

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 1 / 2025, Vol. 12, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/11SATS125.pdf>

DOI: 10.15862/11SATS125 (<https://doi.org/10.15862/11SATS125>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 691.168:625.855.3

Оценка влияния неоднородности взаимодействия элементов асфальтобетонного покрытия с целью снижения процесса пластического колееобразования

^{1,2}Ярышкин И.А., ³Майданова Н.В., ¹Карпов Б.Н., ¹Клековкина М.П.

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия

²ООО «ДСК АБЗ-Дорстрой», Санкт-Петербург, Россия

³АО «АБЗ-1» Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ярышкин Игорь Андреевич, e-mail: iyaryshkin@ABZ-1.ru

Аннотация. Проблема колееобразования по сей день остается не решенной как отечественными специалистами, так и зарубежными. В ходе развития нормативной базы дорожно-строительного сектора были получены позитивные результаты, позволившие снизить темпы образования данного дефекта, решена проблема применения устаревшей методики проектирования со сведением расчетной модели к двухслойной конструкции, при этом все еще не учитывающие неоднородность асфальтобетонной конструкции в целом, а именно прочность межслойных связей. Данное исследование нацелено на поиск значений неоднородности вызванными различными параметрами сопряжения граничных слоев, условий производства работ, а также физико-механических свойств применяемы дорожно-строительных материалов. Автор описывает ход эксперимента по определению прочности межслойных связей в образцах, отобранных из дорожного полотна,

с описанием принципа формирования выборки исследуемых точек, и произведенных в лабораторных условиях. Для оценки различных климатических условий для исследования приняты места, уложенные в идеальных, средних и неблагоприятных погодных условиях. В лабораторных образцах применена битумная эмульсия с различным процентным содержанием битума. В работе приведены подробные результаты испытаний, описан опыт применения прибора Лейтнера и проведена оценка полученных данных. Обозначен вектор дальнейший исследований, призванный приблизиться к решению поставленных автором задач.

Ключевые слова: прочность межслойных связей; межслойное сцепление; асфальтобетон; напряжение при сдвиге; концентрация эмульсии; щебнемастичный асфальтобетон; адгезия

Assessment of the influence of heterogeneity in the interaction of asphalt concrete pavement elements with the aim of reducing the process of plastic rutting

^{1,2}Igor A. Yryshkin, ³Natalia V. Maidanova, ¹Boris N. Karpov, ¹Maria P. Klekovkina

¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

²LLC «DSK ABZ-Dorstroy», Saint Petersburg, Russia

³SC «ABZ-1», Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Igor A. Yryshkin, e-mail: iaryshkin@ABZ-1.ru

Abstract. The problem of rutting remains unresolved to this day by both domestic and foreign specialists. In the course of developing the regulatory framework of the road construction sector, positive results have been achieved, allowing for a reduction in the rate of formation of this defect, and the problem of using outdated design methodologies-reducing the calculation model to a two-layer structure-has been addressed. However, the heterogeneity of the asphalt concrete structure as a whole, specifically the strength of interlayer bonds, is still not taken into account. This study is aimed at identifying the values of heterogeneity caused by various parameters of the boundary layer interfaces, construction conditions, as well as the physical and mechanical properties of the road construction materials used. The author describes the experimental procedure for determining the strength of interlayer bonds in samples taken from the road

pavement, with an explanation of the principle of forming the sample set of investigated points, and conducted under laboratory conditions. To account for varying climatic conditions, the study includes locations with ideal, average, and unfavorable weather conditions during construction. In the laboratory samples, a bitumen emulsion with different bitumen content percentages was used. The paper presents detailed test results, describes the experience of using the Leitner device, and provides an evaluation of the obtained data. The direction of further research is indicated, aimed at approaching the solution of the tasks set by the author.

Keywords: interlayer bond strength; interlayer adhesion; asphalt concrete; shear stress; emulsion concentration; stone mastic asphalt; adhesion

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В исследованиях как отечественных, так и зарубежных специалистов, неоднократно отмечается важность параметра межслойного сцепления ввиду высокого влияния этого показателя на такие параметры, как колейность, растрескивания, выкрашивания, выбоины [1–3].

Недостаточное сцепление между слоями асфальтобетонного покрытия может быть вызвано как климатическими факторами (избыточная увлажненность нижележащего слоя покрытия, влажность воздуха, скорость ветра), так и технологическими (запыленность поверхности, нарушение технологии укладки асфальтобетонного покрытия, состояние смеси, степень и режим уплотнения) [4].

Существует множество зарубежных методик расчета, основанных на теории многослойных упругих систем и методике конечных элементов с применением специализированного программного обеспечения, недоступного для использования на территории РФ [5; 6].

В 2024 году с введением нового ГОСТа¹ на проектирование дорожных одежд взамен устаревшего ПНСТ 542² отечественные специалисты решили проблему применения устаревшей методики расчета дорожных конструкций приведения их к упрощенным двухслойным и трехслойным схемам. Расчетной схемой является упругое многослойное полупространство (до семи слоев), нагруженное на внешней поверхности нормальной осесимметрической нагрузкой с расположенными слоями между двух плоскостей: верхним слоем и нижним, простирающимся до бесконечности. На данный момент, специалистами дорожной отрасли так и не адаптирован расчет по предельным состояниям, разработанный Советскими учеными еще в 1955 году [7]. Нынешние методики смогли приблизиться только к 1-ой группе предельных состояний, в свою очередь учет второй группы с введением коэффициентов условий работы (неточность изготовления асфальтобетонной смеси, нарушение технологии, в том числе те, на которые нельзя повлиять технологически, неточность расчета, условность расчетной схемы), коэффициента сочетаний нагрузок (вероятность одновременного появления различных воздействий), которые учитывали бы возможность неполного сцепления, степени неоднородности полученных слоев и покрытий, помогут снизить не только

¹ ГОСТ Р 71404-2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования».

² ПНСТ 542-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования».

процесс колееобразования, но и улучшить физико-механические характеристики дорожной конструкции в целом.

Слои характеризуются модулем упругости E_i и коэффициентом Пуассона ν_i .³ В данном нормативном документе, как и во многих других исследованиях, при расчете принимаются только предельные значения контакта (полное сцепление (спаянный контакт) и свободное проскальзывание (абсолютно гладкий контакт)). Однако практика показывает, что между слоями чаще возникает неполное сцепление, а абсолютно гладкий контакт невозможен ввиду естественной шероховатости асфальтобетонных покрытий. В ряде исследований отечественных специалистов утверждается, что отсутствие сцепления приводит к увеличению горизонтального (растягивающего) напряжения в нижнем слое на 25–45 % и увеличению упругого прогиба дорожной конструкции на 25–30 % [8; 9].

При этом отсутствуют исследования об изменении прочности межслойных связей на стадии эксплуатации дорожной одежды на протяжении срока службы. Данные утверждения позволяют сделать вывод о прямой зависимости между прочностью межслойного сцепления и процессом колееобразования асфальтобетонных покрытий. Из этого следует, что в нынешней системе проектирования не хватает дополнительных коэффициентов запаса прочности, характеризующих вероятность безотказной работы дорожной конструкции, помимо имеющихся коэффициентов по критериям упругого прогиба, сдвигоустойчивости и растяжения при изгибе.⁴

Для дальнейших исследований требуется проведение ряда лабораторных экспериментов для определения значения возникающих напряжений в зоне контакта слоев, особенно определения таковых при граничных условиях сопряжения, спаянного и крайне слабого сцепления.

При решении этой задачи требуется внимание к качеству, условиям нанесения, содержанию остаточного вяжущего подгрунтовочного материала, а именно битумной эмульсии, так как основные физико-химические и связанные с технологией применения характеристики эмульсий — это вязкость, скорость распада и т. д., которые во многом определяются содержанием эмульгатора, кислотнo-щелочным соотношением, температурой, а также свойствами и количественной долей битума. В данном исследовании упор сделан на количественное содержание битума, остальные параметры были приняты одинаковыми во всех образцах.

³ ГОСТ Р 71404-2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» Приложение Д (справочное), п. Д.2.1.

⁴ ГОСТ Р 71404-2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» Приложение Д (справочное), п. 9.2.

Подготовка к испытаниям

Test preparation

В исследуемой проблематике соотношения прочности в зоне контактов слоев важное значение имеет содержание вяжущего в составе эмульсии, наличие или отсутствие подгрунтовки, а также выявление граничных значений. Имеется ввиду установление контактных напряжений, при которых происходит расслоение слоев исследуемой конструкции, а также верхнего предела, при котором разделение происходит вне зоны контакта, т. е. с вырыванием у одного из исследуемых слоев.

Для проведения испытаний был принят за основу ГОСТ Р 70880-2023⁵, устанавливающий метод определения величины сцепления между слоями из асфальтобетонов путем определения напряжения при сдвиге с применением устройства Лейтнера В047-10 (рис. 1).



Рисунок 1. Устройство Лейтнера В047-10 (изображение предоставлено автором)

Figure 1. Leitner device B047-10 (image provided by the author)

На базе научного исследовательского центра АО «АБЗ-1» согласно ГОСТ Р 58406.4-2020⁶ были изготовлены 8 образцов-плит толщиной

⁵ ГОСТ Р 70880-2023 Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Метод измерения сцепления слоев.

⁶ ГОСТ Р 58406.4-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Приготовление образцов — плит вальцовым уплотнителем.

60 мм⁷, имитирующих нижний слой покрытия (далее НСП) из двух видов асфальтобетона SP16Т⁸ на граните с вяжущим PG 70-28⁹, А16Нт¹⁰ на граните и БНД 70/100¹¹, затем их выдерживали при нормальной температуре 22 ±3 °С 24 часа. В последствии с предварительной очисткой поверхности наносился кисточкой подгрунтовочный материал, а именно битумная эмульсия ЭБДК-Б по ГОСТ Р 58952.1-2020¹² различного процентного содержания, вяжущего с эмульгатором 46 %, 51 %, 61 %. Битумная эмульсия изготавливалась с внедрением адгезионной добавки Амдор 10 (0,12 %) без включения стабилизатора (раствор хлористого кальция) ввиду достаточного качества битума [10]. Два образца изготавливались без нанесения эмульсии.

После этого путем уплотнения на лабораторном вальцовом уплотнителе из асфальтобетонов SMA 16⁸ на габбро-диабазе и PG 64-28¹², А16Вт¹³ на габбро-диабазе и БНД 70/100 толщиной 40 мм⁷ устраивался имитирующий верхний слой покрытия (далее ВСП) слой.

Предварительно образец-плита НСП с нанесенным подгрунтовочным материалом выдерживалась 2 часа для достижения полного разложения эмульсии.

После уплотнения полученные образцы двухслойных плит были оставлены на 24 часа при комнатной температуре для стабилизации ВСП.

Далее из полученных лабораторных заготовок стандартным керноотборником выбуривались четыре образца вырубок с последующей очисткой и высушиванием (рис. 2).

Четыре образца отбирались в запас, на случай деформации одного из образца при выбуривании из заготовки.

Таким образом, были получены восемь лабораторных образцов (по 3 вырубки с каждой) (табл. 1).

⁷ ГОСТ Р 70880-2023 Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Метод измерения сцепления слоев., п. 8.2.1.

⁸ ГОСТ Р 58401.1-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования.

⁹ ГОСТ Р 58400.1-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом температурного диапазона эксплуатации.

¹⁰ ГОСТ Р 58406.2-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия.

¹¹ ГОСТ 33133-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования.

¹² ГОСТ Р 58952.1-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Эмульсии битумные дорожные. Технические требования.

¹³ ГОСТ Р 58406.2-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия.

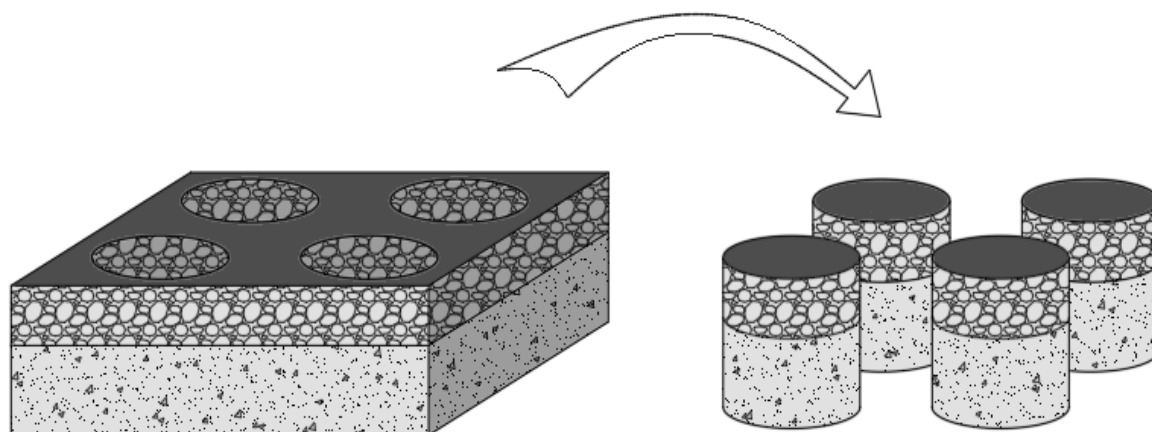


Рисунок 2. Схема выбуривания образцов из заготовки (схема разработана автором)

Figure 2. Diagram of core drilling samples from a slab (scheme developed by the author)

Таблица 1 / Table 1

**Полученные лабораторные пробы из образцов-плит
из различных типов асфальтобетона и характеристиками эмульсии**

**Laboratory samples obtained from sample-slabs from
different types of asphalt concrete and emulsion characteristics**

№ п/п Seq No.	Тип смеси Type of mixture	Содержание вяжущего с эмульгатором, % Binder content with emulsifier, %
1	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	без подгрунтовки / unprimed
2	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	46 %
3	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	51 %
4	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	61 %
5	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	без подгрунтовки / unprimed
6	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	46 %
7	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	51 %
8	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	61 %

Составлено/разработано автором / Compiled/developed by the author

Порядок испытания

Test procedure

Перед испытанием на приборе Лейтнера у полученных образцов (вырубок) определялся диаметр стандартным штангельциркулем по середине заготовки, а также в точках, удаленных от торцов на 1/3 высоты образца (рис. 3).

Полученные замеры округлялись до 1 мм и заносились в таблицу. Усредненный диаметр испытуемого образца должен составлять (100 ± 2) мм, если диаметр будет иметь отклонение более 2 мм, образец не допускается к дальнейшему испытанию.

На границе слоев делалась отметка маркера для повышения точности установки образца в устройстве.



*Рисунок 3. Замер диаметра испытуемого образца
№ 1 в верхней трети вырубки (керна) (изображение предоставлено автором)*

*Figure 3. Measurement of the diameter of test specimen
No. 1 in the upper third of the cut (core) (image provided by the author)*

За 2 часа до испытания образцы термостатировались на воздухе при температуре 21°C. После этого образцы были установлены на устройство Лейтнера и подверглись нагружению с максимальной нагрузкой до 0,1 кН со скоростью 50 мм/мин до падения нагрузки на 35 %.¹⁴ Для предотвращения перекашивания образца при проведении измерения рекомендуется с усилием закручивать фиксирующие болты. Также при вынимании образца после испытания целесообразно снять нагрузку с пресса с большим запасом для максимального смещения верхнего поперечного полукольца, так как, ввиду слабой надежности уплотнительных прокладок, выемка образца приводит к деформации уплотнителей после нескольких испытаний. Запасных в комплекте не имеется.

Для сравнительного анализа результатов испытания прочности межслойных связей образцов, полученных из заготовок лабораторного производства, был произведен отбор вырубков на ул. Будапештская в городе Санкт-Петербург. Укладка на данной улице была осуществлена в мае 2024 года в рамках контракта по ремонту дорог общего пользования регионального значения в южном административном районе Санкт-Петербурга. На улице Будапештская устраивались верхний слой

¹⁴ ГОСТ Р 70880-2023 Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Метод измерения сцепления слоев. п. 9.2.

покрытия и выравнивающий слой (далее Выр.) из аналогичных принятых для исследования асфальтобетонов в образцах, изготовленных в лабораторных условиях, а именно SMA 16⁸ на габбро-диабазе и PG 64-28¹² на ВСП и SP16T⁸ на граните с вяжущим PG 70-28⁹ (выравнивающий слой). Толщины и физикомеханические характеристики определялись во время приемо-сдаточных испытаний в мае того же года. Содержание вяжущего в эмульгаторе битумной эмульсии составляло 46,2 % согласно паспорту качества асфальтобетонного завода (далее АБЗ).

Для испытания были выбраны места с диаметрально противоположными погодными условиями при производстве работ, а также с подходящими по толщине конструктивными слоями для испытания на приборе Лейтнера, непротиворечащими ГОСТу¹⁵ на измерение сцепления слоев.

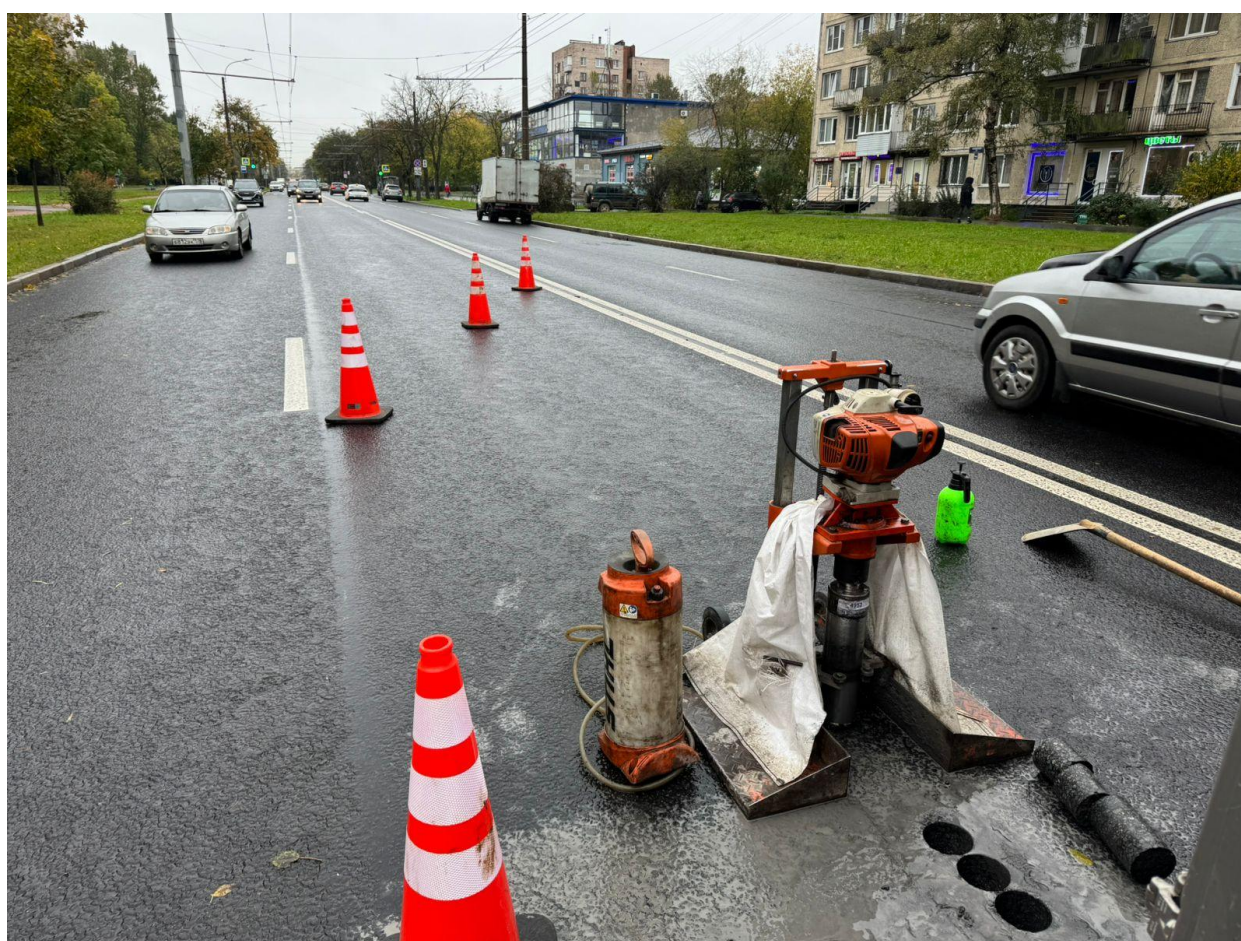


Рисунок 4. Место отбора образцов у начала д. № 17к1, нечетная сторона, 2 полоса (изображение предоставлено автором)

Figure 4. Sampling site at the beginning of building No. 17k1, odd side, Lane 2 (image provided by the author)

¹⁵ ГОСТ Р 70880-2023. Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Метод измерения сцепления слоев. п. 8.2.2.

Первая точка располагалась напротив начала дома № 17 к 1 на нечетной стороне во второй полосе (рис. 4) согласно результатам приёмо-сдаточных испытаний ВСП толщиной 5,5 см с воздушными пустотами 2,7 %. Верхний слой покрытия устраивался в сухую погоду со скоростью ветра 5 м/с. По результатам испытания толщина выравнивающего слоя составила 5,5 см, воздушные пустоты аналогично 2,7 %.

Вторая точка была отобрана в районе середины дома № 104 на четной стороне в первой полосе. Битумная эмульсия, применяемая для полгрунтовки, соответствует эмульсии в первой точке. Толщина верхнего слоя составила 4,5 см, воздушные пустоты — 4,2 %, выравнивающий слой — 7,0 см, воздушные пустоты — 5,0 %. Верхний слой устраивался в сухую погоду со скоростью ветра 3 м/с, выравнивающий слой устраивался в пасмурную погоду с высокой влажностью. Так как при отборе в этой точке удалось извлечь 3 образца с остатками старого асфальтобетонного покрытия (рис. 5), было принято решение также испытать пресность в зоне контакта старого асфальтобетонного покрытия и выравнивающего слоя.



Рисунок 5. Извлеченные образцы у дома № 104 на ул. Будапештская (изображение предоставлено автором)

Figure 5. Extracted samples near building No. 104 on Budapestskaya St. (image provided by the author)

Таким образом, были получены испытываемые образцы для определения прочности интерфейсных связей, приготовленные в лабораторных условиях и отобранные из слоев дорожной одежды.

Результаты

Results

Для оценки полученных данных в таблицу заносились результаты замера диаметра образца в трех точках с определением усредненного значения, а также считанные с устройства Лейтнера значения максимальных нагрузок в кН (рис. 6).



Рисунок 6. Показания прибора Лейтнера образца № 2.3 (изображение предоставлено автором)

Figure 6. Leitner device readings of sample No. 2.3 (image provided by the author)

Напряжение при сдвиге для каждого образца определяется по формуле:

$$\tau = \frac{4F}{\pi \cdot d^2}, \quad (1)$$

где:

τ — напряжение при сдвиге, МПа;

F — значение максимальной нагрузки, Н;

d — диаметр образца до испытания, мм.

Для получения корректного результата требуется полученные результаты максимальной нагрузки при расчете переводить с кН в Н.

Таблица 2 / Table 2

Результаты, вычисленные по формуле (1) для двухслойных асфальтобетонных образцов

Results calculated using formula (1) for two-layer asphalt concrete samples

№ п/п Seq No.	Тип смеси Type of mixture	Концентр. эмульсии, % Emulsion concentration, %	d, мм d, mm	dcp, мм dcp, mm	F, кН F, kN	τ (мин), МПа τ (min), MPa	τ (факт.), МПа τ (fact), MPa	τ, (факт., ср), МПа τ, (fact, cf), MPa	τ (округленное) МПа τ (rounded) MPa
Образцы, изготовленные в лабораторных условиях / Samples produced under laboratory conditions									
1 (рис. 9) (fig. 9)	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	без подгрунтовки unprimed	98 (рис. 3) / (fig. 3)	98	6,978	0,8	0,93	1,17	1,2
			98		10,74		1,42		
			98		8,721		1,16		
2	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	46 %	98	98	8,676	0,8	1,15	1,19	1,2
			98		10,01		1,33		
			98		8,166 (рис. 6) / (fig. 6)		1,08		
3	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	51 %	99	99	11,347	0,8	1,51	1,49	1,5
			98		10,688		1,42		
			99		11,718		1,55		
4	A16Bт(BCП) / A16Hт(HCП)	61 %	98	98	11,53	0,8	1,53	1,60	1,6
			98		12,619		1,67		
			97,8		11,951		1,59		
5	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	без подгрунтовки unprimed	98	98	10,92	0,8	1,45	1,49	1,5
			98,5		12,607		1,67		
			98		10,221		1,36		
6	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	46 %	98,5	99	9,694	0,8	1,29	1,56	1,6
			99		13,006		1,73		
			99		12,617		1,67		
7	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	51 %	98,5	99	12,315	0,8	1,63	1,39	1,4
			98		10,047		1,33		
			100		9,186		1,22		
8	SMA16(BCП) / SP16(HCП)	61 %	98	98	11,611	0,8	1,54	1,48	1,5
			98,5		10,766		1,43		
			98		11,108		1,47		
Образцы, отобранные из дорожной одежды / Samples taken from pavements									
9 (рис. 10) (fig. 10)	SMA16(BCП) / SP16(Выр) (д. 104)	Сухая, ясная погода Dry, clear weather (46,2 %)	99	99	22,69	0,8	3,01	2,77	2,8
			99		20,448		2,71		
			99		19,47		2,58		
10	SP16(Выр) / старый а/б (д. 104)	Пасмурная погода, высокая влажность Cloudy weather, high humidity (46,2 %)	99	99	16,152	0,8	2,14	2,14	2,1
			98		15,959		2,12		
			99		16,212		2,15		
11	SMA16(BCП) / SP16(Выр) д. 17к1	Наблюдалась пасмурная погода Overcast weather was observed (46,2 %)	99	99	16,152	0,8	2,14	2,12	2,1
			99		15,611		2,07		
			99		16,293		2,16		

По ГОСТу требуется округление напряжения сдвига до 0,1 МПа¹⁴; Минимальное требуемое напряжение при сдвиге, равно 0,8 МПа¹⁶. Составлено/разработано автором / GOST requires rounding of shear stress to 0,1 MPa¹⁴; Minimum required shear stress equal to 0,8 MPa¹⁶. Compiled/developed by the author

¹⁶ ГОСТ Р 70880-2023. Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Метод измерения сцепления слоев. п. 10.2

Обсуждение

Discussion

Для упрощения интерпретации полученных результатов (табл. 2) были построены графики зависимости концентрации подгрунтовочного материала и прочности зоны контакта граничных слоев, а также условий устройства асфальтобетонных покрытий.

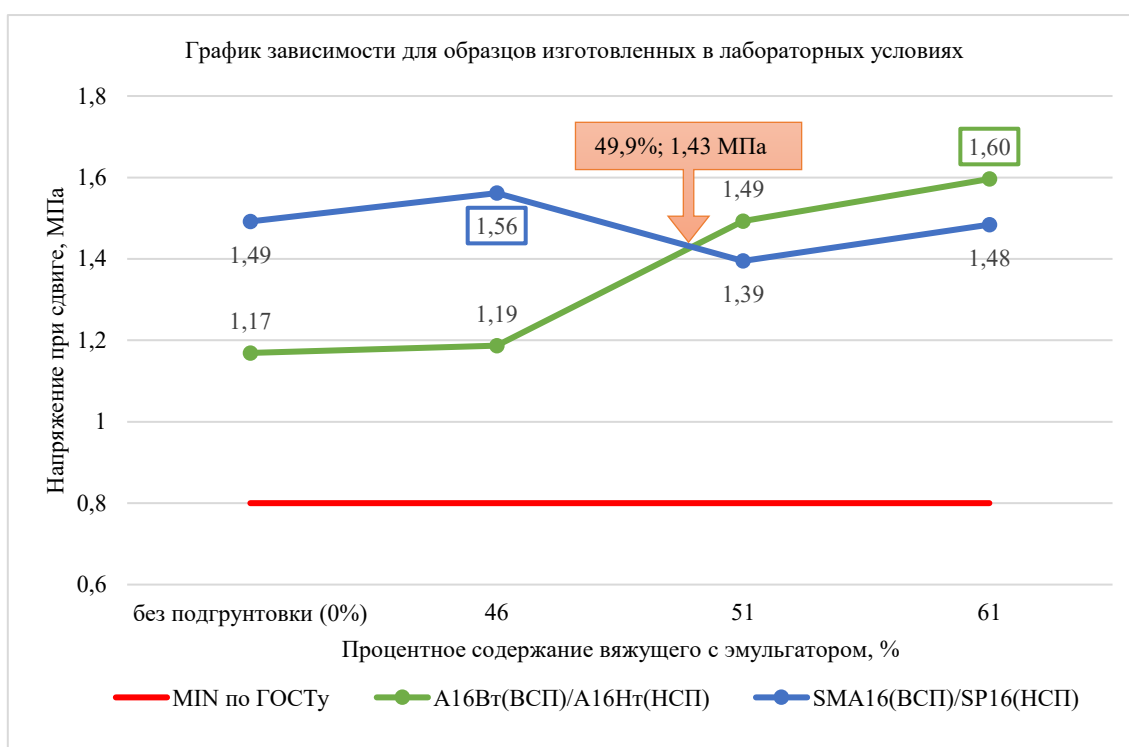


Рисунок 7. График зависимости концентрации эмульсии и напряжения при сдвиге, %/МПа (составлено/разработано автором)

Figure 7. Graph of dependence of emulsion concentration and shear stress, %/MPa (compiled/developed by the author)

На графике выделены наибольшие значения напряжения при сдвиге, характеризующие прочность межслойных связей для каждого вида асфальтобетона. Определена и обозначена точка пересечения линейных графиков.

Как видно, из полученного графика, напряжение при сдвиге изменяется предсказуемо у плотных мелкозернистых смесей, где с увеличением процентного содержания вяжущего вырастает прочность при сдвиге. На основании того факта, что увеличение содержания вяжущего, согласно исследованиям, не приводит к увеличению адгезионных свойств, при формировании опытных образцов увеличение процента содержания вяжущего сопровождалось повышением содержания эмульгатора, что в теории при совокупности должно было увеличить адгезионные свойства,

сбалансировать скорость разрушения, снизить расслоение и увеличить вязкость (рис. 10 [11]).

Что касается щебнемастичного асфальтобетона, наблюдается неочевидная картина с увеличением прочности до 46 % и с последующим снижением прочностных характеристик в зоне контакта слоев до значений меньше, чем в образцах с полностью отсутствующей поверхностной обработкой эмульсиями.

Ранее в СП 78.13330.2012 (Изменение № 1) регламентировались условия, при которых устройство подгрунтовки не предполагалось, а именно: при интервале времени между устройством верхнего и нижнего слоя покрытия прошло не более 2 суток, на протяжении которых отсутствовали осадки и движение построечного транспорта. Однако в последних редакциях этот пункт был исключен и прописано обязательная обработка поверхности нижнего слоя из монолитных материалов битумной или битумно-полимерной эмульсией.¹⁷ Учитывая эти особенности, приходим к выводу, что для нахождения граничного значения экстремума требуется лабораторный эксперимент с нарушением требований по подготовке поверхностной обработки, а именно запыленное, сырое основание. Данное утверждение позволяет сделать вывод о фактической возможности устройства покрытий из высокомастичных асфальтобетонных покрытий без применения поверхностной обработки, но в строго идеальных условиях (а именно: минимальный интервал между устройством асфальтобетонных покрытий, отсутствие движения транспортных средств и построечной техники, сухие погодные условия).

Кроме того, в исследовании Кирюхина Г.Н. отмечается негативность перерасхода битума в связующем слое, так как при даже запроектированном повышенном расходе вяжущего в подгрунтовочном материале требуется учет этого факта при подборе состава щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси [12].

Так как в SMA16 в составе идет большое содержание мастики, при превышении битумного вяжущего в эмульсиях может происходить когезионный разрыв в адсорбционном слое. Так как эмульсионная гранула имеет двойной электрический слой, общий потенциал системы снижается по мере удаления от поверхности капли, в диффузном слое такой потенциал снижается по экспоненте. Как показывают исследования Уфимских ученых, прямых методов оценки потенциалов в адсорбционном слое не существует, однако для простоты оценки данного показателя предлагается обратиться к электрокинетическому потенциалу ξ (дзета потенциал) [13]. Данная величина позволяет оценивать устойчивость эмульсий при контакте с

¹⁷ СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменениями № 1, 2, 3), п. 12.3.2.

субстратом, согласно которому с увеличением размера частицы битума, а точнее — увеличением адсорбционного слоя, поверхность скольжения смещается дальше от гранулы эмульсии, тем самым снижая эффективность адгезионных связей, что наблюдается на полученном графике.

Наличие точки пересечения графиков равно 1,43 МПа при 49,9 % для каждого вида смеси наводит на универсальное процентное содержание вяжущего с эмульгатором, однако стоит понимать, что этот процент является усредненным показателем и подходит для оптимизации затрат при формировании проекта, однако рекомендуется определять оптимальное процентное соотношение для каждого вида смеси отдельно.

Не стоит исключать, что полученные данные имеют некоторую погрешность, вызванную высоким среднеарифметическим отклонением у образцов, полученных в лабораторных условиях, согласно расчету, это отклонение составило 13,9 %, в свою очередь, у образцов, отобранных из дорожной конструкции, такое отклонение составило 4,9 %.

Дополнительно стоит отметить, что при испытании образцов было выявлено различие напряжение сдвига в образцах в каждой точке среднеарифметическое отклонение, примерно схоже с различием между других точек, что так же может создавать неоднозначность полученных результатов и говорит о недостаточности массива данных.

Далее, согласно таблице 2, был составлен график зависимости напряжения сдвига при различных погодных условиях образцов, отобранных из дорожных конструкций (образцы № 9–11).

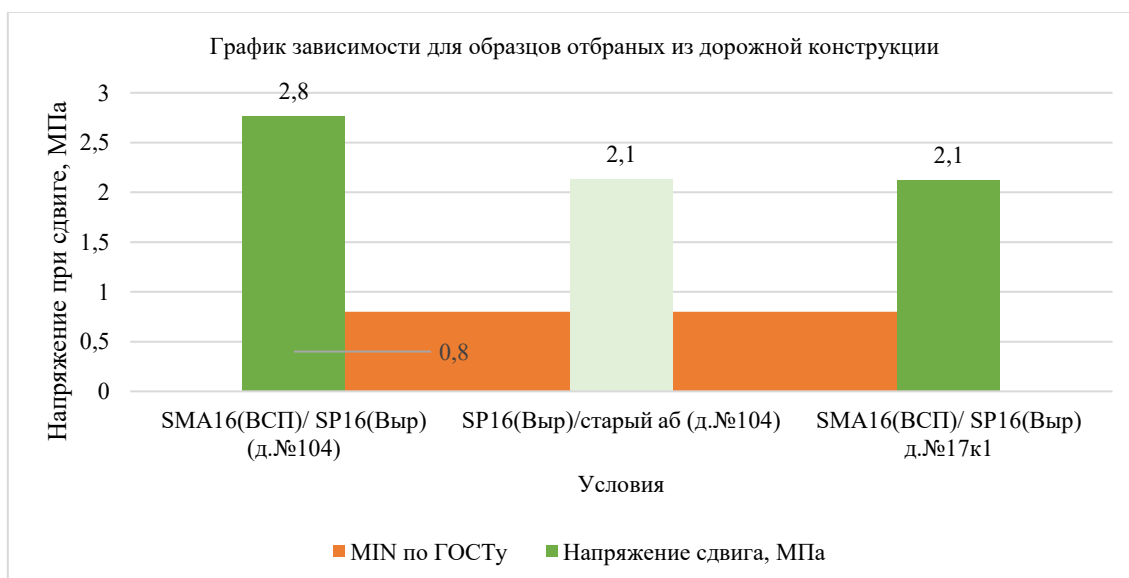


Рисунок 8. График зависимости условий устройства асфальтобетонных покрытий и напряжения при сдвиге, условия/МПа (составлено/разработано автором)

Figure 8. Graph of dependence of asphalt concrete pavement conditions and shear stress, conditions/MPa (compiled (developed) by the author)

На графике обозначена граница минимально допустимого значения напряжения при сдвиге, для визуализации выделена мятным цветом, результат прочности интерфейсных связей выравнивающего слоя со старым асфальтобетонным покрытием. На графике видна явная зависимость между погодными условиями и результатом прочности межслойных связей. В более благоприятную и сухую погоду значение напряжения при сдвиге между ВСП и Выр на 23 % выше, чем при пасмурной сырой погоде. В свою очередь, значение интерфейсной прочности между выравнивающим слоем и старым отфрезерованным асфальтобетоном, уложенном в наиболее неблагоприятных погодных условиях, соответствует значению 2,1 МПа. Это может объясняться тем, что сцепление со старым асфальтобетоном изначально прочнее ввиду пористости и шероховатости, вызванной фрезерованием.

Нельзя не отметить достаточно серьёзное отличие полученных результатов интерфейсных сдвиговых напряжений между образцами, полученными в лабораторных условиях, и образцами из полотна. Такое различие может быть вызвано изначальным пониманием, что все лабораторные испытания имеют ориентировочный характер, и нет точной зависимости с образцами из конструкций, требуется определение корректировочного коэффициента для достижения максимального сближения получаемых результатов.

Вызвано это кардинально отличающейся эффективностью промышленного оборудования для смешивания асфальтобетонных смесей и лабораторного смесителя. Также механика уплотнения лабораторного вальцового уплотнителя и уплотнение асфальтобетона на линии схожа, однако сильно отличается. Что также может объяснять расхождение полученных данных между образцами из конструкции и лабораторно изготовленным. Такая особенность присутствует в том числе и при испытании в различных лабораториях, что не раз отмечалось в различных исследованиях [14; 15].

Стоит также уделить особое внимание полученным образцам после испытания, а именно характеру и структуре разрушения образцов.

Если мы обратим внимание на образец с минимальным напряжением при сдвиге 1,2 МПа (табл. 2), а именно с наихудшими сцепными свойствами, как видно на изображении (рис. 9), разрушение наблюдается приоритетно в зоне контакта слоев, отклонение трещины образца без подгрунтового материала от зоны сопряжения слоев составляет 3,99 мм, максимальное раскрытие до 2 мм. Однако зона разрушения так или иначе протекает с вырыванием материала из верхнего слоя покрытия, что логично перекликается с требованиями в нормативной литературе и подтверждает наличие сцепления в той или иной мере.

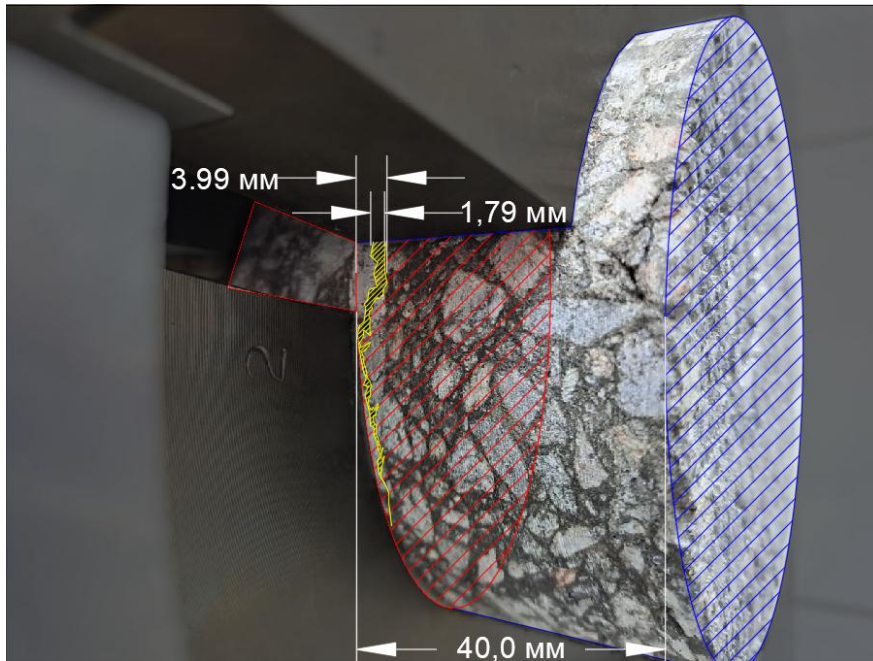


Рисунок 9. Общий вид образца с минимальным значением максимального нагружения (Образец № 1, без применения подгрунтовочного материала, 1,2 МПа) (изображение предоставлено и разработано автором)

Figure 9. General view of the specimen with the minimum value of maximum loading (Specimen No. 1, without application of priming material, 1,2 MPa) (image provided and developed by the author)

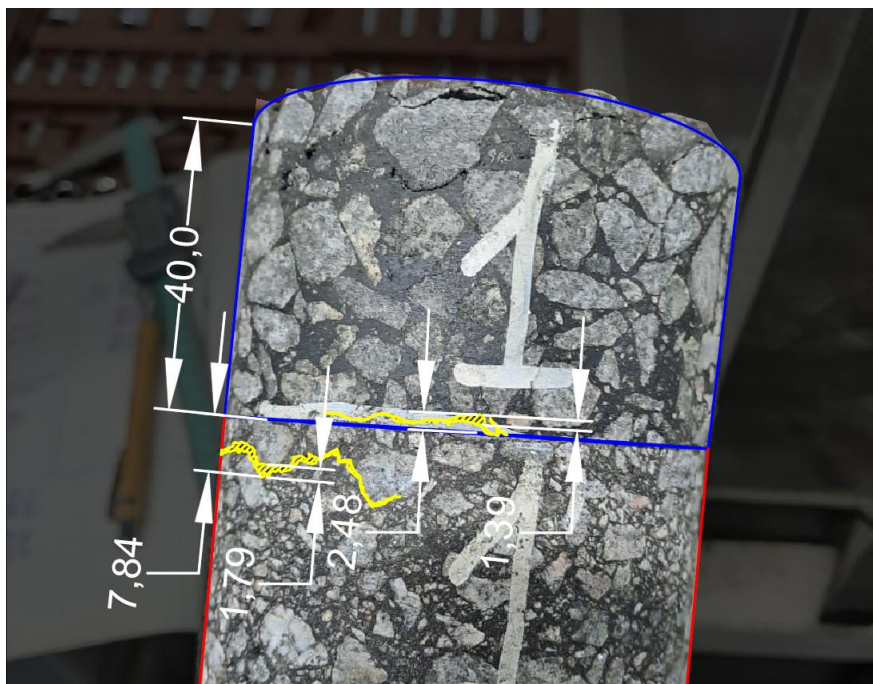


Рисунок 10. Общий вид образца полученного из дорожной конструкции с максимальным значением максимального напряжением сдвига (Образец № 9, 2,8 МПа) (изображение предоставлено и разработано автором)

Figure 10. General view of the specimen obtained from the road structure with the maximum value of the maximum shear stress (Specimen No. 9, 2,8 MPa) (image provided and developed by the author)

На образце полученного из дорожной конструкции с наибольшим показателем сцепной прочности (2,8 МПа) отклонение зоны разрыва вынесено от интерфейсного пространства на 7,84 мм с вырыванием минеральной части покрытия, с максимальным раскрытием трещины до 2 мм. Основное место разрыва было локализовано в нижнем слое покрытия, менее прочном, что подтверждает логику набора прочности межслойных связей и приводит к заключению о наличии максимально возможного значения прочности в зоне контакта слоев, измеряемой прочностными свойствами самого асфальтобетона. Стоит также отметить, что визуально разрушение образца с более прочными связями имеет более обширный характер, хоть и имеет меньшее значение сдвига верхнего слоя относительно оси образца.

Выводы

Conclusions

Таким образом были получены результаты, согласно которым можно сделать вывод, что для улучшения сцепных качеств между асфальтобетонными покрытиями требуется предварительно подбирать концентрацию подгрунтового материала индивидуального для каждого типа асфальтобетона. Для повышения точности получаемых данных, требуется увеличивать массив испытаний, так как данный метод выдает неточные результаты. При дальнейших испытаниях натуральных образцов, для снижения отклонений полученных результатов, требуется при устройстве покрытий приборно определять атмосферную влажность, а также влажность покрытия нижнего слоя в зоне контакта слоев. Дополнительно для упрощения исследования данной темы и проведения параллелей с процессом пластического колееобразования требуется полученные данные применить для формирования конечно-элементной модели в программных продуктах, для последующего введения дополнительных разрушающих взаимодействий, от температурных перепадов, до амплитудно-частотных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акразм, Н.М.** Review: Shear Properties and Various Mechanical Tests in the Interface Zone of Asphalt Layers / Н.М. Акразм, R. Muniandy, F.M. Jakarni, S. Hassim // Infrastructures. — 2023. — Vol. 8. — P. 48. URL: <https://www.mdpi.com/2412-3811/8/3/48>. DOI: [10.3390/infrastructures8030048](https://doi.org/10.3390/infrastructures8030048). EDN: [GFZZKE](https://www.edn.net/GFZZKE). (Дата обращения: 12.12.2024).
2. **Демьянушко, И.В.** Конечно-элементная оценка влияния сцепления между слоями асфальтобетона на прочность верхних слоев асфальтобетонного дорожного покрытия / И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, А.В. Стаин, А.Е. Симчук // Дороги и мосты. — 2024. — № 51-1. URL: <https://rosdornii.ru/dim/51-vypusk/konechno-elementnaya-otsenka-vliyaniya-stsepleniya-mezhdu-sloyami-asfaltobetona-na-prochnost-verkhni/>. (Дата обращения: 12.12.2024).

3. **He, H.** Characterization of Interlayer Bonding Mechanism Based on Interface Morphology in Double-Layered Asphalt Systems / H. He, C. Ai, Y. Liu, H. Zou, A. Rahman // Journal of Materials in Civil Engineering. — 2023. — Vol. 35(6). — Art. 04023121. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JMCE E7.MTENG-15259>. DOI: [10.1061/JMCEE7.MTENG-15259](https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15259). (Дата обращения: 12.12.2024).
4. **Zhang, H.** Effects of Continuous Laydown and Compaction on Interlayer Shear Bonding of Asphalt Layers / H. Zhang, M. Gong, J. Wu, Q. Sun // Advances in Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 2019. — P. 1–12. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2019/2184094>. DOI: [10.1155/2019/2184094](https://doi.org/10.1155/2019/2184094). (Дата обращения: 12.12.2024).
5. **Ragni, D.** Investigation into fatigue life of interface bond between asphalt concrete layers / D. Ragni, N. Sudarsanan, F. Canestrari, Y.R. Kim // International Journal of Pavement Engineering. — 2021. — Vol. 23(10). — P. 1–15. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2021.1894420>. DOI: [10.1080/10298436.2021.1894420](https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1894420). (Дата обращения: 12.12.2024).
6. **Yang, K.** Characterization of bonding property in asphalt pavement interlayer: A review / K. Yang, R. Li // Journal of Traffic and Transportation Engineering. — 2021. — Vol. 8(1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756421000386?via%3Dihub>. DOI: [10.1016/j.jtte.2020.10.005](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.10.005). (Дата обращения: 12.12.2024).
7. **Стрелецкий, Н.С.** К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям / Н.С. Стрелецкий // Развитие методики расчета по предельным состояниям: сб. статей / под ред. Е.И. Беленя. — М.: Стройиздат, 1971. — С. 257–262.
8. **Кадыров, Г.Ф.** Нормирование подхода к инструментальной оценке сцепления асфальтобетонных слоев / Г.Ф. Кадыров // Дороги России XXI века. — 2023. — Т. 134. — № 2. URL: https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/14_04_23/dorogi-rossii-2-2023.pdf. (Дата обращения: 21.12.2024).
9. **Симчук, Е.Н.** Количественная оценка сцепления асфальтобетонных слоев дорожной одежды / Е.Н. Симчук, М.Ю. Горский, Г.Ф. Кадыров, А.Е. Симчук, А.В. Стрельцов // Наука и техника. — 2023. — № 4.
10. **Углова, Е.В.** Исследование влияния адгезионных присадок на физико-химические свойства дорожных битумов / Е.В. Углова [и др.] // Транспортные сооружения. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 4. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38097383>. DOI: [10.15862/04SATS119](https://doi.org/10.15862/04SATS119). EDN: [ANLWJN](https://www.edn.net/ANLWJN). (Дата обращения: 21.12.2024).
11. **Карпенко, Ф.В.** Битумные эмульсии. Основы физикохимической технологии производства и применения / Ф.В. Карпенко, А.А. Гуреев. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1998. — 192 с.
12. **Кирюхин, Г.Н.** Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. — М.: ООО "Издательство "Элит", 2009. — 102 с. URL: <https://books.totalarch.com/n/0361>. (Дата обращения: 21.12.2024).
13. **Кошкарров, В.Е.** Исследование электрокинетической природы эмульсионных вяжущих веществ / В.Е. Кошкарров, А.Ф. Ахметов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. — 2014. — № 1. — С. 220–231. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22266855>. EDN: [STGXIZ](https://www.edn.net/STGXIZ). (Дата обращения: 21.12.2024).
14. **Корюк, В.П.** Лабораторное и производственное уплотнение асфальтобетонных смесей / В.П. Корюк, Я.В. Ильин // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету. — 2017. — № 79. — С. 138–142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30565363>. EDN: [ZSWKIV](https://www.edn.net/ZSWKIV). (Дата обращения: 21.12.2024).
15. **Рапопорт, П.Б.** Стандарты на методы испытаний дорожно-строительных материалов и конструкций автомобильных дорог / П.Б. Рапопорт [и др.] // Строительные материалы. — 2010. — № 3. — С. 20–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15114933>. EDN: [MSTTRT](https://www.edn.net/MSTTRT). (Дата обращения: 21.12.2024).

Сведения об авторах:

Ярышкин Игорь Андреевич — ведущий инженер ОКК, ООО «ДСК АБЗ-Дорстрой», Санкт-Петербург, Россия, аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: iyaryshkin@ABZ-1.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1186193

Майданова Наталья Васильевна — кандидат технических наук, заместитель директора по качеству, руководитель НИЦ, АО «АБЗ-1», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: nmaydanova@ABZ-1.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1270693

***Карпов Борис Николаевич** — доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ad@spbgasu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=338990

Клековкина Мария Петровна — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: megapolis775@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=782013

Статья получена: 12.02.2025. Принята к публикации: 28.05.2025. Опубликована онлайн: 05.06.2025.

**Карпов Борис Николаевич* доктор технических наук, почетный дорожник, наставник, основоположник научного направления «Теория и расчет дорожных покрытий на основе исследования пластинчатых систем с разрывными параметрами» всю жизнь занимался развитием дорог. Предложил концепцию учета неоднородности, которая легла в основу нашего исследования. Данная работа — первый шаг в направлении нового принципа проектирования, Борис Николаевич придумал общую концепцию и основные этапы ее развития. Однако окончание данной работы не застал. Всеми авторами единогласно было принято решение добавить его в соавторы как благодарность и дань памяти его труду. К сожалению, в рецензировании работы и интерпретации полученных результатов Борис Николаевич поучаствовать не успел.

Светлой памяти.

REFERENCES

1. Akraym H.M., Muniandy R., Jakarni F.M., Hassim S. Review: Shear properties and various mechanical tests in the interface zone of asphalt layers. *Infrastructures*. 2023;8:48. URL: <https://www.mdpi.com/2412-3811/8/3/48>. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8030048>. (In Eng.).
2. Demyanushko I.V., Stain V.M., Stain A.V., Simchuk A.E. Finite element assessment of the effect of adhesion between asphalt concrete layers on the strength of the upper layers of asphalt concrete pavement. *Roads and bridges*. 2024;(51-1). URL: <https://rosdormii.ru/dim/51-vypusk/konechno-elementnaya-otsenka-vliyaniya-stsepleniya-mezhdu-sloyami-asfaltobetona-na-prochnost-verkhni/> (accessed 12.12.2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. He H., Ai C., Liu Y., Zou H., Rahman A. Characterization of interlayer bonding mechanism based on interface morphology in double-layered asphalt systems. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023;35(6):04023121. DOI: <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15259>. (In Eng.).
4. Zhang H., Gong M., Wu J., Sun Q. Effects of continuous laydown and compaction on interlayer shear bonding of asphalt layers. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019;2019:1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2184094>. (In Eng.).
5. Ragni D., Sudarsanan N., Canestrari F., Kim Y.R. Investigation into fatigue life of interface bond between asphalt concrete layers. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021;23(10):1–15. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1894420>. (In Eng.).
6. Yang K., Li R. Characterization of bonding property in asphalt pavement interlayer: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2021;8(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.10.005>. (In Eng.).

7. Streletskiy N.S. [On the development of calculation methods for limit states]. In: [Development of calculation methods for limit states: collection of articles]. Ed. by Belenya E.I. Moscow: Stroyizdat; 1971:257–262. (In Russ.).
8. Kadyrov G.F. [Standardization of the approach to instrumental assessment of adhesion of asphalt concrete layers]. *Dorogi Rossii XXI veka*. 2023;134(2). URL: https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/14_04_23/dorogi-rossii-2-2023.pdf (accessed 21.12.2024). (In Russ.).
9. Simchuk E.N., Gorskiy M.Y., Kadyrov G.F., Simchuk A.E., Streltsov A.V. [Quantitative assessment of adhesion of asphalt concrete pavement layers]. *Science and Technology*. 2023;(4). (In Russ.).
10. Uglova E.V., Eremenko E.A., Sikachyova N.V., Kuzin K.A. Research of influence of adhesive additives on physical and chemical properties of road bitumens. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019;6(1):4. DOI: <https://doi.org/10.15862/04SATS119>. (In Russ., abstract in Eng.).
11. Karpenko F.V., Gureev A.A. [Bitumen emulsions. Fundamentals of physical and chemical technology of production and application]. Moscow: TsNIITENeftekhim; 1998:192. (In Russ.).
12. Kirukhin G.N., Smirnov E.A. [Stone mastic asphalt concrete pavements]. Moscow: ООО "Izdatelstvo "Elit"; 2009:102. URL: <https://books.totalarch.com/n/0361> (accessed 21.12.2024). (In Russ.).
13. Koshkarov V.E., Akhmetov A.F. Study of electrokinetic nature of emulsion bindes. *Oil and Gas Business*. 2014;(1):220–231. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22266855> (accessed 21.12.2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Koriuk V., Iliyn V. Laboratory and production seal of asphalt-concrete mixtures. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2017;(79):138–142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30565363> (accessed 21.12.2024). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Rapoport P.B. [Standards for testing methods of road (building materials and road structures)]. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2010;(3):20–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15114933> (accessed 21.12.2024). (In Russ.).

Information about the authors:

Igor A. Yryshkin — LLC «DSK ABZ-Dorstroy», Saint Petersburg, Russia, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: iyaryshkin@ABZ-1.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1186193

Natalia V. Maidanova — SC «ABZ-1», Saint Petersburg, Russia, e-mail: nmaydanova@ABZ-1.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1270693

Boris N. Karpov — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: ad@spbgasu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=338990

Maria P. Klekovkina — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: megapolis775@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=782013

Submitted: 12th February 2025. Revised: 28th May 2025. Published online: 05th June 2025.