РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Научная статья

УДК 691.168:625.855.3
EDN: NEPGHV

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ МЕЖДУ СЛОЯМИ АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ПРОЧНОСТЬ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Ирина Вадимовна Демьянушко
Валерий Михайлович Стаин✉
Александр Валерьевич Стаин
Алексей Евгеньевич Симчук

Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)
vamis@yandex.ru✉

Аннотация. *В статье для оценки влияния сил сцепления между слоями асфальтобетона на прочность верхних слоев асфальтобетонного дорожного покрытия используется метод конечных элементов, который в отличии от методики, предложенной в существующих нормативных документах, позволяет исследовать влияние сил сцепления во всем диапазоне их изменения от полной склейки до полного проскальзывания. В многочисленных трудах, посвященных исследованию работы асфальтобетонных дорожных покрытий, отмечается, что большая часть повреждений верхних слоев асфальтобетонного дорожного покрытия таких, как растрескивание, колейность, выкрашивание, выбоины, проломы и др., возникает из-за недостаточного сцепления между слоями асфальтобетона. В России до сих пор при определении напряженно-деформированного состояния дорожных одежд используется решение лишь для двухслойной среды. Применение упрощенных методик расчета напряженно-деформированного состояния может приводить как к недостаточной прочности рассчитываемых конструкций, так и к чрезмерному запасу прочности. В России при создании новых нормативных документов было предложено для определения напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного дорожного покрытия использовать решение осесимметричной задачи теории упругости для*

многослойной среды. Несмотря на очевидные достоинства новых нормативных документов, следует отметить, что в этих документах рассматриваются только предельные значения контакта между слоями конструкции – либо полная склейка, либо свободное проскальзывание. Однако в реальности между слоями возникает неполное сцепление, величина которого может существенно повлиять на напряженно-деформированное состояние многослойной среды.

Ключевые слова: *асфальтобетон, расчет напряженно-деформированного состояния, сцепление между слоями, метод конечных элементов, модель зоны сцепления.*

Для цитирования: Демьянушко И.В., Стаин В.М., Стаин А.В., Симчук А.Е. Конечно-элементная оценка влияния сцепления между слоями асфальтобетона на прочность верхних слоев асфальтобетонного дорожного покрытия // Дороги и мосты. 2024. № 51/1. С. 70-90.

ROAD REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

FINITE ELEMENT ASSESSMENT OF THE EFFECT OF ADHESION BETWEEN ASPHALT CONCRETE LAYERS ON THE STRENGTH OF THE UPPER LAYERS OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT

Irina V. Demyanushko
Valery M. Stain✉
Alexander V. Stain
Alexey E. Simchuk

Moscow Automobile and Road Construction
State Technical University (MADI)
vamis@yandex.ru✉

Abstract. *The article uses the finite element method to assess the effect of adhesion forces between asphalt concrete layers on the strength of the upper layers of asphalt concrete pavement, which, unlike the methodology proposed in existing regulatory documents, allows us to study the influence of adhesion forces over the entire range of their change from complete gluing to complete*

slippage. In numerous works devoted to the study of the work of asphalt concrete road surfaces, it is noted that most of the damage to the upper layers of asphalt concrete pavement such as cracking, rutting, staining, potholes, breaks, etc. occurs due to insufficient adhesion between layers of asphalt concrete. In Russia, until now, when determining the stress-strain state of road surfaces, a solution is used only for a two-layer space. The use of simplified methods for calculating the stress-strain state can lead to both insufficient strength of the calculated structures and excessive safety margin. When creating new regulatory documents in Russia, it was proposed to use the solution of the axisymmetric problem of elasticity theory for a multilayer space to determine the stress-strain state of asphalt concrete pavement. Despite the obvious advantages of the new regulatory documents, it should be noted that these documents consider only the limit values of contact between the layers of the structure – either complete gluing or free slip. However, in reality, incomplete adhesion occurs between the layers, the magnitude of which can greatly affect the stress-strain state of the multilayer space.

Keywords: *asphalt concrete, calculation of the stress-strain state, adhesion between layers, finite element method, model of the adhesion zone.*

For citation: 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): 70-90. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

В работах **[1-3]** отмечается, что значительная часть повреждений верхнего слоя асфальтобетонного дорожного покрытия таких, как растрескивание, колейность, выкрашивание, выбоины, проломы и др. возникает из-за недостаточного сцепления между слоями асфальтобетонного покрытия. Плохое сцепление между слоями асфальтобетонного покрытия может быть обусловлено множеством причин, таких как избыточная влажность нижнего слоя асфальтобетонного покрытия, запыленность его поверхности, нарушение технологии укладки верхнего слоя асфальтобетонного покрытия и др. Известны зарубежные методики расчета, основанные на теории многослойных упругих систем и методе конечных элементов (МКЭ) **[4, 5]**.

В отечественных нормативных документах до сих пор при определении напряженно-деформированного состояния (НДС) дорожных одежд используется решение лишь для двухслойной среды **[6]**.

В ранних работах авторов данной статьи **[7-9]** содержались некоторые примеры эффективного применения МКЭ для решения отдельных задач для многослойных дорожных покрытий.

Сравнительные расчеты для двухслойной и многослойной конструкций асфальтобетонного покрытия, результаты которых изложены в **[6]**, выявили недостатки упрощенных методик и показали значительные расхождения в расчетных значениях параметров НДС, определенных по упрощенной методике и методике расчета многослойного полупространства **[6]**. Методика расчета многослойного полупространства также является в определенной степени упрощенной, однако, позволяет учитывать наличие в конструкции дорожного покрытия до 7 слоев. Выводом этой работы является констатация того, что применение упрощенных методик расчета НДС многослойного покрытия может приводить как к недостаточной прочности рассчитываемых конструкций, так и к чрезмерному запасу прочности.

При создании новых нормативных документов **[10, 11]** было предложено для определения НДС асфальтобетонного дорожного покрытия использовать решение осесимметричной задачи теории упругости для многослойной среды. При этом предполагается либо отсутствие сцепления, либо полное сцепление между слоями конструкции дорожного покрытия. Исследования **[6]** показали, что применение такой методики расчета асфальтобетонного дорожного покрытия дает различие в результатах в интервале от 6 до 99 % по сравнению с упрощенными методиками.

Несмотря на очевидные достоинства новых нормативных документов, следует отметить некоторые их недостатки. В этих документах рассматриваются только предельные значения контакта между слоями конструкции – либо полная склейка, либо свободное проскальзывание. Однако в реальности между слоями возникает неполное сцепление, величина которого может значительно повлиять на НДС многослойной среды. На это обстоятельство указывается, в частности, в приведенных работах **[12, 13].**

В зарубежных источниках также утверждается, что реальные условия межслойного сцепления не согласуются с предположениями о том, что слои конструкции дорожного покрытия либо полностью склеены, либо сцепление между ними отсутствует. Данные предположения приводят к необоснованным решениям при проектировании конструкций дорожных покрытий и возникновению различных повреждений в них в

процессе эксплуатации. В ряде исследований отмечается, что из-за плохих условий сцепления между слоями реальный срок службы асфальтобетонного покрытия может быть уменьшен более чем на 80 % **[14].**

Алгоритм создания конечно-элементной модели асфальтобетонного дорожного покрытия

В работе, представленной в настоящей статье, для оценки влияния сил сцепления между слоями асфальтобетона на прочность слоев асфальтобетонного дорожного покрытия использовали метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет исследовать влияние сил сцепления во всем диапазоне их изменения – от полной склейки до полного проскальзывания. Исследование с целью сравнения результатов выполнено при исходных данных примера, рассмотренного в *приложении Д* нормативного документа **[11]**. На **рис. 1** показана осесимметричная схема конструкции дорожного покрытия, соответствующая этому примеру и ее конечно-элементная модель, подобная той, что предложена в работе **[15]**. Но, по сравнению с работой **[15]**, между слоями асфальтобетона добавлен слой клеевого материала, моделирующий сцепление между слоями асфальтобетона.

Для моделирования применялся программный пакет *MSC. Software* (лицензировано в РФ) –*Marc-Mentat* **[16]**, который ранее эффективно использовался авторами в ряде работ, посвященных расчету дорожных конструкций и, в частности, в **[7-9]**.

В пакете *Marc-Mentat* принято, что осью симметрии должна быть ось *X*. Нагрузка на поверхности покрытия прикладывается статическим образом в виде равномерно распределенного по площади круга давления интенсивностью 0,8 МПа, с диаметром круга, равным 0,303 мм **[11, 15]**. Осесимметричная формулировка задачи существенно снижает ее размерность и повышает эффективность вычислительного процесса.

Свойства материалов, входящих в конструкцию асфальтобетонного покрытия, указаны в **табл. 1**. Все материалы, за исключением материала клеевого слоя, рассматривались как линейно упругие. Для определения свойств материала клеевого слоя использовалась модель зоны сцепления, свойства которой подробно описаны в **[16]**.

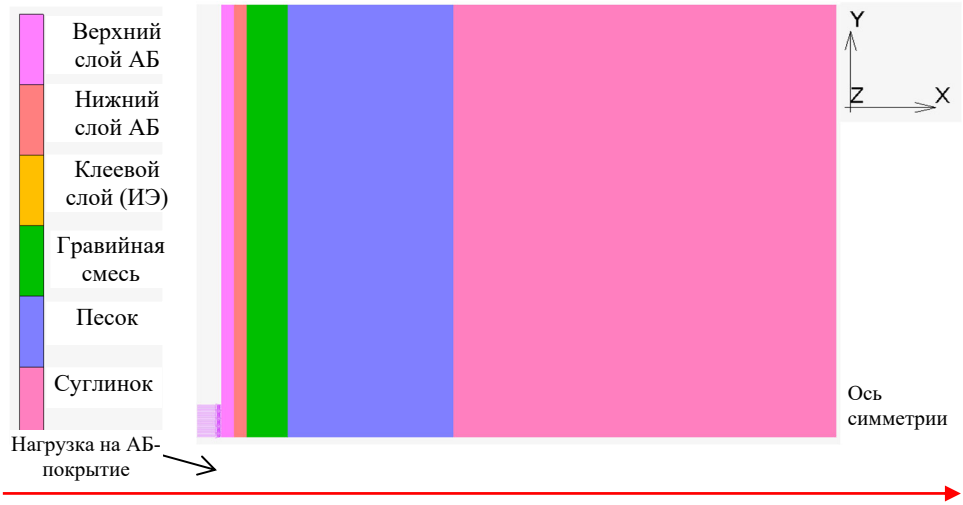


Рис. 1. Схема конструкции дорожного покрытия, соответствующая примеру нормативного документа [11] и ее конечно-элементная модель:
АБ – асфальтобетон

Так как в примере, рассмотренном в нормативном документе **[11]**, толщина клеевого слоя не определена, она была принята равной нулю, что допускается моделью зоны сцепления **[16]**.

Исследование прочности верхних слоев асфальтобетонного дорожного покрытия

Для валидации конечно-элементной модели, содержащей клеевой слой, были рассмотрены две другие конечно-элементные модели, в которых отсутствовал клеевой слой (интерфейсные конечные элементы) между слоями асфальтобетона (**рис. 1**, но без клеевого слоя), и которые соответствовали двум предельным значениям контакта между слоями: полная контакт-склейка между слоями асфальтобетона и свободное скольжение верхнего слоя асфальтобетона по нижнему (контакт-касание). Для этих случаев были получены максимальные значения прогибов покрытия соответственно 0,4073 мм и 0,4672 мм.

Таблица 1

Свойства материалов, входящих в конструкцию асфальтобетонного покрытия

Материал слоя	*Толщина, мм*	*Модуль упругости, МПа*	*Коэффициент Пуассона*	*Тип КЭ*	*Количество конечных элементов*
Верхний слой асфальтобетона	50	3800	0,30	10	3960
Клеевой слой	0	-	-	*Интерфейсные конечные элементы* *190*	396
Нижний слой асфальтобетона	50	3400	0,30	10	3960
Щебеночно-гравийно-песчаная смесь	160	950	0,25	10	12672
Песок	650	300	0,25	10	47520
Суглинок	1500	73,17	0,35	10	95040

Если же использовать конечно-элементную модель с клеевым слоем и интерфейсными конечными элементами **(рис. 1)**, то при энергии сцепления G_c, равной 0,0025 Н/мм, максимальный прогиб составил 0,4075 мм, а при энергии сцепления G_c, равной 7е-8 Н/мм, максимальный прогиб составил 0,4672 мм. Данные результаты отражены во 2-м столбце **табл. 2**.

Следовательно, предельные значения максимальных прогибов в конечно-элементной модели с клеевым слоем и интерфейсными конечными элементами практически совпадают с теми значениями, которые были получены для конечно-элементных моделей без клеевого слоя. Этот факт позволил установить границы изменения энергии сцепления G_c для конечно-элементной модели с интерфейсными конечными элементами и рассмотреть, как изменяются параметры напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия в зависимости от энергии сцепления между слоями асфальтобетона.

Чтобы продемонстрировать процесс разрушения сцепления между верхним и нижним слоями асфальтобетона при статическом возрастании нагрузки на покрытие, на **рис. 2** показано развитие повреждений в клеевом слое в зависимости от величины нагрузки.

Нагрузка 0,144 МПа на **рис. 2 а** соответствует началу повреждений клеевого слоя, которые возникли в окрестности области приложения нагрузки.

При нагрузке 0,4 МПа количество поврежденных конечных элементов клеевого слоя (интерфейсных конечных элементов) существенно увеличилось **(рис. 2 б)**, но полностью разрушенные интерфейсные конечные элементы пока не появились.

Первые три полностью разрушенные интерфейсные конечные элементы появились при нагрузке 0,52 МПа **(рис. 2 в)**.

Когда нагрузка достигла своего максимального значения 0,8 МПа, количество полностью разрушенных интерфейсных конечных элементов стало равным 57 **(рис. 2 г)**.

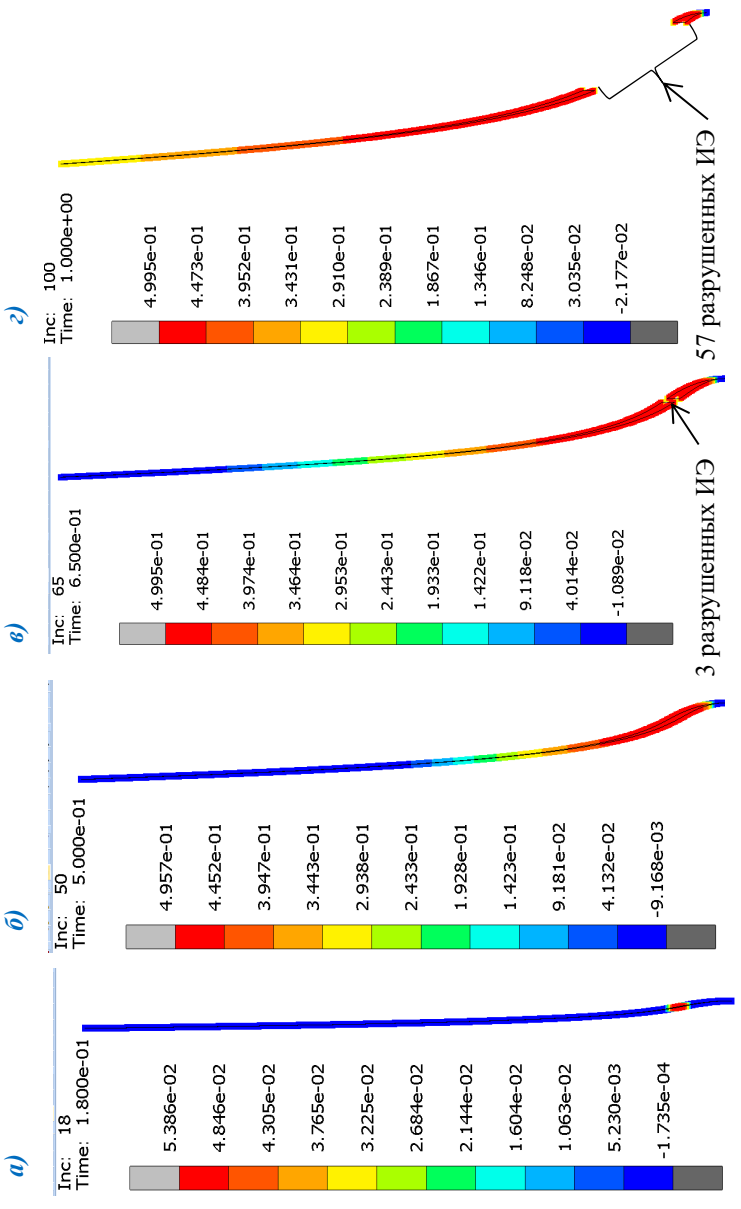


Рис. 2. Процесс развития повреждений в клеевом слое, расположенном между верхним и нижним слоями асфальтобетона, в зависимости от величины нагрузки, приложенной на поверхности верхнего слоя асфальтобетона (рис. 1):

а) нагрузка 0,144 МПа; б) нагрузка 0,4 МПа; в) нагрузка 0,52 МПа; г) нагрузка 0,8 МПа

В 1-м столбце **табл. 2** задаются энергии сцепления G_c **[16]** в диапазоне от полного отсутствия сцепления до полной склейки. Во 2-м столбце определены соответствующие этим энергиям прогибы поверхности асфальтобетонного покрытия (V). Максимальные прогибы (V_{max}) возникают в узле, расположенном на оси симметрии. По максимальным прогибам (V_{max}), в соответствии с нормативным документом **[11]**, обычно оценивается прочность всей конструкции асфальтобетонного покрытия. По этому критерию, как это следует из **табл. 2**, прочность покрытия при полном отсутствии сцепления между слоями асфальтобетона примерно на 15 % меньше, чем при полной склейке между ними.

В то же время прочность верхних слоев асфальтобетона, учитывая возможность их работы при отрицательных температурах, обычно оценивают, как прочность хрупкого материала, по максимальным растягивающим напряжениям, возникающим на нижних гранях слоев асфальтобетона.

Растягивающие напряжения, возникающие на нижних гранях слоев асфальтобетона (σ_{22}), определены в 3-м столбце **табл. 2.**

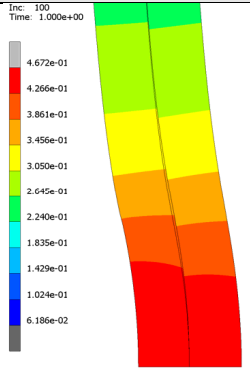
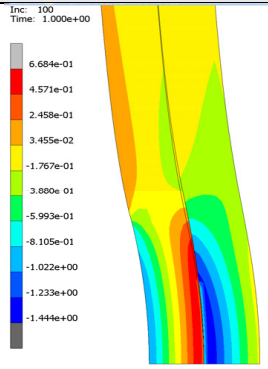
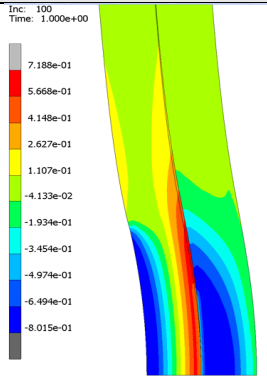
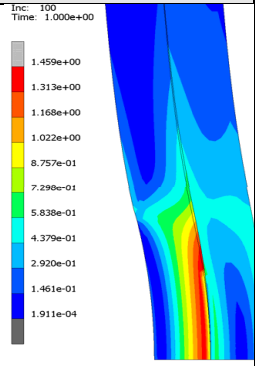
При полной склейке верхнего и нижнего слоев асфальтобетона они работают как монолитная конструкция, в которой нижняя грань верхнего слоя асфальтобетона близка к нейтральному слою, где нормальные напряжения можно считать равными нулю. Поэтому в данном случае прочность такой монолитной конструкции нужно оценивать по максимальным растягивающим напряжениям ($\sigma_{22,\,max}$) в окрестности нижней грани нижнего слоя асфальтобетона (3-й столбец, **табл. 2)**. По этому критерию прочность покрытия при полном отсутствии сцепления между слоями асфальтобетона примерно на 142 % меньше, чем при полной склейке между ними.

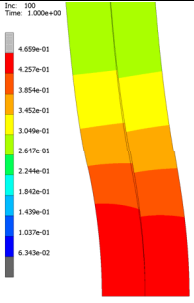
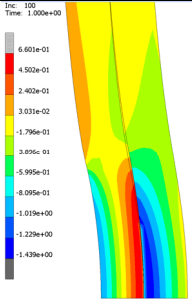
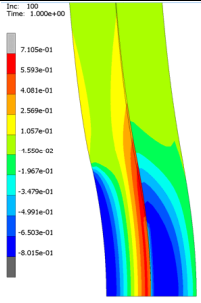
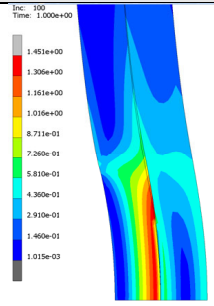
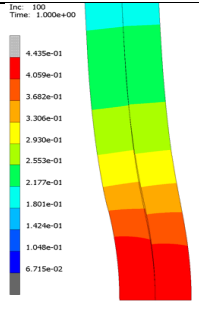
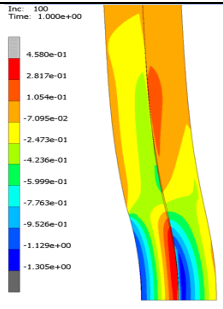
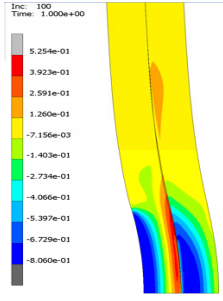
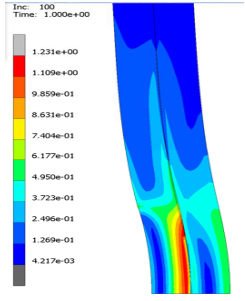
С другой стороны, при наличии касательных напряжений, максимальными растягивающими напряжениями являются главные растягивающие напряжения $\sigma_1=\sigma_{max}$ (4-й столбец, **табл. 2**). В этом случае прочность покрытия при полном отсутствии сцепления между слоями асфальтобетона примерно на 159 % меньше, чем при полной склейке между ними.

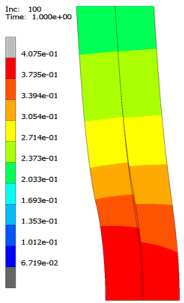
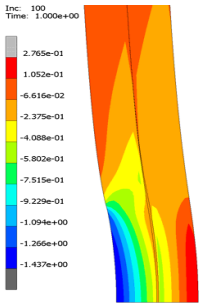
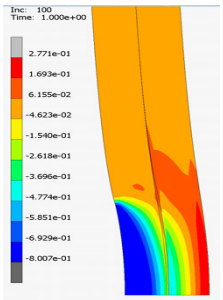
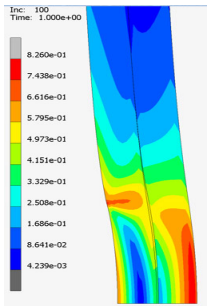
Но учитывая существенное влияние касательных напряжений на прочность асфальтобетона, прочность его слоев следует оценивать по максимальным эквивалентным напряжениям $\sigma_{экв,\,мах}$ (5-й столбец, **табл. 2**). При этом прочность верхнего слоя асфальтобетонного покрытия при полном отсутствии сцепления между слоями асфальтобетона на 87 % меньше, чем при полной склейке между ними.

Таблица 2

Результаты расчетов с помощью конечно-элементной модели покрытия, включающей в себя клеевой слой

Вид и энергия сцепления, Н/мм	*Прогибы покрытия V, мм*	*Нормальные напряжения σ_{22}, МПа*	*Главные нормальные напряжения $\sigma_1=\sigma_{max}$, МПа*	*Эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$, МПа*
1	*2*	*3*	*4*	*5*
Сцепления нет, G_c=7e-8	 V_{max} =0,4672	 $\sigma_{22,\,max}$ =0,6684	 σ_{max} =0,7188	 $\sigma_{экв,\,max}$ =1,459

Вид и энергия сцепления, Н/мм	Прогибы покрытия V, мм	Нормальные напряжения $б_{22}$, МПа	Главные нормальные напряжения $б_1 = б_{max}$, МПа	Эквивалентные напряжения $б_{экв}$, МПа
1	2	3	4	5
Сцепление для G_c = 7e-6	 V_{max} = 0,4659	 $б_{22,\ max}$ = 0,6601	 $б_{max}$ = 0,7105	 $б_{экв,\ max}$ = 1,451
Сцепление для G_c = 7e-4	 V_{max} = 0,4435	 $б_{22,\ max}$ = 0,4580	 $б_{max}$ = 0,5254	 $б_{экв,\ max}$ = 1,231

Вид и энергия сцепления, Н/мм	Прогибы покрытия V, мм	Нормальные напряжения $б_{22}$, МПа	Главные нормальные напряжения $б_1=б_{max}$, МПа	Эквивалентные напряжения $б_{экв}$, МПа
1	2	3	4	5
Полная склейка, G_c=0,0025	 V_{max} = 0,4075	 $б_{22,\ max}$ = 0,2765	 $б_{max}$ = 0,2771	 $б_{экв,\ max}$ = 0,8260

Последний результат лучше согласуется с отмеченными выше оценками, сделанными как в российских **[6]**, так и в зарубежных **[14]** источниках.

В статье была использована система обозначения напряжений, принятая в КЭ-комплексе *Marc®2018.0* **[16]**. Для лучшего и полного понимания этих обозначений на **рис. 3** показаны компоненты тензора напряжений при полной склейке между слоями АБ (последняя строка, **табл. 2**) в произвольном узле КЭ-сетки. В качестве произвольного принят узел 22629 (**рис. 3 а**), расположенный на расстоянии 10 мм от нижней грани нижнего слоя АБ, нижней грани нижнего слоя АБ и на расстоянии 50,5 мм от оси симметрии.

На **рис. 3 б** приняты следующие обозначения:

– σ_{11}, σ_{22} и σ_{33} – нормальные напряжения на площадке, перпендикулярные глобальным осям **X, Y** и **Z**;

– σ_{12} и σ_{21} – касательные напряжения на площадке, перпендикулярные глобальным осям **X** и **Y**;

– $\sigma_1 = \sigma_{max}$, $\sigma_2 = \sigma_{intermediate}$ и $\sigma_3 = \sigma_{min}$ – главные нормальные напряжения, перпендикулярные главным площадкам (на **рис. 3 б** выделены красным цветом).

Эквивалентные напряжения являются скалярными величинами и могут быть выражены через главные напряжения по формуле **(1)**:

$$\sigma_{экв}=\{[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]/2\}^{0.5} \quad . \qquad \textbf{(1)}$$

Если сцепление неполное, что соответствует реальным условиям контакта между слоями асфальтобетона **[12, 13]**, то максимальные эквивалентные напряжения ($\sigma_{экв,\ max}$) можно найти, используя представленный график зависимости (**рис. 4)** между максимальными прогибами V_{max} (2-й столбец, **табл. 2**) и максимальными эквивалентными напряжениями $\sigma_{экв,\ max}$ (5-й столбец, **табл. 2**). Кроме того, максимальные эквивалентные напряжения ($\sigma_{экв,\ max}$) можно определить по уравнению линии тренда (пунктирная линия) также на **рис. 4.**

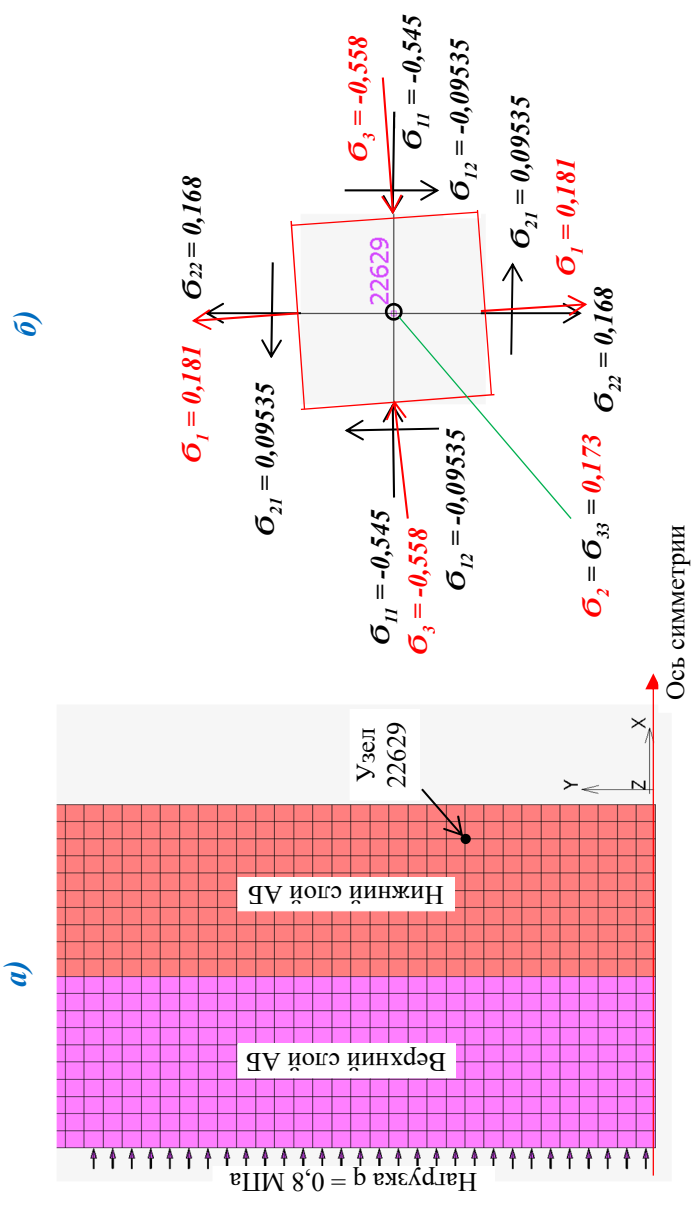


Рис. 3. Компоненты тензора напряжений при полной склейке между слоями АБ (последняя строка табл. 2) в узле 22629:

а) положение узла 22629 на КЭ-сетке;

б) компоненты тензора напряжений в окрестности узла 22629

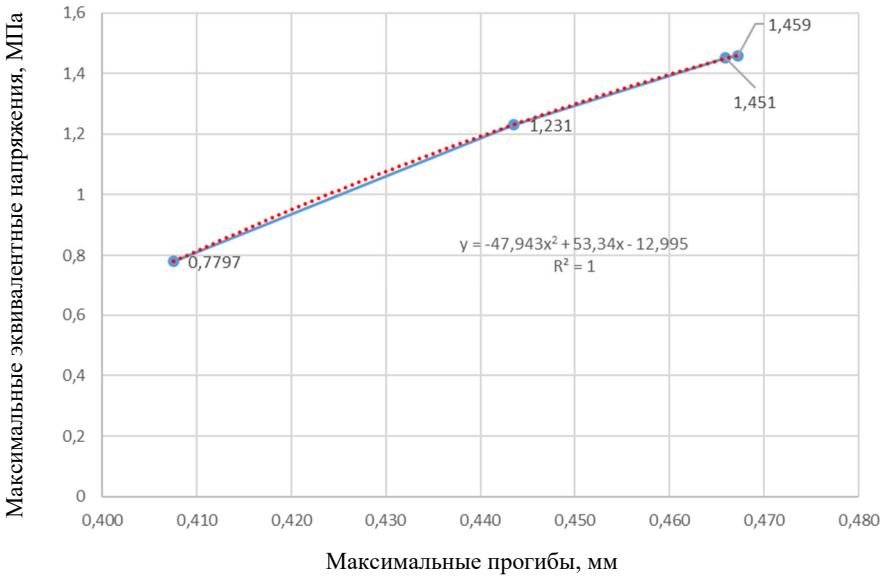


Рис. 4. График зависимости между максимальными прогибами и максимальными эквивалентными напряжениями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье рассмотрен алгоритм создания конечно-элементной модели асфальтобетонного дорожного покрытия для исследования влияния сцепления между слоями покрытия на прочность верхних слоев.
2. Расчеты, выполненные с помощью этой конечно-элементной модели, показали, что прочность верхних слоев асфальтобетона дорожного покрытия следует оценивать по максимальным эквивалентным напряжениям, возникающим, в случае полного отсутствия сил сцепления между слоями, в верхнем слое асфальтобетона, а в случае полной склейки слоев – в нижнем слое асфальтобетона.
3. Для оценки прочности слоев асфальтобетона при сцеплении между ними, изменяющемся в диапазоне от полной склейки до полного проскальзывания, могут быть использованы результаты, приведенные в **табл. 2.**, или графики, изображенные на **рис. 4**.

© Демьянушко И.В., Стаин В.М., Стаин А.В., Симчук А.Е., 2024

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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. https://doi.org/10.3390/infrastructures8030048.*
2. *Gong M., Zhang H., Jian W. CZM analysis and evaluation of influencing factors on interlayer adhesion of asphalt mixture with double-layer continuous pave, Constr. Build. Mater. 302 (2021), 124211.*
3. *Yang Z., Yang H., Wang L., Cao D. The development and application of an interfacial cohesive zone model of the pavement interlayer considering the characteristics of adhesive materials. Case Studies in Construction Materials Volume 18, July 2023, e01775. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01775.*
4. *BISAR 3.0: Bitumen Business Group. User Manual. Queue | BISAR 3.0: Bitumen Business Group May 1998 – PDFCOFFEE.COM.*
5. *EverStressFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Flexible Asphalt Concrete Pavements. EverStressFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Flexible Asphalt Concrete Pavements – Civil and Environmental Engineering – University of Maine (umaine.edu).*
6. *Симчук Е.Н. Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства / Е.Н. Симчук, М.Ю. Горский, Г.Ф. Кадыров, А.В. Стрельцов // Дороги и мосты. – 2021. – №. 46 – С. 53-74.*
7. *Демьянушко И.В. Цифровое моделирование многослойных дорог с асфальтобетонным покрытием на основе метода конечных элементов / И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, А.В. Стаин // Сборник докладов Международной конференции и 79-й Международной научно-исследовательской конференции. М., 2021. – С. 93-101.*
8. *Демьянушко И.В. Методика определения параметров вязкоупругой модели асфальтобетона для их использования в конечно-элементных расчетных моделях / И.В. Демьянушко, В.М. Стаин, А.В. Стаин, А.Е. Симчук // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2023. – № 3 (74). – С. 12-19.*
9. *Демьянушко И.В. Исследование влияния толщины слоя асфальтобетона на усталостную долговечность дорожного покрытия с помощью цифрового моделирования / И.В. Демьянушко,*

В.М. Стаин, А.В. Стаин // Дорожная держава. – 2020. – № 97. – С. 56-59.

10. *ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2021. – 151 с.*
11. *ОДМ 218.3.1.005-2021. Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. – М.: Росавтодор, 2021. – 148 с.*
12. *Торская Е.В. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в двухслойном полупространстве при неполном сцеплении слоев // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – № 6. – С. 122-130.*
13. *Торская Е.В. Моделирование фрикционного взаимодействия шероховатого индентора и двухслойного упругого полупространства // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 2. – С. 31-36.*
14. *Kruntcheva M.R., Collop A.C., and Thom N.H. Effect of bond condition on flexible pavement performance, Journal of Transportation Engineering, vol. 131, no. 11, pp. 880-888, 2005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:11(880).*
15. *Мазырин Т.А. Расчет компонентов напряженно-деформированного состояния многослойной дорожной одежды с помощью метода конечных элементов / Т.А. Мазырин, И.А. Карпов // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2023): сборник трудов конференции (Москва, 13 ноября – 14 ноября 2023) – С. 52-58.*
16. *Marc®2018.0, Volume A: Theory and User Information. 1008 p.*

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. https://doi.org/10.3390/infrastructures8030048.*
2. *Gong M., Zhang H., Jian W. CZM analysis and evaluation of influencing factors on interlayer adhesion of asphalt mixture with double-layer continuous pave. Constr. Build. Mater. 302 (2021), 124211.*

3. *Yang Z., Yang H., Wang L., Cao D. The development and application of an interfacial cohesive zone model of the pavement interlayer considering the characteristics of adhesive materials. Case Studies in Construction Materials Volume 18, July 2023, e01775. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01775.*
4. *BISAR 3.0: Bitumen Business Group. User Manual. Queue BISAR 3.0: Bitumen Business Group May 1998 – PDFCOFFEE.COM.*
5. *EverStressFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Flexible Asphalt Concrete Pavements. EverStressFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Flexible Asphalt Concrete Pavements – Civil and Environmental Engineering – University of Maine (umaine.edu).*
6. *Simchuk E.N. Improvement of the methodology for calculating non-rigid road surfaces, taking into account the application of the solution of the problem of elasticity theory for a multilayer half-space / E.N. Simchuk, M.Yu. Gorsky, G.F. Kadyrov, A.V. Streltsov // Roads and bridges. – 2021. – No. 46 – pp. 53-74.*
7. *Demyanushko I.V., Stain V.M., Stain A.V. Digital modeling of multilayer roads with asphalt concrete pavement based on the finite element method // Collection of reports of the International Conference and the 79th International Scientific Research Conference. Moscow, 2021.*
8. *Demyanushko I.V., Stain V.M., Stain A.V., Simchuk A.E. Methodology for determining the parameters of a viscoelastic asphalt concrete model for their use in finite element calculation models // Bulletin of the Moscow Automobile and Road Transport State Technical University (MADI). – 2023. – № 3 (74). – pp. 12-19.*
9. *Demyanushko I.V., Stain V. M., Stain A.V. Investigation of the effect of the thickness of the asphalt concrete layer on the fatigue life of the pavement using digital modeling // Road State. – No. 97. – 2020. – PP. 56-59.*
10. *PNST 542-2021. Preliminary national standard. Public roads. Non-rigid road pavements. Design rules (approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 05/18/2021 N 34-pnst). – M.: Standartinform, 2021. – 151 p.*
11. *ODM 218.3.1.005-2021 Industry Road Guidance Document. Designing of non-rigid road pavements. Methodological recommendations for calculating the parameters of the stress-strain state of multilayer structures under the influence of wheel loads (approved and put into effect on the basis of the order of the Federal Highway Agency dated 17/02/2021, No. 567). – M.: Rosavtodor, 2021. – 143 p.*

12. *Torskaya E.V. Modeling the accumulation of contact fatigue damage in a two-layer half-space with incomplete adhesion of layers // MTT. – 2011. – N. 6. – pp. 116-124.*
13. *Torskaya E.B. Modeling of the frictional interaction of a rough indenter and a two-layer elastic half-space // Physical mesomechanics, 2012. – vol. 15. – N. 2. – pp. 31-36.*
14. *Kruntcheva M.R., Collop A.C. Effect of bond condition on flexible pavement performance // Journal of Transportation Engineering. – 2005. – Vol. 131. – No. 11. – pp. 880-888. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:11(880).*
15. *Mazyrin T.A. Calculation of components of the stress-strain state of multilayer pavement using the finite element method / T.A. Mazyrin, I.A. Karpov // XXXV International Innovative Conference of Young Scientists and Students (MICMUS - 2023): proceedings of the conference (Moscow, November 13 – November 14, 2023) – pp. 52-58.*
16. *Marc®2018.0, Volume A: Theory and User Information. 1008 p.*

Информация об авторах

И.В. Демьянушко – доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
В.М. Стаин – кандидат технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
А.В. Стаин – кандидат технических наук, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
А.Е. Симчук – магистрант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Information about the authors

I.V. Demyanushko – Doctor of Engineering, Professor, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia
V.M. Stain – Ph. D. (Tech.), Professor, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia
A.V. Stain – Ph. D. (Tech.), Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia
A.E. Simchuk – Master's student, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор А.М. Кулижников; начальник управления исследований дорожно-строительных материалов С.Г. Беспалов (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию 13.03.2024. Одобрена после рецензирования 09.04.2024. Принята к публикации 24.04.2024.
The article was submitted 13.03.2024. Approved after reviewing 09.04.2024. Accepted for publication 24.04.2024.