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

2020, №3, Том 7 / 2020, N 3, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-3-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS320.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS320 (<http://dx.doi.org/10.15862/07SATS320>)

Исследование и моделирование процесса образования отраженных трещин в двухслойных асфальтобетонных системах

Каменчуков А.В., Украинский И.С.

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Каменчуков Алексей Викторович, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы трещиностойкости многослойных систем из асфальтобетона, а именно: исследуются причины и особенности возникновения и развития «отраженных» трещин. Выполнено исследование эксплуатационного состояния автомобильных дорог и определены предпосылки к образованию дефектов на покрытии, в том числе исследованы региональные особенности работы дорожной конструкции. Авторами всесторонне изучены причины возникновения внутренних и внешних дефектов и деформаций асфальтобетонных покрытий. Рассмотрены наиболее популярные технологии заделки трещин и восстановления покрытия, также исследован опыт ремонта дорог западной части России, Европы и США. Представлены результаты определения скорости образования и развития дефектов покрытия эксплуатируемых дорог.

В лабораторных условиях выполнена работа по моделированию трещин в двухслойных образцах из мелкозернистого асфальтобетона. Опытные образцы высотой и диаметром 10 см изготавливались формованием и уплотнялись послойно, в нижний слой образца закладывалась трещина. После набора прочности образцы

испытывались на сжатие. Анализ результатов физического моделирования позволил выдвинуть предположение о существовании зависимости между наличием (отсутствием) внутренних дефектов покрытия и прочностью конструкции.

Для подтверждения гипотезы выполнено математическое моделирование работы двухслойной системы в программном комплексе GenIDE32. Оценка напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов показала наличие характерных зон ослабления системы вокруг области дефекта. В двухслойной системе наблюдается увеличение внутренних напряжений и деформаций вокруг трещины, а также уменьшение общей прочности (устойчивости) системы. В заключении сделаны выводы о влиянии внутренних дефектов покрытий из асфальтобетона на процесс образования «отраженных» трещин.

Ключевые слова: автомобильная дорога; отраженные трещины; эксплуатационное состояние; качество покрытия; дефекты; оценка прочности; напряженно-деформированное состояние

Reflected cracks buildups surveying and process simulation in double-layer asphalt-concrete systems

Aleksey V. Kamenchukov, Ilya S. Ukrainskiy

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Corresponding author: Aleksey V. Kamenchukov, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

Abstract. The paper studies the matters of multilayer asphalt-concrete systems cracking resistance, specifically we investigated the occurrence and development causes and peculiarities of the reflected cracks. In this study was examined the highways' state of repair and the prerequisites for the defects formation on the pavement were determined, as well as the regional road structure operation aspect. The authors studied from every angle the causes of internal and external asphalt concrete pavements defects and deformations. The most popular filling of cracks technologies and restoring the pavement are were discussed in this paper, also the experience of roads repairing in the western part of Russia, Europe, and the USA was investigated. The determination results of the formation and development defects rate on the surface of the operated roads are presented in this article.

Cracks in double-layer samples of fine-grained asphalt-concrete were simulated in laboratory conditions. A prototype model of 10 cm height and diameter were made by molding and densifying in layers, and a crack was laid in the lower layer of the

prototype. After densifying samples were tested for compression. The physical modeling results analysis allows us to assume the dependence between the presence (or absence) of pavement internal defects and the structural solidity.

Mathematical modeling of the operation of a double-layer system was performed in the GenIDE32 software package to confirm the hypothesis. Evaluation of the stress-strain state by the finite element method showed the presence of system weakening characteristics zones around the defect area. There is increasing internal stresses and deformations around the crack in a double-layer system, as well as a decrease in the overall system strength (stability). In the end, conclusions about the influence of asphalt-concrete pavement internal defects on the reflected cracks formation process were drawn.

Keywords: road; reflected cracks; operational state; surface quality; defects; strength assessment; stress-strain state

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

Согласно постановлению Правительства РФ от 30 мая 2017 г. «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения» межремонтные сроки эксплуатации федеральных автомобильных дорог I–IV категории увеличены до 12 лет, а капитального ремонта – до 24 лет.

Дороги – один из главных факторов развития региона и страны в целом. Социально-экономическое развитие Дальневосточного федерального округа связано с освоением огромной территорией, на тысячи километров удаленной от крупных промышленных центров России, во многом определяется состоянием и эффективностью функционирования транспортной системы.

Опыт проектирования и строительства дорог на территории юга Дальнего Востока показал, что фактический межремонтный срок службы дорог значительно меньше общепринятых стандартов. Решение задачи продления межремонтного срока службы и повышения работоспособности автомобильных дорог не имеет однозначного решения [1–8].

Срок службы многих дорожных одежд составляет менее 10 лет, тогда как согласно требованиям нормативной документации этот показатель должен составлять 24 года. Помимо этого, недостаточность средств, выделяемых на ремонт и содержание дорог, ведет к накоплению недоремонта на 30–35 % существующей автодорожной сети [4; 9].

На протяжении всего срока службы автомобильная дорога подвергается постоянному неблагоприятному атмосферному и природно-климатическому воздействию: неравномерный температурный режим работы, периодическое увлажнение поверхностными и грунтовыми водами, глубокое сезонное промерзание и не равномерное оттаивание конструктивных слоев дорожной одежды. Все эти воздействия приводят к дестабилизации системы «дорожная одежда – земляное полотно», т. е. к изменению водно-теплового режима земляного полотна и уменьшению прочностных характеристик конструктивных слоев дорожной одежды [10–12].

В ранее выполненных исследованиях установлено, что прочность грунтовых оснований и общая прочность дорожных одежд изменяется пропорционально влажности исходя из принципа, чем больше относительная влажность материалов, тем меньше прочности дорожной одежды. В целом модуль деформации связных грунтов, в соответствии с

отраслевыми дорожными нормами по проектированию дорожных одежд, изменяется в пределах от 108 до 23 МПа и нелинейно зависит от влажности. Столь существенные изменения прочности грунта недопустимы в реальных условиях эксплуатации дорожной одежды и приводят к образованию и развитию дефектов в конструкции [3; 11; 13].

Нестабильная работа дорожного основания, несомненно, является одной из причин образования трещин в монолитных слоях дорожной одежды. Именно трещины являются наиболее частым видом дефектов дорожных одежд. Они являются отправной точкой для образования более серьезных дефектов и приводят к ухудшению качества и безопасности дорожного движения.

Эксплуатационное состояния дорог и причины образования «отраженных» трещин

Roads state of repair and the reasons for the "reflected" cracks formation

На протяжении всего срока службы автомобильная дорога и инженерно-технические сооружения на ней подвергаются постоянному неблагоприятному атмосферному и природно-климатическому воздействию: неравномерный температурный режим работы, периодическое увлажнение поверхностными и грунтовыми водами, глубокое сезонное промерзание и не равномерное оттаивание элементов и конструкций. Все это приводит к тому, что в прочных инженерных конструкциях и сооружениях образуются дефекты (трещины, сколы, выбоины, коррозия). При своевременном обнаружении и ликвидации дефектов срок службы сооружения не изменяется [10; 14–16]. К сожалению, на объектах линейного строительства нет возможности организовать работы по постоянному мониторингу и диагностике таких элементов как дорожная одежда, водопропускные трубы (железобетонные и металлические), элементы мостовых переходов, барьерное ограждение, что приводит к появлению и несвоевременному устранению дефектов. Необходимо сказать, что в данном исследовании углубленно не рассматриваются техники и технологии ремонта металлических конструкций. Основной упор в работе сделан на исследование процессов образования, развития и устранения дефектов в материалах на основе органических и не органических вяжущих, применяемых в практике дорожного строительства.

При значительном накоплении дефектов и деформаций необходимо выполнять работы или реконструкции автомобильной дороги. В настоящее время наиболее часто применяемым способом локального ремонта дорог является ямочный ремонт, когда верхний слой покрытия

удаляется фрезой и на его место укладывается новый слой покрытия. Для ремонта рекомендуется применять горячие асфальтобетонные смеси, а холодные смеси применяются только в тех районах, где нет возможности обеспечить доставку горячих смесей. Кроме этого, для снижения стоимости проведения работ и рационального использования дорожно-строительных материалов рекомендуется применять восстановленные асфальтобетонные смеси [17–20].

Технологическая последовательность работ, при ремонте покрытия, представлена следующими операциями:

- очистка поверхности дороги от влаги, грязи и пыли;
- разметка границ ремонтных работ прямыми линиями вдоль и поперек оси дороги; вырезка покрытия вместе ямочного ремонта;
- очистка дна и стенок места ремонта от мелких кусков асфальта, крошки, грязи, влаги и пыли;
- обработка дна и стенок тонким слоем битума или битумной эмульсией;
- устройство слоев покрытия из асфальтобетонных смесей.

Границы работ размечают маркером или нарезают бороздочки нарезчиком швов, после чего дорожной фрезой (например, Wirtgen 1000C) удаляется старое покрытие на глубину 5–7 см.

Рисунок 1. Участок вновь отремонтированного покрытия методом холодного фрезерования в Хабаровском крае (разработано автором)

Figure 1. Section of the newly repaired pavement by cold-milling in the Khabarovsk Territory (developed by the author)

Укладка асфальтобетонной смеси производится вручную или с использованием малогабаритных асфальтоукладчиков. При укладке смеси вручную, планировка и выравнивание участка также производится подручными средствами. После укладки и разравнивания смеси производится уплотнение смеси вибротрамбовками и катками. Следует

отметить, что ручная укладка и разравнивание смеси снижает качество отремонтированного участка и от нее, по возможности, следует отказаться (рисунок 1 и рисунок 2).

Ремонт покрытия дороги, выполненный с соблюдением всех требований и норм проведения ремонтных работ, позволяет обеспечить нормативную работу отремонтированного участка в течение 3–4 лет, а в отдельных случаях гарантия дается на 5 лет. Однако исследования эксплуатационной надежности дорожных одежд выполнялись только для европейской части страны, Европы и южных территорий США, где климат более мягкий и нет больших перепадов температур [10; 13; 15; 20].

1 – новое покрытие; 2 – старое покрытие; 3 – основание с дефектами; 4 – трещина, заполненная битумом или битумной мастикой

1 – new pavement; 2 – old pavement; 3 – road foundation with defects; 4 – crack filled with bitumen or bitumen mastic

Рисунок 2. Состояние дорожного покрытия
после ямочного ремонта (разработано автором)

Figure 2. Pavement condition after patching (developed by the author)

Анализ статистических данных по определению скорости образования трещин [14] на вновь отремонтированном покрытии показал, что «отраженные» трещины появляются на покрытии в период от 1 до 6 месяцев, причем интенсивность образования трещин зависит от интенсивности воздействия транспортной нагрузки и природно-климатических условий.

Такие дефекты как трещины, сколы, выбоины, шелушение и коррозия устраняются, условно, либо заделыванием дефекта новым материалом с аналогичными свойствами, либо физическим разрушением части конструкции с последующим заполнением аналогичным материалом. Устранив дефект любым способом, восстанавливается поверхностная, но не внутренняя целостность конструкции. Внутри конструктивного элемента (например, железобетонной балки пролетного строения моста или асфальтобетонной дорожной одежды) остаются небольшие пустоты или трещины, которые со временем, под действием факторов, указанных выше, «отражаются» на поверхности. Механизм развития «отраженных» дефектов исследуется отечественными и

зарубежными специалистами на протяжении последних 15–20 лет. Принято считать, что материалы на основе цементного вяжущего более подвержены процессу образования отраженных трещин из-за жесткости своей внутренней структуры [10; 16; 19].

Большинство исследований по отраженным трещинам посвящены изучению физико-химических процессов и оценки напряженно-деформированного состояния изделий из бетона и материалов на основе неорганических вяжущих, но этот процесс до сих пор полностью не изучен. Что уж говорить о материалах на основе органических вяжущих. При несвоевременном или неполном устранении дефектов дорожной конструкции после ремонта отраженные трещины на покрытии появляются с катастрофической быстротой. Материалы на основе органического вяжущего обладают большей пластичностью, поэтому связи между частицами более хрупкие и трещины в них развиваются быстрее.

Физическое моделирование «отраженных» трещин

Physical modeling of "reflected" cracks

Принято считать, что трещины в нижнем слое покрытия не влияют на общую прочность конструкции дорожной одежды, так как пространство трещины заполнено однородным материалом, обеспечивающим прочную взаимосвязь частиц асфальтобетона между собой. Кроме этого, величина растягивающих напряжений в верхних слоях дорожной одежды невелика, что так же не должно способствовать развитию трещин.

Образование отраженных трещин на покрытиях дорожных одежд – процесс, происходящий в несколько стадий, в котором участвует большое количество переменных факторов. В связи с этим, моделирование отраженных трещин в лабораторных условиях – это сложная, нетривиальная научная задача. Предложенная авторами методика проходит этап апробации, накопления статистических данных.

Для проверки гипотезы о том, что дефекты основания, помимо всего прочего, влияют на запас прочности конструкции при сжатии (основное воздействие транспортной нагрузки) в испытательном центре строительных материалов Тихоокеанского государственного университета выполнено испытание образцов двухслойного покрытия из асфальтобетона с заложением в нижний слой покрытия искусственной трещины [21].

Для изготовления образцов использовалась асфальтобетонная смесь, наиболее широко применяемая в регионе исследования для сооружения покрытий дорожных одежд: мелкозернистая асфальтобетонная смесь, тип Б марка I на битуме БНД 90/130. Смесь была изготовлена на

асфальтобетонном заводе, повторно разогрета в лаборатории и отформована.

Согласно плану эксперимента было изготовлено 4 серии образцов, по 6 образцов в каждой серии: три серии образцов с трещиной, и одна контрольная серия без трещины. Образцы цилиндрической формы высотой и диаметром 10 см. При формовании смесь укладывалась двумя слоями толщиной слоя после уплотнения 6 см и 4 см. Для моделирования в структуре материала трещины, заполненной полимерным веществом без прочностного каркаса из минерального заполнителя, в нижний слой образца закладывалась пластина из экструдированного пенополистирола. Выбранный материал имел достаточную жесткость и температурную стойкость (температура плавления экструдированного пенополистирола $+270^{\circ}\text{C}$, температура укладки асфальтобетона – в интервале $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$) для моделирования трещин в заданном направлении и с требуемой глубиной 2 см, 3 см и 4 см (рисунок 3). В то же время прочностные свойства экструдированного пенополистирола не позволяли создать армирующий элемент, придающий асфальтобетонному образцу дополнительную жесткость. Пористая структура экструдированного пенополистирола, уплотняющаяся в процессе формования образца под нагрузкой в 40 МПа, создавала в структуре асфальтобетона элемент, схожий по своим свойствам с трещиной, заполненной полимерно-битумной мастикой. Образцы формовались в соответствии с ГОСТ 12801-98.

Рисунок 3. Моделирование трещины в образце: а – закладка трещины; б – образец, заполненный асфальтобетоном; в – двухслойный образец (разработано автором)

Figure 3. Crack simulation in a prototype: a – crack filling; b – a prototype filled with asphalt-concrete; c – double-layer prototype (developed by the author)

После выдерживания необходимого срока для остывания, твердения и набора прочности образцы были испытаны на сжатие на прессе ИП 6083-500-0 (рисунок 4). Перед испытанием образцы не подвергались дополнительному термостатированию, испытание проводилось при температуре в лаборатории 20°C . Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Рисунок 4. Объем выборки и испытание образца: а – объем выборки;
б – испытание образца в прессе ИП 6083-500-0 (разработано автором)

Figure 4. Sample size and prototype testing: а – sample size;
b – the prototype test in the IP 6083-500-0 press (developed by the author)

Таблица 1 / Table 1

Предел прочности на сжатие, кН

Ultimate compressive strength, kN

№ образца prototype No	Предел прочности образца, кН, при глубине трещины Prototype ultimate limit, kN, at crack depth			
	2 мм 2 mm	3 мм 3 mm	4 мм 4 mm	контрольный (0 мм) checking (0 mm)
1	36,49	36,71	38,60	42,29
2	33,31	38,07	35,57	43,46
3	42,64	30,82	28,87	33,20
4	33,55	35,35	28,93	38,60
5	43,22	32,00	27,80	35,89
6	31,19	30,05	40,17	42,91
Среднее \ The average	36,73	33,83	33,32	39,39
y=ax+b	36,22	34,61	32,99	39,45

Разработано автором / Developed by the author

Также выполнено моделирование структуры трещины с помощью древесноволокнистых плит толщиной 2 и 4 мм. Моделирование проводилось аналогичным образом. Результаты моделирования показали, что данный материал не подходит для моделирования трещин. Однако установлено данный материал подходит для армирования асфальтобетона, так как увеличивает предел прочности на сжатие примерно на 10–15 %.

В программном комплексе STATISTICA выполнена обработка результатов испытаний и, методом наименьших квадратов, подобрана эмпирическая зависимости предела прочности на сжатие от наличия (отсутствия) трещины в основании и ее глубины.

$$y = Ax + b, \quad (1)$$

где x – глубина трещины, мм; A – эмпирический коэффициент, $A = -1,614$; B – эмпирический коэффициент, $B = 39,452$.

Математическое моделирование

Mathematical simulation

Для решения поставленной задачи оценки работоспособности двухслойного асфальтобетонного покрытия с внутренними деформациями используется программный продукт GenIDE32, предназначенный для решения прикладных задач геомеханики в строительстве.

Область применения и назначение программного комплекса заключается в расчет, анализ и оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов инженерных сооружений и геологической среды в рамках модели системы «сооружение – геосреда» на действие объемных (гравитация, фильтрация, температура, сейсмика) и поверхностных сил.

Решение статических задач линейной теории упругости производится на основе численного решения уравнений линейной теории упругости методом конечных элементов (МКЭ)¹ [22–25].

Условие равновесия для однородного, изотропного и весомого тела имеет следующий вид

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad (2)$$

где $\sigma_{ij,j}$ – частные производные тензора напряжений; F_i – объемные силы в системе координат.

Так как относительные деформации считаются малыми, то компоненты тензора относительных деформаций определяются по геометрическим уравнениям Коши:

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3)$$

где $u_{i,j}$, $u_{j,i}$ – частные производные компонента вектора перемещений в прямоугольной системе координат.

Уравнение связей между компонентами тензоров напряжений и тензоров относительных деформаций, характеризующие физическое состояние системы, определяются следующим образом:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{ij}, \quad (4)$$

где E_{ijkl} – компоненты симметричного тензора упругости, а именно:

$$E_{ijkl} = E_{jikl} = E_{jilk} = E_{ijlk}. \quad (5)$$

¹ Жданова С.М. Принципы обеспечения стабилизации земляного полотна в южной зоне вечной мерзлоты: дис. д-ра техн. наук. – Хабаровск, 2007.

Уравнения неразрывности деформаций Навье записывается следующим образом:

$$E_{ijkl}u_{j,kk} + E_{ijkl}u_{j,ki} + F_i = 0, \quad (6)$$

Граничные условия модели можно записать в виде уравнений:

$$u_i = u_i n_i \text{ на } S_u, \quad (7)$$

$$F_i = \sigma_{ij} n_j \text{ на } S_f, \quad (8)$$

где n_i, n_j – направляющие косинусы на границах S_u и S_f ; u_i, F_i – векторы перемещений и усилий на границах S_u и S_f .

Физическая интерпретация МКЭ основана на принципе возможных перемещений Лагранжа, заключающийся в том, что в равновесном состоянии системы при произвольно малых перемещениях полная работа внутренних сил равна полной возможной работе внешних сил¹ [22]:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_V \delta u^T p dV = \int_S \delta u^T q dS = \int_L \delta u^T f_L dL, \quad (9)$$

где $\delta \varepsilon$ – вариации тензора относительных деформаций; σ – тензор внутренних напряжений; δu – вариации вектора возможных перемещений; p, q, f_L – объемные, поверхностные и сосредоточенные внешние нагрузки, действующие на систему (тело).

Минимизация уравнения (9) приводит его к виду основного уравнения метода конечных элементов, записанного в матричной форме

$$[K]\{u\} = \{F\}, \quad (10)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости системы; $\{u\}$ – глобальный вектор смещений; $\{F\}$ – глобальный вектор сил.

Для составления матрицы жесткости любых конечных элементов необходимо решить следующее уравнение:

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV, \quad (11)$$

Где $[B]$ – матрица производных функций формы; $[D]$ – матрица упругости; $[B]^T$ – транспонированная матрица производных функций формы; V – объем, по которому производится интегрирование.

Матрица упругости свойств материала для плоской задачи теории упругости записывается в виде:

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu_1)} \begin{bmatrix} 1 & \nu_1 & 0 \\ \nu_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_1)/2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где E – модуль деформации (упругости); ν – коэффициент Пуассона, $\nu_1 = \nu$ – для плоского напряженного состояния; $\nu_1 = \nu(1-\nu)$ – для плоской деформации.

Матрицы упругости для плоской задач теории упругости предполагает использование в физических уравнениях следующие вектора относительных деформаций и напряжений

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{xy}\}^T, \quad (13)$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{xy}\}^T, \quad (14)$$

Главные напряжения и относительные деформации вычисляются по формулам теории напряжений и деформаций механики сплошной среды.

Средние напряжения и средние относительные деформации вычисляются по формулам:

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3, \quad (15)$$

$$\varepsilon_m = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3, \quad (16)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – компоненты главных напряжений и относительных деформаций.

В имитационной модели глубина трещины в нижнем слое двухслойной асфальтобетонной конструкции составляет 3 см при ширине 4 мм. Трещина в модели представлена ослабленным слоем асфальтобетона: модуль упругости верхнего слоя 2400 МПа, нижнего слоя – 1400 МПа, трещины – 800 МПа. Общие размеры модели составляют 19х8 см.

Оценка напряженно-деформированного состояния выполнена в программе GenIDE32. Тензоры вертикальных напряжений и полные напряжения в первичной модели (А) и модели имитирующей трещину (Б) представлены на рисунках 5 и 6.

Анализ результатов моделирования (рисунок 5 и 6) показал, что тензоры вертикальных напряжений σ_{yy} и полные напряжения σ в имитационных моделях изменяются незначительно. В зоне трещины практически отсутствуют тензоры вертикальных напряжений σ_{yy} , а общие изменения тензоров вертикальных напряжений составляет не более 0,5 % и этими изменениями можно пренебречь.

Рисунок 5. Тензоры вертикальных напряжений σ_{yy} (разработано автором)

Figure 5. Vertical intensity tensors σ_{yy} (developed by the author)

Рисунок 6. Полные напряжения системы σ (разработано автором)

Figure 6. The total system stresses σ (developed by the author)

Рисунок 7. Тензоры вертикальных деформаций ϵ_{yy} (разработано автором)

Figure 7. Vertical deformations tensors ϵ_{yy} (developed by the author)

Рисунок 8. Полные деформации системы ϵ (разработано автором)

Figure 8. The total system ϵ deformations (developed by the author)

Тензоры вертикальных деформаций и полные деформации в первичной модели (А) и модели имитирующей трещину (Б) представлены на рисунках 7 и 8.

Дополнительно выполнена оценка коэффициента прочности (устойчивости) первичной модели (А) и модели имитирующей трещину (Б) показала, что наличие (отсутствие) внутренних дефектов конструкции (трещин) приводит к незначительному (до 5 %) общему снижению прочности конструкции (рисунок 9).

Рисунок 9. Коэффициент прочности (устойчивости) системы **Kstr** (разработано автором)

Figure 9. Strength (stability) coefficient of the **Kstr** system (developed by the author)

Это в первую очередь связано с тем, трещина является микроослаблением конструкции и после заполнения битумом или мастикой внутренние связи в материале восстанавливаются. Тем не менее в результате длительного многократного приложения нагрузки разрушение материала начитается именно в зоне ослабления, так как ни битум, ни мастика не обеспечивают настолько же прочных связей как конгломератная структура асфальтобетона.

Так же анализ коэффициента прочности (устойчивости) системы **Kstr** показывает, что маленькие опытные образцы двухслойной асфальтобетонной конструкции (лабораторные цилиндры 10х10 см и

математическая модель 19х8 см) не обладают достаточной прочностью чтобы сопротивляется воздействию расчетной транспортной нагрузки, но позволяют с необходимым уровнем достоверности говорить о том, что материал с внутренними дефектами обладает меньшей прочностью и подвержен ускоренному разрушению именно в зоне ослабления конструкции.

Заключение

Conclusion

В результате выполненных исследований можно однозначно сказать, что внутренние дефекты в двухслойной конструкции однозначно приводят к уменьшению прочности системы. Кроме этого, можно сделать следующие выводы:

- Физическое и математическое моделирование работы двухслойной асфальтобетонной конструкции с трещиной и без нее дает примерно одинаковые результаты, распределение главных и вертикальных напряжений равномерное и образец под действием вертикальной нагрузки разрушается правильно.
- Моделирование и оценка вертикальных деформаций в конструкции показывает, что увеличение деформаций происходит только в зоне ослабления конструкции. Циклическое повторение нагружений приводит к накоплению внутренних напряжений и усталостных деформаций, в результате чего на поверхности образуется «отраженная» трещина или более значительный дефект конструкции.
- Скорость образования «отраженных» дефектов покрытия при физическом моделировании определить не удалось, так как для этого необходимо подвергнуть конструкцию многократному кратковременному воздействию расчетной нагрузки.
- Математическое моделирование многократного нагружения конструкции показывает скорость накопления внутренних напряжений и деформаций, и говорит только о количестве приложений расчетной нагрузки необходимом для накопления предельно-допустимого напряженно-деформированного состояния конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каменчуков А.В.** Влияние исходной информации на качество проектирования строительства и ремонта автомобильных дорог / А.В. Каменчуков, В.А. Ярмолинский, Е.В. Кривко. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 180 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28891034> (дата обращения: 11.07.2020).
2. **Ярмолинский В.А.** Пути повышения надежности работы дорожных конструкций региональной автодорожной сети Дальнего Востока / В.А. Ярмолинский, А.В. Лопашук // Транспортное строительство. – 2012. – № 3. – С. 6–9.
3. **Каменчуков А.В.** Оценка надёжности работы нежестких дорожных одежд / А.В. Каменчуков // Четвертый Всероссийский дорожный конгресс «Перспективные технологии в строительстве и эксплуатации автомобильных дорог»: сб. науч. тр. / М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2015. – С. 127–131. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26504033> (дата обращения: 09.07.2020).
4. **Ярмолинский А.И.** Учет динамики изменений климатических условий при назначении конструкций автомобильных дорог Дальнего Востока / А.И. Ярмолинский, В.А. Ярмолинский // Дальний восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. Международный сборник научных трудов / под ред. А.И. Ярмолинского Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – С. 7–18. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21678785> (дата обращения: 22.06.2020).
5. **Лопашук А.В.** Типовые конструкции дорожных одежд северных провинций КНР / А.В. Лопашук, Л.В. Кормилицина, Та Минян // Транспортное строительство. – 2014. – № 9. – С. 16–20.
6. **Ярмолинский В.А.** Повышение работоспособности автомобильных дорог на международных транспортных переходах с КНР / В.А. Ярмолинский, В.В. Лопашук, Та Минян // Транспортное строительство. – 2015. – № 3. – С. 9–12.
7. **Davis K.L.** The rocky road to translation in spinal cord repair / K.L. Davis // Automotive News. – 2003. – Т 75, № 5915. – С. 36.
8. **Радовский Б.С.** "Руководство по механико-эмпирическому проектированию новых и реконструируемых дорожных одежд" (США) / Б.С. Радовский, А.Е. Мерзликин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2005. – № 1. – С. 34.
9. **Каменчуков А.В.** Оценка прочности дорожных одежд в период весенней распутицы / А.В. Каменчуков, В.А. Ярмолинский // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса / Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – С. 61–65. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28140434> (дата обращения: 29.06.2020).
10. **Wise B.** Rising From The Rubble: Los Angeles Repairs Its Roads / B. Wise // American City & County. – 1994. – Т 109, № 13. – С. 36–46.
11. **Горячев М.Г.** Оценка степени снижения модуля упругости связных грунтов в результате их весеннего разуплотнения для прогнозирования состояния дорожных одежд / М.Г. Горячев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2013. – № 4. – С. 77а–82. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20681923> (дата обращения: 17.05.2020).

12. **Горячев М.Г.** Уточнение расчётных параметров нагружения дорожных одежд / М.Г. Горячев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 3. – С. 14–15.
13. **Onyango M.** Analysis of cost effective pavement treatment and budget optimization for arterial roads in the city of Chattanooga / M. Onyango, S.A. Merabti, J. Owino, I. Fomunung, W.Wu. – DOI [10.1007/s11709-017-0419-5](https://doi.org/10.1007/s11709-017-0419-5) // Frontiers of Structural and Civil Engineering. – 2017. – Т 12, № 3. – С. 291–299. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11709-017-0419-5> (дата обращения: 29.05.2020).
14. **Пугачёв И.Н.** Комплексный подход к повышению безопасности дорожного движения на основе анализа транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги / И.Н. Пугачёв, А.В. Каменчуков, В.А. Ярмолинский, Н.Г. Шешера // Дороги и мосты. – 2018. – № 1. – С. 21.
15. **Khan T.U.** Use of Multiple Non-Destructive Evaluation Approaches in Connecticut to Establish Accurate Joint Repair and Replacement Estimates for Composite Pavement Rehabilitation / T.U. Khan, S.T. Norton, K. Keegan, J.S. Gould, C.D. Jacques // Airfield and Highway Pavements 2017, 2017. – 201–208.
16. **Подольский В.П.** Повышение качества существующей сети автомобильных дорог на основе оптимизации ремонтных работ / Вл.П. Подольский, О.В. Рябова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 4. – С. 87–96. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17087238> (дата обращения: 01.06.2020).
17. **Каменчуков А.В.** Повышение эффективности ремонта автомобильных дорог с учетом их эксплуатационного состояния / А.В. Каменчуков, В.А. Ярмолинский. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 147 с.
18. **Жигульский В.И.** Ремонт автомобильных дорог с использованием современных технологий и материалов / В.И. Жигульский, О.В. Галыгин // Вестник развития науки и образования. – 2014. – № 2. – С. 125–128.
19. **Ushakov V.V.** Revision of descriptions and calculated properties of road bed soils and asphalt concrete materials upon designing of highway pavements in terms of criteria of residual deformations and fatigue cracking of asphalt concretes / V.V. Ushakov, V.A. Yarmolinsky, E.M. Dobrov, M.G. Goryachev, S.V. Lugov // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2017. – Т 8, № 9. – С. 1074–1083. – URL: http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJCIET/VOLUME 8 ISSUE 9/IJCIET_08_09_120.pdf (дата обращения: 07.06.2020).
20. **Kim S.** Evaluating link criticality of road network based on the concept of macroscopic fundamental diagram / S. Kim, H. Yeo. – DOI [10.1080/23249935.2016.1231231](https://doi.org/10.1080/23249935.2016.1231231) // Transportmetrica A: Transport Science. – 2017. – Т 13, № 2. – С. 162–193. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23249935.2016.1231231> (дата обращения: 12.07.2020).
21. **Каменчуков А.В.** Моделирование трещин в асфальтобетонном покрытии / А.В. Каменчуков, И.С. Украинский // Современные проблемы и направления развития автомобильно-дорожного комплекса в Российской Федерации. сб. докладов Всерос. (Национ.) науч.-практич. конф. 23–25 октября 2019 г. Пенза: ПГУАС, 2019. – 68–70.

22. **Михайлин Р.Г.** Методика численного моделирования усиления основания дорожных одежд автомобильных дорог георешетками / Р.Г. Михайлин // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 2. – С. 72–76. – URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41360> (дата обращения: 17.06.2020).
23. **Вайнштейн Е.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния дорожной одежды лесовозной автодороги по касательным напряжениям методом конечных элементов / Е.В. Вайнштейн, В.М. Вайнштейн, П.А. Нехорошков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1. – С. 64–73. – URL: <http://vestnik.volgatech.net/index.php/forest/article/view/163> (дата обращения: 11.07.2020).
24. **Гусев Н.К.** Исследование прочности слоёв конструкции дорожной одежды из материалов, укрепленных полимерно-минеральной композицией "Nicoфлок" / Н.К. Гусев, П.А. Нехорошков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2013. – № 2. – С. 52–58.
25. **Вольская Н.С.** Моделирование взаимодействия автомобильного колеса с неровной опорной поверхностью / Н.С. Вольская, Я.Ю. Левенков, О.А. Русанов // Машиностроение и инженерное образование. – 2011. – № 4. – С. 40–46.

Сведения об авторах:

Каменчуков Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7997-3195>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207104736>

Украинский Илья Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 006012@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1958-9540>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=548294

Статья получена: 12.08.2020. Принята к публикации: 14.09.2020. Опубликована онлайн: 07.10.2020.

Грант Президента РФ договор № 075-15-2020-286 (внутренний номер МК-511.2020.8).

REFERENCES

1. Kamenchukov A.V., Yarmolinskiy V.A., Krivko E.V. [*Influence of initial information on the quality of design, construction and repair of highways*]. Khabarovsk: Pacific State University Publ.; 2016. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28891034> (accessed 11th July 2020). (In Russ.).
2. Yarmolinskiy V.A., Lopashuk A.V. Methods to increase reliability in the operation of road constructions, road network in the Far East. *Transport construction*. 2012; (3): 6–9. (In Russ., abstract in Eng.).
3. Kamenchukov A.V. Reliability assessment work nonrigid road clothes. In: Moscow Automobile and Road Construction State University (MADI). [*Fourth All-Russian Road Congress "Advanced Technologies in the Construction and Operation of Highways"*]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State University (MADI) Publ.; 2015. p. 127–131. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26504033> (accessed 9th July 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Yarmolinskiy A.I., Yarmolinskiy V.A. [Taking into account the dynamics of changes in climatic conditions in the appointment of structures for highways in the Far East]. In: Pacific National University, Yarmolinskiy A.I. (ed.). [*"Far East. Highways and traffic safety" International collection of scientific papers*]. Khabarovsk: Publishers PNU; 2013. p. 7–18. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21678785> (accessed 22nd June 2020). (In Russ.).
5. Lopashuk A.V., Kormilitsina L.V., Ta Minyan Standard road structures in the northern provinces of People's Republic of China. *Transport construction*. 2014; (9): 16–20. (In Russ., abstract in Eng.).
6. Yarmolinskiy V.A., Lopashuk V.V., Ta Minyan Increasing of road transport efficiency at international crossings with China. *Transport construction*. 2015; (3): 9–12. (In Russ., abstract in Eng.).
7. Davis K.L. The rocky road to translation in spinal cord repair. *Automotive News*. 2003; 75(5915): 36. (In Eng.).
8. Radovskiy B.S., Merzlikin A.E. ["Guidelines for the Mechanical-Empirical Design of New and Reconstructed Pavements" (USA)]. *Science and Engineering for Highways*. 2005; (1): 34. (In Russ.).
9. Kamenchukov A.V., Yarmolinskiy V.A. Assessment of strength pavement during spring thaw. In: Pacific National University. [*Far East: problems of development of the architectural and construction complex*]. Khabarovsk: Publishers PNU; 2016. p. 61–65. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28140434> (accessed 29th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Wise B. Rising From The Rubble: Los Angeles Repairs Its Roads. *American City & County*. 1994; 109(13): 36–43. (In Eng.).
11. Gorjachev M. The estimation of the reduction degree of cohesive soils elastic modulus as a result of their spring decompression for the forecast of pavement condition. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2013; (4): 77a–82. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20681923> (accessed 17th May 2020). (In Russ., abstract in Eng.).

12. Gorjachev M. [Refinement of the design parameters of the pavement loading]. *Science and Engineering for Highways*. 2013; (3): 14–15. (In Russ.).
13. Onyango M., Merabti S.A., Owino J., Fomunung I., Wu W. Analysis of cost effective pavement treatment and budget optimization for arterial roads in the city of Chattanooga. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017; 12(3): 291–299. (In Eng.) DOI: [10.1007/s11709-017-0419-5](https://doi.org/10.1007/s11709-017-0419-5).
14. Pugachev I.N., Kamenchukov A.V., Yarmolinskiy V.A., Sheshera N.G. [An integrated approach to improving road safety based on the analysis of the transport and operational state of the highway]. *Roads and bridges*. 2018; (1): 21. (In Russ.).
15. Khan T.U., Norton S.T., Keegan K., Gould J.S., Jacques C.D. Use of Multiple Non-Destructive Evaluation Approaches in Connecticut to Establish Accurate Joint Repair and Replacement Estimates for Composite Pavement Rehabilitation. In: *Airfield and Highway Pavements 2017*. 2017. p. 201–208.
16. Podolsky V.I., Ryabova O.V. Upgrading the existing network of highways based on the optimization of repair works. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2011; (4): 87–96. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17087238> (accessed 1st June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
17. Kamenchukov A.V., Yarmolinskiy V.A. [Improving the efficiency of road repairs taking into account their operational condition]. Khabarovsk: Publishers PNU; 2013. (In Russ.).
18. Zhigulsky V.I., Galygin O.V. Repairing automobile roads with the usage of modern technologies and materials. *Science and Education Development Bulletin*. 2014; (2): 125–128. (In Russ., abstract in Eng.).
19. Ushakov V.V., Yarmolinsky V.A., Dobrov E.M., Goryachev M.G., Lugov S.V. Revision of descriptions and calculated properties of road bed soils and asphalt concrete materials upon designing of highway pavements in terms of criteria of residual deformations and fatigue cracking of asphalt concretes. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017; 8(9): 1074–1083. Available at: http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJCIET/VOLUME_8_ISSUE_9/IJCIET_08_09_120.pdf (accessed 7th June 2020). (In Eng.).
20. Kim S., Yeo H. Evaluating link criticality of road network based on the concept of macroscopic fundamental diagram. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2017; 13(2): 162–193. (In Eng.) DOI: [10.1080/23249935.2016.1231231](https://doi.org/10.1080/23249935.2016.1231231).
21. Kamenchukov A.V., Ukrainskiy I.S. [Modeling cracks in asphalt concrete pavement]. In: Penza State University of Architecture and Construction. [Modern problems and directions of development of the automobile and road complex in the Russian Federation. Collection of reports of the All-Russian (National) scientific and practical conference on October 23–25, 2019]. Penza: Penza State University of Architecture and Construction Publ.; 2019. p. 68–70.
22. Mikhaylin R.G. Numerical modelling technique of geogrid reinforcement of the base of road clothes for highways. *Fundamental research*. 2017; (2): 72–76. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41360> (accessed 17th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).

23. Vainshtein E.V., Vainshtein V.M., Nekhoroshkov P.A. Research of strain-stress state of road structure of forest motor road by tangential stress with the use of finite-element method. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management.* 2012; (1): 64–73. Available at: <http://vestnik.volgatech.net/index.php/forest/article/view/163> (accessed 11th July 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
24. Gusev N.K., Nekhoroshkov P.A. Study of solidity of road structure constructed with the use of polymer-mineral composition "Nicoflok". *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management.* 2013; (2): 52–58. Available at: <http://vestnik.volgatech.net/index.php/forest/article/view/105> (accessed 2nd July 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
25. Volskaya N.S., Levenkov J.Y., Rusanov O.A. Modelling of automobile wheel interaction with uneven ground contact area. *Mechanical Engineering and Engineering Education.* 2011; (4): 40–46. (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Aleksey V. Kamenchukov – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7997-3195>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207104736>

Ilya S. Ukrainskiy – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 006012@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1958-9540>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=548294

Submitted: 12th August 2020. Revised: 14th September 2020. Published online: 7th October 2020.

Grant of the President of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2020-286 (internal number MK-511.2020.8).