubberized concrete under flexural fatigue loading // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 456. Art. 138936. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138936.

13. Xie J., Zheng Y., Guo Y., Ou R., Xie Z., Huang L. Effects of crumb rubber aggregate on the static and fatigue performance of reinforced concrete slabs // *Composite Structures*. 2019. Vol. 228. Art. 111371. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111371.

14. Saini B.S., Singh S.P. Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 264. Art. 120233. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120233.

15. Pei H., Huang H., Li H., Han Y., Wang Z., Xiao J., Wu K., Zhang L., Chen X., Liu J. Numerical Simulation of Fatigue Life of Rubber Concrete on the Mesoscale // *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 9. Art. 2048. DOI: 10.3390/polym15092048.

16. Farhan A.H., Dawson A., Thom N. Behaviour of rubberised cement-bound aggregate mixtures containing different stabilisation levels under static and cyclic flexural loading // *Road Materials and Pavement Design*. 2020. Vol. 21. No. 8. Pp. 2282–2301. DOI: 10.1080/14680629.2019.1605924.

17. Du T., Yang Y., Cao H., Si N., Kordestani H., Li C., Wang J., Zhang H., Chen L., Liu X. Rubberized Concrete: Effect of the Rubber Size and Content on Static and Dynamic Behavior // *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 6. Art. 1541. DOI: 10.3390/buildings14061541.

Информация об авторах

Васильев Алексей Юрьевич, аспирант кафедры «Дорожно-строительные материалы и химические технологии». E-mail: avashom@yandex.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., д. 64.

Урханова Лариса Алексеевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства. E-mail: urkhanova@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Москва, Ярославское ш., д.26.

Поступила 04.05.2026 г.

© Васильев А.Ю., Урханова Л.А., 2026

¹Vasiliev A.Y., ²*Urkhanova L.A.

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

²National Research Moscow State University of Civil Engineering

* E-mail: urkhanova@mail.ru.

FATIGUE LIFE OF CEMENT CONCRETE MODIFIED WITH RUBBER CRUMB UNDER CYCLIC BENDING LOADING

Abstract. The paper presents experimental results on the fatigue durability of cement concrete modified with crumb rubber (rubberized concrete) under four-point cyclic flexural loading. Compositions with crumb rubber content of 0, 5, 10, 15, 20, and 25 % by volume of fine aggregate were tested, along with an optimized mix RB-15-M featuring silane surface treatment. Fatigue tests were conducted at stress levels $\sigma_{max}/R_{tb} = 0.50$, 0.60, and 0.70 at a loading frequency of 10 Hz. Wöhler ($S-N$) curves were constructed and power regression parameters $S = a - b \cdot \lg N$ were determined. The introduction of 15 % crumb rubber increased fatigue life at $\sigma_{max}/R_{tb} = 0.60$ by a factor of 4.57 compared to the control concrete. The endurance limit at $N = 10^7$ cycles increased from $0.300 \cdot R_{tb}$ for the control to $0.369 \cdot R_{tb}$ for the 15 % CR mix. Probabilistic fatigue analysis was performed using a two-parameter Weibull distribution. Mechanisms of fatigue resistance enhancement are discussed: energy dissipation by viscoelastic inclusions, crack arrest at interfaces, and increased fracture toughness. The specific fracture energy G_F of rubberized concrete with 15 % CR was 148 J/m^2 , 51 % higher than the control. Results confirm the promise of rubberized concrete for transport construction structures subjected to cyclic loading.

Keywords: rubberized concrete, crumb rubber, fatigue durability, Wöhler curve, cyclic flexure, damping, fracture energy, transport construction.

REFERENCES

1. Lee M.K., Barr B.I.G. An Overview of the Fatigue Behaviour of Plain and Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004.

Vol. 26. No. 4. Pp. 299–305. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00139-7.

2. Hanson J.M., Ballinger C.A. Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading. Reported by ACI Committee 215. 1992. 215R-1 – 215R-24.

3. Thomas B.S., Gupta R.Ch. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. Pp. 1323–1333. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.092.
4. Fadiel A.A., Abu-Lebdeh T., Munteanu L.S., Mohammed N.S. Comprehensive Evaluation of the Mechanical Properties of Rubberized Concrete. *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7. No. 3. Art. 129. DOI: 10.3390/jcs7030129.
5. Eldin N.N., Senouci A.B. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1993. Vol. 5. No. 4. Pp. 478–496.
6. Topçu I.B. The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995. Vol. 25. No. 2. Pp. 304–310.
7. Soheli K.M.A., Al-Jabri K., Zhang M.H., Liew Richard J.Y. Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 173. Pp. 90–100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.276.
8. Soheli K.M.A., Al-Hinai M.H.S., Alnuaimi A., Al-Shahri M., El-Gamal S. Prediction of flexural fatigue life and failure probability of normal weight concrete. *Materiales de Construcción*. 2022. Vol. 72. No. 347. Art. e285. DOI: 10.3989/mc.2022.03521.
9. Akbar M., Ahmed B., Qing W., Zaghoul Y.R., Alharbi A.S., Almutairi S.M., Alshammari M.A., Alotaibi F.S. Mechanical properties and fatigue analysis of rubber concrete under uniaxial compression modified by a combination of mineral admixture. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2025. Vol. 64. No. 1. Art. 0171. DOI: 10.1515/rams-2025-0171.
10. Han X., Cheng Z., Yang L., Liu Y., Chen A., Wang Z., Zhang Q. Improved flexural fatigue behavior and strengthening mechanisms of rubberized concrete using pretreated crumb rubber. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 36416. DOI: 10.1038/s41598-026-36416-2.
11. Murugan R.Bh., Rama Sai E., Chen Sh., Natarajan C. Flexural fatigue performance and mechanical properties of rubberized concrete. *Grđevinar*. 2017. Vol. 69. No. 11. Pp. 983–990. DOI: 10.14256/JCE.1427.2015.
12. Li Y., Chen M., Zhang T., Zhang M. Behavior of hybrid steel and recycled polymer fibres reinforced rubberized concrete under flexural fatigue loading. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 456. Art. 138936. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138936.
13. Xie J., Zheng Y., Guo Y., Ou R., Xie Z., Huang L. Effects of crumb rubber aggregate on the static and fatigue performance of reinforced concrete slabs. *Composite Structures*. 2019. Vol. 228. Art. 111371. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111371.
14. Saini B.S., Singh S.P. Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 264. Art. 120233. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120233.
15. Pei H., Huang H., Li H., Han Y., Wang Z., Xiao J., Wu K., Zhang L., Chen X., Liu J. Numerical Simulation of Fatigue Life of Rubber Concrete on the Mesoscale. *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 9. Art. 2048. DOI: 10.3390/polym15092048.
16. Farhan A.H., Dawson A., Thom N. Behaviour of rubberised cement-bound aggregate mixtures containing different stabilisation levels under static and cyclic flexural loading. *Road Materials and Pavement Design*. 2020. Vol. 21. No. 8. Pp. 2282–2301. DOI: 10.1080/14680629.2019.1605924.
17. Du T., Yang Y., Cao H., Si N., Kordestani H., Li C., Wang J., Zhang H., Chen L., Liu X. Rubberized Concrete: Effect of the Rubber Size and Content on Static and Dynamic Behavior. *Buildings*. 2024. Vol. 14. No. 6. Art. 1541. DOI: 10.3390/buildings14061541.

Information about the authors

Vasiliev, Alexey Y., Postgraduate student. E-mail: avashom@yandex.ru. Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). Russia, 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, Bldg. 64.

Urkhanova, Larisa A. DSc, Professor. E-mail: urkhanova@mail.ru. National research Moscow state university of civil engineering, Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, no. 26.

Received 04.05.2026

Для цитирования:

Васильев А.Ю., Урханова Л.А. Усталостная долговечность цементобетона, модифицированного резиновой крошкой, при циклическом изгибном нагружении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 7. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-33-40

For citation:

Vasiliev A.Y., Urkhanova L.A. Fatigue life of cement concrete modified with rubber crumb under cyclic bending loading. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 7. Pp. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-33-40