

Повышение качества ямочного ремонта

Жуковский Е.М., Ковалев Я.Н., Кравченко С.Е.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В статье рассмотрено напряженно-деформированное состояние существующего и ремонтного материала в местах стыка после проведения ямочного ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий. Материал в окрестности стыка ремонтной карты подвержен действию нагрузки от колеса автомобиля и испытывает объемное напряженное состояние, близкое к осесимметричному. Теоретически фрагмент ремонтной карты испытывает с некоторым приближением плоское деформированное состояние.

В связи с тем, что конструкция дорожной одежды является многослойной, а в настоящее время отсутствует аналитическое решение для ее расчета при загрузке вертикальной полосной нагрузкой, то в качестве расчетной принята однослойная конструкция. Возможность такого приближения показана сравнительным численным решением – методом конечных элементов. Погрешность определения напряжений в конструкции дорожной одежды при таком допущении не превышает 5 %.

Для определения растягивающих напряжений в зоне стыка было использовано аналитическое решение теории упругости для бесконечной полосы, загружающей упругое полупространство. Были изучены изменения сдвигающих напряжений в покрытии в зависимости от глубины выбоины и различного наклона плоскости стыка ремонтной карты к вертикали.

Показано, что снизить максимальные сдвигающие напряжения возможно при увеличении угла наклона плоскости стыка ремонтной карты к вертикали. На практике для реализации данного принципа при проведении ямочного ремонта для устройства плоскости стыка возможно использование дорожных фрез. По такому стыку сдвигающие напряжения будут иметь меньшие значения, чем значения напряжений по традиционному вертикальному стыку.

Одним из важных факторов для повышения срока службы ремонтных карт является правильное определение границ ее устройства. Для этого предлагается использовать критерий плотности дорожного покрытия и включать в границы карты покрытие в окрестностях выбоины, где плотность меньше, чем у покрытия без дефектов. Для этого возможно использовать приборы типа PQI.

Как результат, получено решение, позволяющее на практике совершенствовать технологию проведения ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий и предупреждать повторные разрушения в местах сопряжения существующего и ремонтного материала.

Введение

Резервы повышения устойчивости отремонтированных участков асфальтобетонных покрытий после ямочного ремонта связаны прежде всего с повышением прочности зоны стыка материалов ремонтной карты с материалом существующего покрытия. Хрупкие микроразрушения ремонтируемого покрытия, возникшие при обрезке контура карты, а также влияние погодно-климатических факторов во время производства ремонтных работ способствуют тому, что материал покрытия по плоскости стыка являются самым слабым.

Анализ показывает, что потенциально усилить зоны сопряжения существующего покрытия и ремонтной карты можно за счёт уменьшения в них растягивающих и сдвигающих напряжений. Анализ равновесия действующих усилий в зоне стыка дает возможность сравнивать величины касательных напряжений при разных наклоне и форме плоскости сопряжения материалов [1, 2].

В связи с этим возникает задача рассмотреть с точки зрения теории упругости оценку возникающих напряжений в зоне стыка ремонтной карты в зависимости от разного наклона плоскости сопряжения материалов: заполняющего карту и существующего покрытия.

Актуальность исследования определяется отсутствием литературных источников по данной теме и соответствующих нормативных документов.

Обоснование расчётной схемы

Материал в окрестности стыка ремонтной карты подвержен действию нагрузки от колеса автомобиля и испытывает объемное напряженное состояние близкое к осесимметрическому. Пусть на поверхность упруго-изотропного массива действует нагрузка в виде бесконечной полосы шириной b . Теоретически фрагмент ремонтной карты испытывает с некоторым приближением плоское деформированное состояние. Нагрузка, прикладываемая на полосу, учитывая ее малую толщину, принята как равномерно распределённая с интенсивностью P и шириной b .

Конструкция дорожного покрытия (рис. 1) предусматривает четыре слоя, имеющие разную жёсткость, которая определяется модулем упругости E . Кроме того, материал заделки ремонтной карты также отличается по своей жесткости от окружающих слоев. Коэффициент Пуассона для всех слоев принимался одинаковым. Границы между слоями располагались горизонтально, а толщина слоев считалась постоянной. Слои жестко сцеплены друг с другом и не могут проскальзывать относительно друг друга. Перемещения, вызванные деформацией слоев дорожного покрытия малы по сравнению с их толщиной. Поэтому задача рассматривается как геометрически линейная. Принято, что материал слоев деформируется по линейному закону (закону Гука). В связи с этим, задача физически линейная. Для решения задачи использованы методы линейной (классической) теории упругости. В настоящее время отсутствует аналитическое решение для расчета многослойной системы, нагруженной вертикальной полосовой нагрузкой. Поэтому использован численный метод – метод конечных элементов.

Для получения численного решения использован программный комплекс Autodesk Robot Structural Analysis Professional [3, 4]. Под нагрузкой выделена аппроксимирующая область. Для исключения влияния граничных условий по краям выделенной области ее размеры приняты значительно больше ширины нагрузки – $B \geq 3b$. Конечный элемент имеет кубовидную форму с размером ребра 10 мм и содержит восемь узлов, расположенных на его вершинах. Каждый узел имеет шесть степеней свободы. Таким образом, в каждом конечном элементе имеется 48 степеней свободы. Используемая аппроксимация перемещений в конечном элементе имеет линейный

характер. Поэтому в объеме каждого конечного элемента деформации и напряжения постоянные.

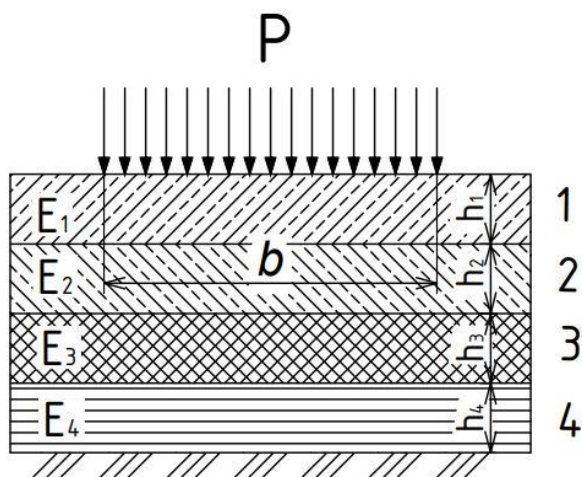


Рис. 1. Расчетная схема для определения напряженного состояния

Конечные элементы связаны друг с другом и опорами только в своих вершинах. Построение численной модели осуществляется послойной укладкой горизонтальных рядов конечных элементов. По толщине выделенной полосы взят только один слой конечных элементов. Чтобы обеспечить условие плоской деформации каждый узел построенного слоя прикрепляется к опорам горизонтальными связями, в поперечном направлении – к плоскости слоя. В связи с большим удалением нижней границы аппроксимирующей области, а значит и слабым влиянием границы на решение, для нее принято условие защемления. Поэтому узлы нижнего ряда прикрепляются к опоре тремя связями.

Размеры и положение аппроксимирующей области выбирались так, чтобы вертикаль, проведенная через середину нагрузки, делила эту область на две равные части. Распределенная нагрузка собирается в узлы и задается вертикальными сосредоточенными силами, приложенными к узлам верхнего ряда конечно-элементной модели

С учетом [5,6] физические и конструктивные параметры слоев дорожной одежды приведены в таблице 1.

Так как нижерасположенные слои дорожной одежды не оказывают существенного влияния на напряженное состояние в области стыка ремонтной карты, то они не были включены в область аппроксимации.

Для сравнительного расчета приняты следующие данные. Ширина аппроксимирующей области 2000 мм, а высота 130 мм. Ширина полосы нагружения равна диаметру круга, эквивалентному отпечатку колеса, и составляет 370 мм. Интенсивность нагрузки 0,6 МПа.

Таблица 1. Физические и конструктивные параметры слоев дорожной одежды

№ слоя	Наименование материала	Толщина слоя h , мм	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
1	Асфальтобетон плотный	50	4500	0,3
2	Асфальтобетон пористый	80	2600	0,3
3	Щебень	250	900	0,3
4	Песок средней крупности	500	120	0,3

В результате расчета нормальных и касательных напряжений с учетом и без учета слоистости материалов получены данные максимальных их значений, отнесенных к среднему давлению нагрузки в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение максимальных напряжений в дорожной конструкции

Вид напряжения	Значение напряжений, МПа		Отличие, %
	без учёта слоистости	с учётом слоистости	
Нормальное σ_z	-0,19	-0,20	5,0
Нормальное σ_y	-0,84	-0,87	3,4
Касательное τ_{zy}	-0,17	-0,16	5,0

Очевидно, что отличие напряженного состояния для случая учета и без учета слоистости незначительное. Поэтому оценка напря-

женного состояния исследуемой области может быть дана исходя из решения, полученного без учета слоистости. При этом погрешность не будет превышать 5%. Таким образом можно перейти к определению сдвигающих напряжений без учета слоистости системы.

Определение растягивающих напряжений по стыку ремонтной карты

В работе рассмотрено однородное полупространство, нагруженное полосовой равномерно распределенной нагрузкой шириной b и интенсивностью p . Расчетная схема представлена на рисунке 2.

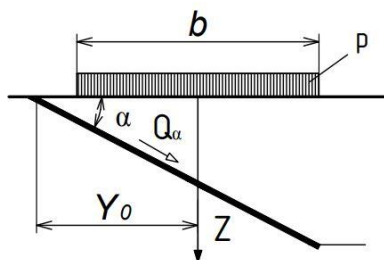


Рис. 2. Расчетная схема для определения сдвигающих напряжений по стыку ремонтной карты

Упругое пространство испытывает плоское деформированное состояние. В поставленной задаче используется полученное аналитическое решение теории упругости [7] для бесконечной полосы, загружающее упругое полупространство. Данное решение позволяет определить значения напряжений σ_z , σ_y , τ_{yz} для любой точки полупространства по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{p}{\pi} \left[\beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 - (\pm \beta_2) - \frac{1}{2} \sin(\pm \beta_2) \right]; \\ \sigma_y &= -\frac{p}{\pi} \left[\beta_1 - \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 - (\pm \beta_2) + \frac{1}{2} \sin(\pm \beta_2) \right]; \\ \tau_{yz} &= \frac{p}{2\pi} (\cos 2\beta_2 - \cos 2\beta_1); \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{z}{y + b/2}\right);$$

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{z}{y - b/2}\right).$$

Знаки β_2 устанавливаются в зависимости от расположения расчетной точки по отношению к створу нагрузки. Если расчетная точка расположена так, что ее проекция на границе полупространства находится за границами нагрузки, то $\beta_2 > 0$, если в пределах нагрузки, то $\beta_2 < 0$.

Принято, что площадь сцепления материалов – это плоская площадка, наклоненная к границе полупространства под углом α . Учитывая, что полупространство испытывает плоское деформированное состояние, сдвигающие касательные напряжения могут быть определены по формуле:

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \cdot \sin 2\alpha + \tau_{yz} \cos 2\alpha. \quad (2)$$

Разделив плоскость сцепления материалов на площадки и зная касательные напряжения на них, можно вычислить сдвигающую силу, приложенную к площадке по формуле:

$$Q_\alpha = \Delta S \sum_{k=1}^n \tau_\alpha; \quad (3)$$

где ΔS – размер участка на наклонной площадке;

n – количество участков на площадке.

Используя приведенные выше формулы и произведя расчет в зависимости от приложения нагрузки на различном расстоянии от стыка, были получены результаты, показывающие как изменяются максимальные касательные напряжения в зависимости от различного наклона плоскости стыка ремонтной карты к вертикали и глубины выбоины. Результаты показаны в таблице 3.

Таблица 3. Максимальные сдвигающие напряжения при различных углах наклона плоскости стыка

Удаленность нагрузки от края стыка, мм	Угол наклона плоскости сопряжения, град	Глубина выбоины, мм	Максимальные сдвигающие напряжения, МПа
186	90	50	0,190
186	90	100	0,190
186	60	50	0,140
186	60	100	0,140
186	45	50	0,124
186	45	100	0,157
186	25	50	0,130
186	25	100	0,112

По данным таблицы 3 построен график зависимости максимальных касательных напряжений от глубины выбоины (рис. 3).

Проведенный анализ исследований и расчётов показал, что максимальные касательные (сдвигающие) напряжения принимают наибольшие значения при вертикальной плоскости стыка ремонтной карты, устроенной по традиционной технологии проведения ямочного ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий (угол 90°).

В целях снижения максимальных сдвигающих напряжений, возникающих при наезде колеса автомобиля на стык ремонтной карты, рекомендуется:

- при устройстве ремонтных карт глубиной до 70 мм целесообразно устраивать стык сопряжения асфальтобетонного покрытия с укладываемым материалом под углом 45° к вертикали;

- в случае, когда ремонтная карта устраивается глубиной от 70 до 100 мм, его рекомендуется устраивать под углом 25° к вертикали.

Технологически это можно выполнить, используя для устройства плоскости стыка фрезу. Поверхность стыка будет иметь округлое очертание. В таком случае, в зависимости от диаметра барабана фрезы и толщины покрытия, будет изменяться угол наклона касательной к окружности. Так, например, в случае применения фрезы

дорожной ДЭМ-121 для трактора МТЗ с диаметром барабана 550 мм, угол наклона будет принимать значения от 0 до 35°. Это позволит не только снизить величину касательных напряжений у стыка, но так же и уменьшить количество ручного труда.

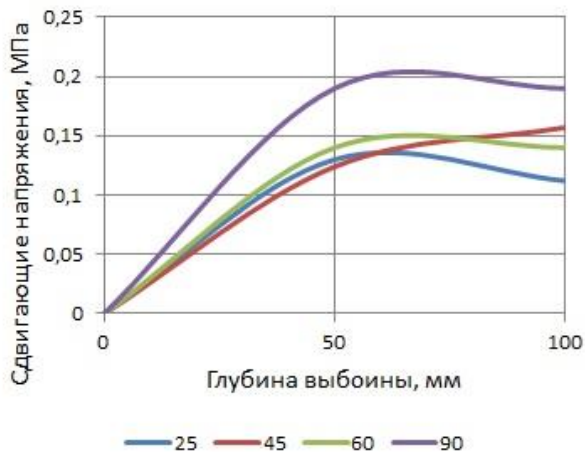


Рис. 3. Зависимость максимальных касательных напряжений от глубины выбоины при различных углах наклона плоскости стыка ремонтной карты

Учитывая малую глубину карты в верхней части наклонного стыка, что недостаточно для качественного уплотнения плотных смесей, то для ремонта по предлагаемой технологии необходимо использовать самоуплотняющиеся битумоминеральные горячие литые смеси.

Определение границ ремонтной карты

Повышение срока службы ремонтной карты по предлагаемой технологии возможно только при правильном определении границ карты. Для этого целесообразно использовать критерий плотности асфальтобетонного покрытия. Установлено, что асфальтобетон в окрестностях выбоины имеет меньшую плотность, чем в покрытии без дефектов. Это и является одной из причин разрушения покрытия. По этому устройству стыка ремонтной карты в дефектном покрытии (с плотностью меньше, чем у нормального покрытия) негативно скажется на её сроке службы. Для определения границ

устройства ремонтной карты возможно использовать прибор типа PQI [8]. Он позволяет определить плотность покрытия, либо коэффициент относительного уплотнения. Чтобы определить границы устройства ремонтной карты вначале определяется плотность покрытия без дефектов, а затем последовательно измеряя плотность от края разрушенного покрытия, определяется место, где покрытие имеет плотность равную плотности покрытия без дефектов. Устройство стыков в прочном и плотном покрытии позволит увеличить срок службы покрытия.

Заключение

С учетом теории упругости произведена оценка возникающих напряжений в зоне стыка ремонтной карты после проведения ямочного ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий. Оценка проводилась в зависимости от глубины выбоины и разного положения плоскости сопряжения материалов. Решение получено в условиях плоской деформации.

Проведенный анализ исследований и расчётов показал, что максимальные касательные (сдвигающие) напряжения принимают наибольшие значения при вертикальной плоскости стыка ремонтной карты, устроенной по традиционной технологии проведения ямочного ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий (угол 90°).

Снижение максимальных сдвигающих напряжений, возникающих при наезде колеса автомобиля на стык ремонтной карты, проявляется:

- при устройстве ремонтных карт глубиной до 70 мм целесообразно устраивать стык сопряжения асфальтобетонного покрытия с укладываемым материалом под углом 45° к вертикали;

- в случае, когда ремонтная карта устраивается глубиной от 70 до 100 мм, его рекомендуется устраивать под углом 25° к вертикали.

Предложенный способ определения границ устройства ремонтной карты по критерию плотности покрытия позволит увеличить срок службы ремонтной карты.

Данная технология устройства плоскости стыка ремонтной карты может быть наиболее эффективно применена при использовании в качестве ремонтного материала битумоминеральных горячих литых смесей, не требующих уплотнения.

Литература

1. Зуб. В. Н. Совершенствование технологии текущего ремонта асфальтобетонных покрытий в условиях пониженных температур и повышенной влажности / Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1989. – 192 с.
2. Игошкина, А.Ю., Ковалев, Я.Н. Оценка качества ямочного ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий / А.Ю. Игошкина, Я.Н. Ковалев // Наука и Техника. – 2005. – 6. – С. 24-26.
3. Сухоруков, В.В. Autodesk Robot Structural Analysis Professional: Справочное учебное пособие / В.В Сухоруков. – М.: Издательство АСВ, 2009. – 128 с.
4. Руководство пользователя Autodesk Robot Structural Analysis Professional [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2019/RUS/?guid=GUID-4A734308-B2F3-4147-A310-BD47C48E9ED>. – Дата доступа : 20.04.2021.
5. СН 3.03.04-2019 Автомобильные дороги
6. ТКП 45-3.03-112-2008 (02250) Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования
7. Пронина, Ю.Г. Лекции по теории упругости: Общие положения: Учебное пособие / Ю.Г. Пронина. – СПб.: СПбГУ, 2004. – 120 с.
8. Жуковский, Е.М. Повышение срока службы ремонтной карты / Е.М. Жуковский, Я.Н. Ковалев, С.Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. – 2021. – №1. – С. 89–94.