

## Морфология микродефектов в асфальтобетонах на ранней стадии эксплуатационной деградации

Николай Игоревич Шестаков, Владимир Артурович Дзуцев,  
Иван Романович Полев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Эксплуатационная долговечность асфальтобетонных покрытий в значительной степени определяется процессами деградации микроструктуры материала под воздействием воды и переменных температур. На ранних стадиях разрушения формируются микродефекты, которые впоследствии приводят к развитию трещинообразования и снижению эксплуатационных характеристик покрытия. Несмотря на большое количество исследований, посвященных долговечности асфальтобетонных покрытий, морфологические признаки начальной стадии эксплуатационной деградации изучены недостаточно. Цель исследования — выявление ранних морфологических признаков повреждения структуры асфальтобетона и количественная оценка изменения дефектного пространства материала на начальной стадии эксплуатационного разрушения.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являются образцы щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-16. Микроскопическая съемка зон с выраженными микродефектами выполнена для образцов в исходном состоянии и после водонасыщения с последующим циклическим замораживанием и оттаиванием. Морфологический анализ дефектного пространства проводился по цифровым микрофотографиям с помощью методов автоматизированной обработки изображений. Для количественной характеристики структуры дефектов использован комплекс морфологических показателей, включающий долю дефектной области, а также параметры, характеризующие форму и протяженность границ дефектов.

**Результаты.** Проанализировано 40 характерных зон микроструктуры. Получены количественные оценки изменения дефектности после воздействия воды и переменных температурных циклов. Установлено, что уже после пяти циклов замораживания и оттаивания формируются устойчивые признаки первичной деградации структуры, проявляющиеся в увеличении интегральной дефектности и изменении порово-трещинной морфологии. Определено, что на ранней стадии деградации одновременно реализуются механизмы разветвления дефектной сети и объединения дефектных областей с их укрупнением.

**Выводы.** Полученные результаты подтверждают возможность диагностики ранних стадий эксплуатационного повреждения асфальтобетона на основе морфологического анализа микроструктуры. Показана необходимость совместного использования площадных и линейных морфологических показателей при количественной оценке дефектного пространства материала.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** асфальтобетон, битум, асфальтобетонное покрытие, эксплуатационная деградация, микродефекты, поры, микропустоты, микротрещины, морфология, микроструктура, цифровая микроскопия, водонасыщение

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шестаков Н.И., Дзуцев В.А., Полев И.Р. Морфология микродефектов в асфальтобетонах на ранней стадии эксплуатационной деградации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 772–780. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.772-780

Автор, ответственный за переписку: Владимир Артурович Дзуцев, vdzucev699@gmail.com.

## Morphology of microdefects in asphalt concrete at the early stage of operational degradation

Nikolay I. Shestakov, Vladimir A. Dzutsev, Ivan R. Polev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The operational durability of asphalt concrete pavements is largely determined by degradation processes occurring in the microstructure of the material under the influence of moisture and alternating temperatures. At the early stages of deterioration, microdefects are formed, which subsequently lead to crack development and a decrease in the performance characteristics of the pavement. Despite numerous studies devoted to the durability of asphalt concrete, the morphological features of the initial stage of operational degradation remain insufficiently studied. The aim of this work is to identify early morphological indicators of damage in the asphalt concrete structure and to quantitatively assess changes in the defect space of the material at the initial stage of operational deterioration.

**Materials and methods.** The object of the study is stone mastic asphalt SMA-16 specimens. Microscopic imaging of areas with pronounced microdefects was performed for specimens in the initial condition and after water saturation followed by cyclic freezing and thawing. The morphology of the defect space was analyzed using digital microphotographs with automated image processing methods. A set of morphological parameters was used to quantitatively characterize the defect structure, including the fraction of the defective area and parameters describing the shape and extent of defect boundaries.

**Results.** A total of 40 representative microstructural zones were analyzed. Quantitative estimates of defect evolution after exposure to water and alternating temperature cycles were obtained. It was established that stable features of primary structural degradation appear after five freeze–thaw cycles, manifested by an increase in integral defectiveness and changes in pore–crack morphology. It is shown that at the early stage of degradation, mechanisms of defect network branching and merging of defect regions with their enlargement occur simultaneously.

**Conclusions.** The obtained results confirm the possibility of diagnosing the early stages of operational damage in asphalt concrete based on morphological analysis of its microstructure. The necessity of combined use of areal and linear morphological parameters for quantitative assessment of the defect space is demonstrated.

**KEYWORDS:** asphalt concrete, bitumen, asphalt concrete pavement, operational degradation, microdefects, pores, microvoids, microcracks, morphology, microstructure, digital microscopy, water saturation

**FOR CITATION:** Shestakov N.I., Dzutsev V.A., Polev I.R. Morphology of microdefects in asphalt concrete at the early stage of operational degradation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):772-780. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.772-780 (rus.).

*Corresponding author:* Vladimir A. Dzutsev, vdzucev699@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Асфальтобетон является многофазным дисперсно-наполненным композиционным материалом, эксплуатационные свойства которого устанавливаются не только гранулометрией и объемными показателями, но и внутренней структурой. Чаще всего в рамках структурного подхода асфальтобетон рассматривается как иерархическая система, где пространственная организация минерального скелета, вяжущего и межфазных зон определяет формирование прочностных связей и устойчивость материала к деградации под действием внешних факторов [1–4].

Контакт «минеральное зерно – битумная пленка» следует анализировать как ключевую зону создания структурной устойчивости асфальтобетона, поскольку именно здесь задаются условия адгезивно-когезионного взаимодействия и реализуются механизмы зарождения микродефектов. Совокупность исследований [5, 6], посвященных модели строения битумной пленки на минеральных зернах, управлению структурообразованием композитов через регулирование состояния поверхности дисперсного сырья, влиянию механоактивации минеральных порошков на взаимодействие с битумом, а также формированию адсорбционно-сольватных слоев в межфазной зоне, показывает, что изменение физико-химического состояния поверхности и межфазных слоев приводит к вариации сплошности и устойчивости битумной пленки, что, в свою очередь, обуславливает склонность материала к развитию дефектности и накоплению микроповрежденности при эксплуатационных воздействиях [7, 8].

На уровне минерального компонента морфология микродефектов определяется не только объемным содержанием наполнителя, но и его дисперсностью, пористостью и поверхностной активностью, поскольку именно эти параметры задают характер упаковки частиц, степень заполнения межзернового пространства и условия образования межфазной зоны. Известно, что изменение состояния минераль-

ного наполнителя приводит к вариации свойств материалов на его основе и отражается на закономерностях структурообразования, включая параметры дефектного пространства [9]. Использование пористых дисперсных наполнителей дополнительно усложняет картину, потому что влияет на распределение микропустот и может изменять как локальную концентрацию связующего, так и пути проникновения влаги в структуру [10]. В свою очередь, применение модифицирующих добавок, в том числе наномодификаторов, рассматривается как инструмент направленного изменения структурного состояния дорожных композитов и повышения эксплуатационных характеристик, однако эффект таких решений во многом реализуется через трансформацию морфологии дефектов и межфазных зон [11–13]. С этих позиций технологические подходы, ориентированные на получение асфальтобетонов плотной структуры с улучшенными показателями, можно трактовать как практическую реализацию стратегии снижения структурной дефектности, т.е. ограничения размеров, связности и развития микродефектов на уровне матрицы и контактов компонентов [14].

Структуру асфальтобетона целесообразно исследовать как нестационарную систему, параметры которой складываются на технологической стадии и продолжают изменяться в эксплуатации, определяя траекторию накопления поврежденности. На этапе укладки и уплотнения условия доуплотнения и изменение физико-механических характеристик свежеуложенного материала влияют на степень формирования минерального скелета, распределение связующего и, как следствие, на исходные параметры дефектного пространства, которое в дальнейшем выступает «матрицей» для развития микроповреждений [15]. В процессе эксплуатации фиксируются изменения состава, структуры и текстуры асфальтобетона, сопровождающиеся перераспределением компонентов и ростом микроповрежденности, что проявляется в эволюции порово-трещинной морфологии и увеличении связно-

сти дефектов [16]. С этих позиций результаты работ, где повышение усталостной долговечности связывается с комплексной модификацией структуры, можно интерпретировать как подтверждение принципа управляемости деградации: направленное изменение структурных характеристик снижает интенсивность зарождения и развития микродефектов и замедляет переход к критическим стадиям поврежденности [17]. Дополнительную методическую основу для таких сопоставлений дает систематизация разновидностей двухкомпонентных структур асфальтобетона по особенностям структурообразования, позволяющая соотносить наблюдаемую морфологию дефектов с типом структурной организации материала [18].

Несмотря на значительный объем исследований, посвященных структуре и модификации асфальтобетона, в настоящее время сохраняется методический разрыв между качественным описанием микроструктуры и количественной оценкой морфологии микродефектов как диагностического признака, дающего возможность сопоставлять материалы и объяснять механизмы деградации. В качестве ответа на эту проблему в последние годы активно развиваются инструментальные и расчетные подходы к структурному анализу: от методов визуализации и формализованного морфологического описания компонентов дорожных материалов до средств трехмерного исследования внутренней структуры и порового пространства, включая рентгеновскую компьютерную томографию, а также трехмерные модели, связывающие особенности микроструктуры с влагомеханическим откликом и учитывающие неоднородность структуры на основе локально-однородных представлений и вариативности распределения заполнителя [19–22].

Таким образом, анализ морфологии микродефектов асфальтобетона следует рассматривать не как вспомогательное описание структуры, а как инструмент выявления причинно-следственных связей между формированием материала и последующей деградацией в эксплуатации. При этом принципиальное значение имеют именно первичные изменения структуры, возникающие на ранних стадиях воздействия: они образуют исходную конфигурацию дефектного пространства (поры, микропустоты, трещиноподобные нарушения, зоны ослабленного контакта), которая далее определяет направления проникновения влаги, локализацию напряжений и скорость накопления микроповрежденности. Иными словами, начальные структурные нарушения выступают «точками запуска» процессов снижения ресурса и утраты долговечности, а их количественная фиксация позволяет перейти от констатации факта разрушения к диагностике механизма его зарождения и раннего развития.

Цель настоящего исследования — количественная оценка первичных изменений морфологии микродефектов асфальтобетона при воздействии влаги и циклического замораживания – оттаивания на ос-

нове микроскопии и автоматизированного анализа изображений. Для достижения цели проводится сопоставление структурных состояний материала в исходном состоянии и после заданного числа циклов с выделением параметров, наиболее чувствительных к раннему развитию дефектного пространства, включая долю дефектной области, характеристики распределения и укрупнения дефектов, а также показатели, отражающие усложнение и рост связности границ дефектов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использован щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-16 как один из наиболее распространенных типов смесей для верхних слоев покрытий. Состав материала принят типовым для ЩМА-16: минеральный остов на щебне фракции до 16 мм (ГОСТ 32703, ГОСТ 33029), минеральный порошок МП-1 (ГОСТ 32761), а также полимер-модифицированное битумное вяжущее ПБВ 60 (ГОСТ Р 52056) и стабилизирующее волокно на основе целлюлозы (ГОСТ Р 58406.1 п. 5.4.5). Для выбранного типа асфальтобетона характерны развитая контактная структура минерального скелета и наличие битумной составляющей, что делает материал чувствительным к локальным дефектам межфазной зоны и эволюции порово-трещинного пространства при попеременном замораживании – оттаивании.

Из исходного материала изготовлены стандартные образцы (по ГОСТ Р 58406.1, ГОСТ Р 58406.9, ГОСТ Р 58401.24), после чего выполнено распиливание с получением пластин. Распил осуществлялся с подачей воды, что позволяло минимизировать локальный нагрев, исключить размягчение вяжущего и сохранить исходную морфологию микродефектов без дополнительного деформирования структуры. Толщина пластин принималась 15 мм.

Всего подготовлено 8 образцов. На поверхности каждого образца предварительным визуальным осмотром выделяли участки с наибольшей выраженностью дефектов (поры, микропустоты, локальные нарушения битума и межфазной зоны, трещиноподобные разрывы). Суммарно сформирована выборка из 40 зон, по которым проведено сопоставление морфологии в состояниях «до замораживания» и «после 5 циклов». Выделенные зоны маркировали и фиксировали их положение в привязке к характерным ориентирующим признакам (крупные зерна, границы, сочетание дефектов) в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

Для регистрации морфологии дефектов применялся оптический цифровой микроскоп. Съемка выполнялась при увеличениях 50×, 100× и 200× (в зависимости от характерного масштаба дефектов в зоне). Разрешение изображений обеспечивало пространственное разрешение 5–10 мкм/пикс. С целью обеспечения сопоставимости результатов до и после воздействия для каждой зоны сохранялись одина-

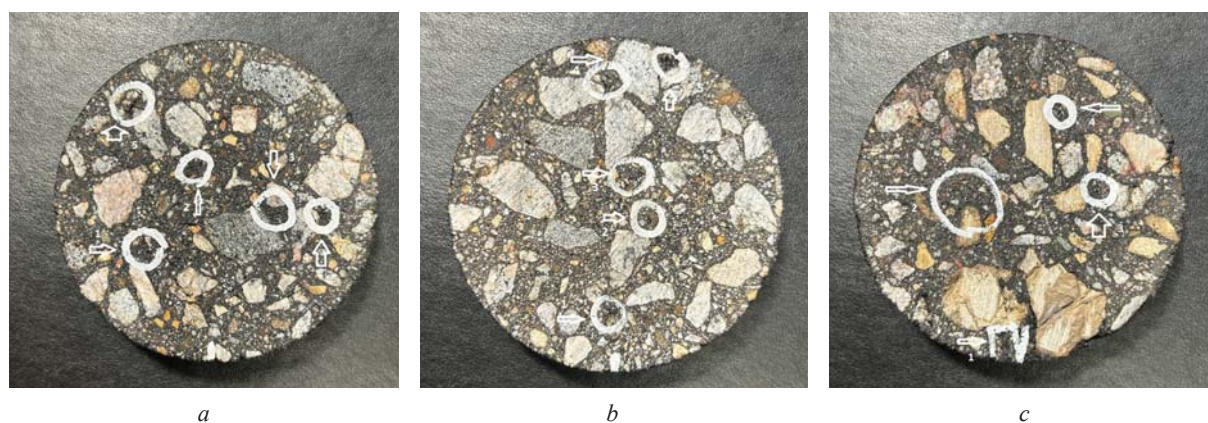


Рис. 1. Поверхности образцов асфальтобетона с выделением участков рассмотрения

Fig. 1. Surfaces of asphalt concrete specimens with selected observation areas

ковые параметры съемки (увеличение, поле зрения, фокусировка, освещение) и выполнялась повторная фиксация тех же участков по заранее осуществленной привязке (маркировка и ориентиры).

После первичной фиксации микроструктуры образцы подвергали длительному насыщению в воде до стабилизации массы (контроль производился по изменению массы при последовательных взвешиваниях). Далее проводили циклическое замораживание – оттаивание в водной среде по следующему режиму: замораживание 12 ч при температуре  $8 \pm 1$  °С; оттаивание 12 ч в воде при температуре  $20 \pm 2$  °С.

Общее число циклов составляло 5. Выбор пяти циклов обоснован задачей исследования первичной стадии деградации: на этом интервале, как правило, проявляются ранние структурные изменения (инициация микротрещин, раскрытие существующих микропустот, локальная перестройка межфазной зоны и рост связности дефектного пространства), при этом еще не доминируют грубые макроповреждения, способные маскировать механизм зарождения дефектов и затруднять сопоставление одних и тех же зон. Таким образом, 5 циклов являются достаточными для выявления начальной фазы образования и развития микродефектов и корректного сравнения морфологии в состояниях «до» и «после» воздействия.

По завершении пяти циклов образцы извлекали, затем сушили до постоянной массы. После сушки осуществляли повторный визуальный осмотр и повторную микроскопическую фиксацию тех же зон, которые были зарегистрированы до воздействия, с сохранением условий съемки и геометрической привязки. Полученные изображения использовались для сравнительного анализа изменений морфологии микродефектов в пределах каждой зоны и обобщения закономерностей развития дефектного пространства по совокупности образцов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфологический анализ выполнен в постановке парного сравнения «до – после» для одних и тех же

зон дефектности, что позволяет интерпретировать наблюдаемые изменения как результат заданного циклического воздействия, а не межобразцовой вариативности. Проанализировано 40 зон с выраженными микродефектами на образцах асфальтобетона после водонасыщения и циклического замораживания – оттаивания. На рис. 2, а показаны зоны 1–4 в исходном состоянии (до замораживания), на рис. 2, б представлены те же зоны после пяти циклов замораживания – оттаивания. Визуальное сопоставление рис. 2, а и рис. 2, б демонстрирует характерные признаки начальной стадии деградации: усиление выраженности дефектных границ, появление новых разрывов и локальное укрупнение дефектных областей, что отражает развитие микроповрежденности в порово-трещинном пространстве.

Для перехода от визуального анализа к сопоставимым численным характеристикам использован набор морфологических показателей, разделяющих вклад дефектов порового типа и дефектов трещиноподобного типа.

Площадная дефектность определялась как доля дефектной области в поле зрения:

$$D_S = \frac{S_{\text{деф}}}{S_{\text{общ}}},$$

где  $S_{\text{деф}}$  — суммарная площадь дефектных областей (поры и пустоты, выделенные по разметке);  $S_{\text{общ}}$  — площадь анализируемого поля зрения. Рост  $D_S$  интерпретируется как увеличение доли дефектного пространства и/или укрупнение дефектов.

Линейная дефектность оценивалась через плотность границ дефектов:

$$D_L = \frac{L_{\text{деф}}}{S_{\text{общ}}},$$

где  $L_{\text{деф}}$  — суммарная протяженность границ дефектов. Показатель  $D_L$  наиболее чувствителен к развитию трещиноподобных дефектов и усложнению их конфигурации (разветвление, изрезанность, рост связности), что особенно важно для ранней стадии

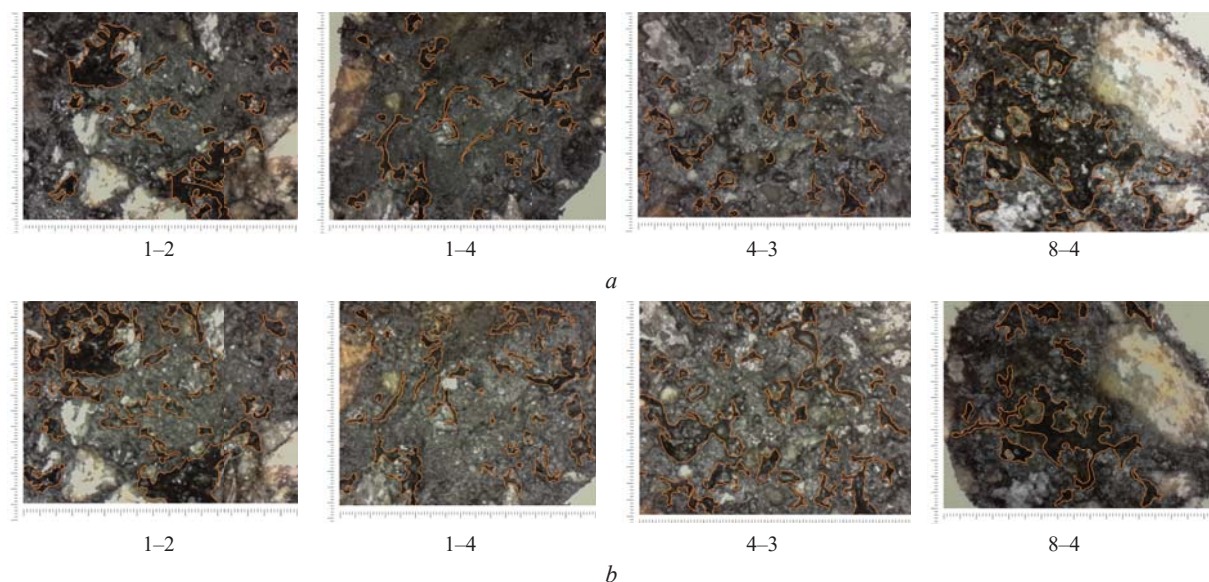


Рис. 2. Микрофотографии зон 1–4 с разметкой микродефектов: а — в исходном состоянии (до замораживания); б — после пяти циклов замораживания – оттаивания

Fig. 2. Micrographs of zones 1–4 with marked microdefects: a — in the initial state (before freezing); b — after five freeze – thaw cycles

деградации, когда изменения проявляются прежде всего по границам.

Дополнительно использованы показатели фрагментации и объединения: число дефектов  $N$  (по связанным компонентам) и индекс доминирования крупнейшего дефекта:

$$K = \frac{S_{\max}}{\sum S_i},$$

где  $S_{\max}$  — площадь крупнейшего дефекта в зоне;  $\sum S_i$  — суммарная площадь всех дефектов. Совместная интерпретация  $N$  (число связных дефектов или показатель фрагментации) и  $K$  позволяет различать сценарии «инициация и разветвление» и «слияние с укрупнением».

В табл. 1 приведены средние значения указанных параметров и их разброс для состояния до замораживания и после пяти циклов замораживания – оттаивания, а также среднее приращение показателей, позволяющее оценить направленность и интенсивность первичных структурных изменений.

На уровне всей совокупности зон (табл. 1) после пяти циклов фиксируется рост интегральной дефектности: среднее значение  $D_s$  увеличивается с 8,09 до 9,30 %, а  $D_L$  возрастает с 6,14 до 7,04 %. Увеличение  $D_s$  трактуется как раскрытие существующих микропустот и вовлечение дополнительных участков структуры в дефектное пространство, тогда как рост  $D_L$  отражает развитие дефектов по границам, усложнение и разветвление контуров, т.е. формирование трещиноподобной составляющей микроповрежденности. При этом показатели фрагментации и объединения демонстрируют разнонаправленные тенденции: среднее число дефектов  $N$  в целом уве-

личивается (с 131,6 до 142,9), но доля зон с ростом  $N$  составляет 45 %, что указывает на конкурирующие сценарии развития дефектов. Индекс  $K$  в среднем изменяется незначительно, что согласуется с тем, что на ранней стадии одновременно присутствуют и разветвление, и локальное объединение дефектов.

Поскольку развитие дефектного пространства зависит от исходного структурного состояния и локальной неоднородности материала, наряду с интегральным усреднением целесообразно рассмотреть вариативность изменений на уровне отдельных образцов. Такой подход дает возможность выявить доминирующий морфологический сценарий: преимущественное разветвление дефектной сети с ростом площадных и линейных характеристик либо объединение с перераспределением дефектов в более крупные области. В табл. 2 представлены усредненные по зонам значения  $D_s$  и  $D_L$  для каждого образца в состояниях до и после пяти циклов, а также соответствующие приращения, характеризующие индивидуальную динамику дефектности в пределах каждого образца.

Разброс изменений по образцам, представленный в табл. 2, подтверждает неоднородность морфологических сценариев и позволяет связать наблюдаемые особенности с механизмами первичной деградации. Так, для образцов 1–4 фиксируется наиболее выраженный рост дефектности:  $D_s$  увеличивается на 3,44–6,72 %, а  $D_L$  на 2,26–4,69 %, что соответствует сценарию «инициация и развитие дефектной сети» с активным формированием новых границ и расширением дефектных областей. Образцы 5–6 демонстрируют умеренный рост  $D_s$  на 1,22–3,39 % и  $D_L$  на 1,69–2,40 %, что характерно для замедленной первичной эволюции дефектов

Табл. 1. Сводные показатели по всем зонам ( $n = 40$ )Table 1. Summary indicators for all zones ( $n = 40$ )

Показатель Parameter	До замораживания, среднее $\pm$ SD* Before freezing, mean $\pm$ SD*	После пяти циклов, среднее $\pm$ SD* After 5 cycles, mean $\pm$ SD*	Изменение (после – до), среднее Change (after – before), mean
$D_s$ , %	8,09 $\pm$ 5,44	9,30 $\pm$ 5,17	+1,22
$D_L$ , %	6,14 $\pm$ 4,22	7,04 $\pm$ 3,78	+0,91
$N$ , шт. / units	131,6 $\pm$ 73,3	142,9 $\pm$ 66,4	+11,2
$K$	0,276 $\pm$ 0,158	0,267 $\pm$ 0,181	-0,009

Примечание: приведены среднее значение и стандартное отклонение (SD) по совокупности зон,  $n = 40$ .

Note: The mean and standard deviation (SD) are given for the total number of zones,  $n = 40$ .

Табл. 2. Усреднение по образцам (образцы 1–8)

Table 2. Averaged values for the specimens (specimens 1–8)

Образец Specimen	Число зон Number of zones	$D_s$ до, % $D_s$ before, %	$D_s$ после, % $D_s$ after, %	$\Delta D_s$ , %	$D_L$ до, % $D_L$ before, %	$D_L$ после, % $D_L$ after, %	$D_L$ , %
1	5	6,78	13,50	+6,72	5,31	9,38	+4,06
2	5	10,69	15,80	+5,11	8,19	11,40	+3,21
3	4	3,52	6,96	+3,44	3,08	5,34	+2,26
4	4	4,96	11,09	+6,14	3,97	8,66	+4,69
5	4	4,83	8,22	+3,39	4,13	6,54	+2,40
6	5	3,54	4,76	+1,22	2,53	4,22	+1,69
7	6	12,05	7,24	-4,81	9,13	5,51	-3,62
8	7	13,27	7,62	-5,65	9,40	5,94	-3,46

при меньшей интенсивности раскрытия пор и разветвления контуров. В то же время для образцов 7–8 наблюдается снижение как площадной, так и линейной дефектности ( $\Delta D_s = -4,81$  и  $-5,65$  %,  $D_L = -3,62$  и  $-3,46$  %), что согласуется со сценарием объединения и перераспределения дефектов: при укрупнении дефектных областей и «сглаживании» сети мелких контуров суммарная доля дефектов и число отдельных дефектов могут уменьшаться, хотя структурная неоднородность и наличие крупных дефектов сохраняются. Именно наличие двух конкурирующих механизмов (разветвление дефектов и их слияние) объясняет, почему по совокупности зон  $\Delta D_s$  и  $D_L$  имеют положительный средний тренд, но отдельные образцы демонстрируют обратную динамику.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам морфологического анализа установлено, что уже на ранней стадии воздействия замораживания – оттаивания в асфальтобетоне фиксируются первичные изменения дефектного пространства, которые следует рассматривать как исходные предпосылки последующего снижения ресурса. В сред-

нем по исследованным зонам наблюдается рост интегральной дефектности: доля дефектной области увеличивается до 9 %, а показатели, характеризующие развитие дефектов по границам, также демонстрируют положительную динамику. Это означает, что ключевым морфологическим проявлением начальной деградации служит не только раскрытие пор и микропустот, но и перестройка конфигурации дефектов с вовлечением межфазных и межзерновых областей в процесс микроповрежденности.

Одновременно показано, что первичные изменения не являются строго однотипными: наряду со сценарием разветвления дефектной сети, сопровождаемым усложнением контуров и появлением новых дефектных элементов, реализуется сценарий объединения, при котором дефекты укрупняются и перераспределяются в менее фрагментированную, но более «концентрированную» структуру дефектов. Наличие двух конкурирующих механизмов объясняет вариативность реакции отдельных зон и подтверждает, что надежная диагностика ранней стадии деградации должна опираться на совместную оценку площадных и линейных морфологических показателей, а не на один параметр.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кирюхин Г.Н. К вопросу о теории структуры асфальтобетона // Дороги и мосты. 2019. № 1 (41). С. 247–261. EDN STEFLF.
2. Yu J., Feng Zh., Chen Ya., Yu H., Korolev E., Obukhova S. et al. Investigation of cracking resistance of cold asphalt mixture designed for ultra-thin asphalt layer // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 414. P. 134941. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134941. EDN KEMLMO.
3. Шестаков Н.И., Чертец К.Л., Ткач Е.В. Сравнительный анализ биопозитивности проектных решений объектов дорожно-транспортного комплекса // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2022. № 3 (39). С. 106–120. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-39-3-106-120. EDN VHOAQ.
4. Обухова С.Ю., Будкина А.О., Королев Е.В. Особенности структурообразования модифицированного вяжущего в присутствии резиновой крошки. Часть 1. Совместимость резиновой крошки с углеводородными пластификаторами // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 1 (58). С. 24–32. DOI: 10.54734/20722958\_2024\_1\_24. EDN SOSNAR.
5. Королев И.В. Модель строения битумной пленки на минеральных зернах в асфальтобетоне // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1981. № 8. С. 63–67.
6. Ядыкина В.В. Управление процессами формирования и качеством строительных композитов с учетом состояния поверхности дисперсного сырья : монография. М. : Изд-во АСВ, 2009. 374 с. EDN SAPOYD.
7. Ядыкина В.В., Траутвайн А.И. Влияние механоактивации минеральных порошков на взаимодействие с битумом и на структурообразование асфальтовяжущего // Ассоциация исследователей асфальтобетона : сб. ст. и докл. ежегодной науч. сессии. 2013. С. 26–32. EDN ZIXYOP.
8. Братчун В.И., Пиеничных О.А., Ромасюк Е.А., Пономаренко П.В., Васильева Т.А., Коваль Д.И. и др. О формировании структуры адсорбционно-сольватных слоев асфальтохризотилового вяжущего вещества на поверхности минеральных материалов дорожного асфальтобетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 1 (153). С. 114–121. EDN VWEBYO.
9. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Оценка влияния степени гидратации цемента на свойства получаемого на его основе минерального наполнителя для асфальтобетонов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 4–5 (56–57). С. 77–84. EDN ZHMYTR.
10. Высоцкая М.А., Русина С.Ю., Резников А., Хлевной И. Пористые дисперсные наполнители в бинарных композициях // Эффективные строительные композиты : науч.-практ. конф. к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. 2015. С. 95–99. EDN UDANSF.
11. Никольский В.Г., Дударева Т.В., Красоткина И.А., Зверева У.Г., Бекешев В.Г., Рочев В.Я. и др. Разработка и свойства новых наномодификаторов для дорожного покрытия // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 7. С. 87. DOI: 10.7868/S0207401X14070073. EDN SGVXUL.
12. Левкович Т.И., Воробьев Е.Г., Терешина Ю.В. Особенности структуры и свойств модифицированных асфальтобетонов и битумов // Научный альманах. 2024. № 2–3 (112). С. 30–35. EDN INQPCN.
13. Шестаков Н.И., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Семенов А.П., Смирнягина Н.Н. Асфальтобетон с использованием углеродных наномодификаторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 21–24. EDN ULFTKT.
14. Самаров А.С. Асфальтобетоны плотной структуры с улучшенными свойствами // Вестник науки. 2024. Т. 4. № 7 (76). С. 284–289. EDN KVOVCG.
15. Ходан Е.П., Кравченко С.Е. Исследование влияния изменения физико-механических свойств на формирование структуры и доуплотнения свежеуложенного асфальтобетона // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : мат. Междунар. науч.-техн. конф. 2020. С. 84–89. EDN YMXDMV.
16. Губа В.В., Губа К.Р., Третьякова Л.Н. Изменение состава, структуры и текстуры асфальтобетона в процессе эксплуатации // Вести Автомобильно-дорожного института. 2023. № 3 (46). С. 17–24. EDN QLGXDH.
17. Zhevanov V., Bratchun V., Postoenko V. Increasing the fatigue life of asphalt concrete by complex modification of their structure // Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2023. No. 4 (162). Pp. 70–75. EDN DVNNDU.
18. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624277. База данных видов двухкомпонентных структур асфальтобетона по особенностям структурообразования / Потанова А.С. 2023.
19. Wang L., Yao Y., Li Ju., Tao Y., Liu K. Review of visualization technique and its application of road aggregates based on morphological features // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 20. P. 10571. DOI: 10.3390/app122010571. EDN JHBVDP.
20. Ломов С.В., Морковкин А.И. Исследование микроструктуры асфальтобетона с использованием рентгеновской компьютерной томографии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024.

T. 90. № 7. С. 40–47. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-7-40-47. EDN PKRWUQ.

21. Shakiba M., Darabi M.K., Abu Al-Rub R.K., You T., Little D.N., Masad E.A. Three-dimensional microstructural modelling of coupled moisture–mechanical response of asphalt concrete // *International Journal of Pavement Engineering*. 2015. Vol. 16. Issue 5. Pp. 445–466. DOI: 10.1080/10298436.2015.1007239

22. Du C., Liu P., Sun Y., Chen J., Liu Q., Oeser M. Characterizing asphalt mixtures with random aggregate gradations based on the three-dimensional locally homogeneous model // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2022. Vol. 37. Issue 13. Pp. 1687–1702. DOI: 10.1111/mice.12796. EDN TLYITA.

Поступила в редакцию 6 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 13 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 13 апреля 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Николай Игоревич Шестаков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; SHestakovNI@mgsu.ru;

Владимир Артурович Дзусев — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; vdzucev699@gmail.com;

Иван Романович Полев — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; drpolev15@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Kiryukhin G.N. On the theory of asphalt concrete structure. *Roads and Bridges*. 2019; 1(41):247-261. EDN STEFLF. (rus.).

2. Yu J., Feng Zh., Chen Ya., Yu H., Korolev E., Obukhova S. et al. Investigation of cracking resistance of cold asphalt mixture designed for ultra-thin asphalt layer. *Construction and Building Materials*. 2024; 414:134941. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134941. EDN KEMLMO.

3. Shestakov N.I., Chertes K.L., Tkach E.V. Comparative analysis of biopositiveness of design solutions of objects of the road and transport complex. *Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2022; 3(39):106-120. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-39-3-106-120. EDN VIHOAQ. (rus.).

4. Obukhova S.Yu., Budkina A.O., Korolev E.V. Structure formation of modified binder in the presence of crumb rubber part 1. Compatibility of crumb rubber and hydrocarbon plasticizers. *Regional Architecture and Engineering*. 2024; 1(58):24-32. DOI: 10.54734/20722958\_2024\_1\_24. EDN SOSNAR. (rus.).

5. Korolev I.V. Model of the structure of bitumen film on mineral grains in asphalt concrete. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1981; 8:63-67. (rus.).

6. Yadykina V.V. Management of formation processes and quality of building composites considering

the surface state of dispersed raw materials. Moscow, ASV Publishing House, 2009; 374. EDN SAPOYD. (rus.).

7. Yadykina V.V., Trautvain A.I. Influence of mechanical activation of mineral powders on interaction with bitumen and on structure formation of asphalt binder. *Association of Asphalt Concrete Researchers : Proceedings of the Annual Scientific Session*. 2013; 26-32. EDN ZIXYOP. (rus.).

8. Bratchun V., Pshenichnykh O., Romasyuk E., Ponomarenko P., Vasilyeva T., Koval D. et al. On the formation of the structure of adsorption-solvate layers of asphalt chrysotile binder on the surface of mineral materials of road asphalt concrete. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022; 1(153):114-121. EDN VWEBYO. (rus.).

9. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Evaluation of the influence of the degree of hydration of cement on the properties of the mineral filler for asphalt concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 4-5(56-57):77-84. EDN ZHMYTR. (rus.).

10. Vysotskaya M.A., Rusina S.Yu., Reznikov A., Khlevnoy I. Porous dispersed fillers in binary compositions. *Effective building composites : scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sci-*

ences Yuri Mikhailovich Bazhenov. 2015; 95-99. EDN UDANSF. (rus.).

11. Nikolsky V.G., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Zvereva U.G., Bekeshev V.G., Rochev V.Ya. et al. Development and properties of new nanomodifiers for road pavement. *Khimicheskaya Fizika*. 2014; 33(7):87. DOI: 10.7868/S0207401X14070073. EDN SGVXUL. (rus.).

12. Levkovich T.I., Worobjev E.G., Teresina Yu.W. Features of the structure and properties of modified asphalt concrete and bitumen. *Scientific Almanac*. 2024; 2-3(112):30-35. EDN IHQPCN. (rus.).

13. Shestakov N.I., Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Semenov A.P., Smirnyagina N.N. Asphalt concrete using carbon nanomodifiers. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2015; 6:21-24. EDN ULFTKT. (rus.).

14. Samarov A.S. Asphalt concrete of dense structure with improved properties. *Science Bulletin*. 2024; 4(7):(76):284-289. EDN KVOVCG. (rus.).

15. Khodan E.P., Kravchenko S.E. Investigation of the influence of changes in physical and mechanical properties on structure formation and compaction of freshly laid asphalt concrete. *Road Construction and its Engineering Support : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 2020; 84-89. EDN YMXDMV. (rus.).

16. Guba V.V., Guba K.R., Tretiakova L.N. Changes in the asphalt concrete composition, structure and texture during operation. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*. 2023; 3(46):17-24. EDN QLGXDH. (rus.).

17. Zhevanov V., Bratchun V., Postoenko V. Increasing the fatigue life of asphalt concrete by complex modification of their structure. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023; 4(162):70-75. EDN DVNNDU.

18. Certificate of state registration of the database No. 2023624277. *Database of types of two-component asphalt concrete structures according to the features of structure formation / Potapova A.S.* 2023.

19. Wang L., Yao Y., Li Ju., Tao Y., Liu K. Review of visualization technique and its application of road aggregates based on morphological features. *Applied Sciences*. 2022; 12(20):10571. DOI: 10.3390/app122010571. EDN JHBVDP.

20. Lomov S.V., Morkovkin A.I. Study of the microstructure of asphalt concrete using X-Ray computed tomography. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2024; 90(7):40-47. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-7-40-47. EDN PKRWUQ. (rus.).

21. Shakiba M., Darabi M.K., Abu Al-Rub R.K., You T., Little D.N., Masad E.A. Three-dimensional microstructural modelling of coupled moisture-mechanical response of asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015; 16(5):445-466. DOI: 10.1080/10298436.2015.1007239

22. Du C., Liu P., Sun Y., Chen J., Liu Q., Oeser M. Characterizing asphalt mixtures with random aggregate gradations based on the three-dimensional locally homogeneous model. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2022; 37(13):1687-1702. DOI: 10.1111/mice.12796. EDN TLYITA.

Received March 06, 2026.

Adopted in revised form on March 13, 2026.

Approved for publication on April 13, 2026.

**B I O N O T E S:** **Nikolay I. Shestakov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; SHestakovNI@mgsu.ru;

**Vladimir A. Dzutsev** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; vdzucev699@gmail.com;

**Ivan R. Polev** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; drpolev15@gmail.com.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*