

УДК 691.31:666.964.3

**Н.П. АЛЕКСАНДРОВА, А.С. АЛЕКСАНДРОВ, Т.В. СЕМЕНОВА,
В.В. ЧУСОВ****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НАКАПЛИВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
В АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЯХ**

Рассмотрены представления различных принципов эквивалентности физических и механических состояний сплошных и поврежденных тел. Приведены рекомендации по применению этих представлений к расчету поврежденности D при различных видах потери прочности и деформационной устойчивости: хрупком разрушении, пластическом деформировании, ползучести, мало- и многоциклового усталости. Показано, что для расчета поврежденности, накапливаемой асфальтобетоном, можно применить принцип эквивалентности деформаций, согласно которому скалярная величина D определяется разностью единицы и отношения модулей упругости E_D / E поврежденного и неповрежденного тела. Рассмотрен случай воздействия длительной нагрузки, которая действует на дорожную одежду в местах стоянок, парковок, остановок общественного транспорта, пересечений с железнодорожными путями в одном уровне, вблизи светофорных объектов. В этом случае величина модуля E_D зависит от величины напряжения, причем при достаточно высоких значениях напряжений этот модуль характеризует упругопластическую деформацию. Значение модуля упругопластической деформации уменьшается с увеличением величины давления на образец. Учет нелинейной зависимости модуля от напряжений выполнен введением меры напряженного состояния k_σ . Эта мера вычисляется по отношению разности напряжения и предела пропорциональности к разности пределов прочности и пропорциональности. На основании испытаний асфальтобетонных образцов получена математическая модель, позволяющая рассчитывать скаляр D в зависимости от величины меры k_σ и температуры асфальтобетона.

Ключевые слова: поврежденность материала, покрытие из асфальтобетона, предел пропорциональности, предел прочности.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-724-4-114-127

Асфальтобетонное покрытие, без сомнения, является самым распространенным и часто используемым покрытием при благоустройстве территорий, организации стоянок и парковок, остановок общественного транспорта, вблизи светофорных объектов, пересечений с железнодорожными путями в одном уровне. Рост автомобилизации и увеличение в транспортном потоке тяжелых и очень тяжелых грузовых автомобилей обуславливают актуальность работ, направленных на разработку методов расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению усталостному разрушению. Традиционно такой расчет выполняется сравнением наибольшего растягивающего напряжения от изгиба с прочностью асфальтобетона. Прочность асфальтобетона на растяжение при изгибе определяется с учетом усталостной функции числа нагрузок, включающей постоянные коэффициенты, ве-

© Александрова Н.П., Александров А.С., Семенова Т.В., Чусов В.В., 2019

личина которых зависит от ряда факторов. Нормативные документы РФ к таким факторам относят:

1. Остаточную пористость, в соответствии с которой асфальтобетоны классифицируют на высокоплотные, плотные, пористые и высокопористые.
2. Вязкость битума, используемого для приготовления асфальтобетонной смеси, в соответствии с которой вязкие битумы классифицируют на марки.
3. Дорожно-климатическую зону, характеризующую климатическими параметрами, оказывающими влияние на старение битума и возникновение в асфальтобетоне дефектов, влияющих на долговременную прочность.
4. Содержание щебня в холодных асфальтобетонных смесях.

Несмотря на большой объем исследований, выполненных специалистами дорожной отрасли РФ, нормативный метод расчета имеет существенные недостатки. Во-первых, применяется критерий наибольших нормальных растягивающих напряжений, который неверно оценивает прочность материала. Недостатки критерия наибольшего нормального напряжения хорошо известны и описаны в литературе по критериям прочности и условиям пластичности. Для случая сложного напряженного состояния этот критерий неверен для любого материала [1–5]. Во-вторых, применяемая усталостная функция не зависит от величины напряжения. Эта функция является непрерывной и убывающей, но постулирует снижение прочности от сколь угодно большого числа нагрузок. В действительности асфальтобетон способен выдержать только определенное число нагрузок. Такое число называют предельным, оно зависит от величины растягивающих напряжений при изгибе или деформаций, вызываемых этими напряжениями. Этот довод подтверждается работами, в которых приведены модели для расчета предельного числа нагрузок, зависящего от перечисленных нами и других факторов [6–10].

В нашей работе мы предлагаем пойти другим путем, учитывая усталость асфальтобетона вводом мер теории накопления повреждений. Такими мерами являются сплошность S и поврежденность D . Обе меры связаны друг с другом, поэтому могут быть вычислены.

Преимущество данного подхода состоит в том, что поврежденность можно определить из отношения параметров поврежденного и неповрежденного тела, например, модулей упругости. Отсюда следует, что зная величину поврежденности, накопленной к определенному отрезку эксплуатации асфальтобетонного покрытия, и начальный модуль упругости асфальтобетона, можно рассчитать модуль упругости поврежденного асфальтобетона. Этот модуль упругости асфальтобетона, учитывающий накопленные повреждения, можно использовать в расчетах дорожных одежд по всем критериям прочности. Такой модуль применим при расчете общего модуля упругости на поверхности асфальтобетонного слоя. Его можно использовать при расчете среднего модуля упругости верхнего слоя двухслойных систем, в которых проверяются сопротивление асфальтобетонных слоев растяжению при изгибе и сопротивление сдвигу материала нижнего слоя. В любом из этих трех расчетов увеличение поврежденности приводит к уменьшению модуля упругости асфальтобетона и необходимости увеличения толщины дорожной одежды или замене материала слоя на материал с более высокими показателями механических свойств (модуль упругости, прочность на растяжение от изгиба, сцепление, угол внутреннего трения). Таким образом, область

применения функций поврежденности в расчетах дорожных конструкций гораздо больше, по сравнению с усталостной функцией, используемой в нормативном методе расчета для определения усталостной прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе.

Меры сплошность и поврежденность материала предложены Л.М. Качановым и Ю.Н. Работновым [11–13]. Эти меры связаны друг с другом, вследствие чего могут определяться одна через другую. Связь сплошности и поврежденности описывается формулами:

$$D + C = 1; \quad D = 1 - C; \quad C = 1 - D. \quad (1)$$

Учитывая зависимости (1), в расчеты достаточно вводить только одну из этих мер, например, поврежденность, которая вычисляется по формуле [14]:

$$D = \frac{A - A_{eff}}{A}; \quad \sigma_{Dij} = \frac{\sigma_{ij}}{1 - D}, \quad (2)$$

где A – контурная площадь поперечного сечения образца, m^2 ;

A_{eff} – эффективная площадь поперечного сечения образца, определяемая разностью площади A и суммарной площади, занятой повреждениями, m^2 ;

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений сплошного тела, Па;

σ_{Dij} – компоненты тензора напряжений поврежденной среды, Па.

Первая формула из выражений (2) раскрывает физическую сущность скаляра D . Под эффективной площадью поперечного сечения A_{eff} понимается площадь, незатронутая дефектами (поры, микротрещины и т.п.). Площадь поперечного сечения A – вся площадь, состоящая из эффективной и суммарной площади повреждений. Если $A = A_{eff}$, то поперечное сечение целое, на нем нет дефектов, а $D = 0$. Если $A_{eff} = 0$, то поперечное сечение полностью занято дефектами, тело разрушено, а $D = 1$. Таким образом, под поврежденностью понимается суммарная площадь, занятая дефектами, отнесенная к площади поперечного сечения целого (неповрежденного) тела. Состояние тела описывается скалярной величиной D , варьирующейся в диапазоне $0 \leq D \leq 1$.

Вторая из зависимостей формул (2) постулирует принцип эквивалентности напряжений в поврежденном и сплошном теле. Согласно этому принципу любая компонента тензора напряжений поврежденного тела σ_{Dij} может быть определена через такую же компоненту тензора напряжений сплошного тела и скалярной переменной повреждения D . Используя компоненты тензора напряжений поврежденного тела, можно рассчитать любую его инвариантную характеристику. При помощи таких характеристик можно критерий прочности сплошной среды преобразовать в критерий прочности поврежденной среды. В работах [15, 16] нами предложены критерии для расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению растяжению от изгиба и сопротивлению сдвигу. Такие критерии приведены в табл. 1, в которой для наглядности представлен аналогичный критерий для сплошного тела.

Применение критериев табл. 1 требует определения поврежденности. Известно большое количество работ, в которых при экспериментальных исследованиях использовался геометрический подход. Суть этого подхода состоит в измерении суммарной площади, занятой дефектами, в пределах элемента, выделенного из поперечного сечения образца. Трудность состоит в

Таблица 1. Критерии прочности сплошных и поврежденных материалов для расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению растяжению от изгиба и сдвигу [15, 16]

Назначение критерия	Критерий	Математическое выражение критерия
1. Расчет по сопротивлению растяжению от изгиба	1.1. Критерий Мора для сплошной среды	$\sigma_1 - k_{Mohr}\sigma_3 = R_{tb};$ $k_{Mohr} = R_{tb} / R_c$
	1.2. Критерий Мора для поврежденной среды	$\frac{\sigma_1 - k_{Mohr}\sigma_3}{1 - D} = R_{tb}$
	1.3. Критерий Писаренко–Лебедева для сплошной среды	$k_{Mohr}\sigma_i + (1 - k_{Mohr})\sigma_1 = R_{tb}$
	1.4. Критерий Писаренко–Лебедева для поврежденной среды	$\frac{k_{Mohr}\sigma_i + (1 - k_{Mohr})\sigma_1}{1 - D} = R_{tb}$
2. Расчет по сопротивлению сдвигу в асфальтобетоне	2.1. Критерий Мора–Кулона для сплошной среды	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\cos\varphi} - \operatorname{tg}\varphi \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = c$
	2.1. Критерий Мора–Кулона для поврежденной среды	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\cos\varphi(1 - D)} - \operatorname{tg}\varphi \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2(1 - D)} = c$

Примечание. В табл. 1 σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, Па; k_{Mohr} – параметр материала критерия Мора; R_{tb} – предел прочности на растяжение, Па; R_c – предел прочности на сжатие, Па; σ_i – интенсивность нормальных напряжений, Па; c – сцепление, Па; φ – угол внутреннего трения, град.

определении площади каждого отдельно взятого дефекта, что обуславливается малыми размерами повреждений. Особенно тяжело установить ширину микротрещин. Возникали неточности, а в ряде случаев скалярная величина D превышала единицу, что не соответствует ограничениям, накладываемым формулами (2). Поэтому были разработаны другие подходы, получившие общее название принципов эквивалентности физических состояний поврежденных и сплошных тел. Наиболее популярны зависимости, рассчитанные на основе принципов деформационной и энергетической эквивалентности. Формулы для определения поврежденности по этим и другим принципам эквивалентности приведены в табл. 2.

Анализируя работы специалистов в области эволюции повреждений различных материалов, отметим, что большое распространение получили формулы с применением принципов эквивалентности деформаций [17–20] и энергетической эквивалентности поврежденных и сплошных сред [21–24]. Видимо, это обусловлено простотой определения модуля упругости материала в лаборатории.

Из анализа критериев прочности табл. 1 следует, что в расчетах асфальтобетонных покрытий необходимо определить модули упругости поврежденного и неповрежденного асфальтобетона при изгибе (для критериев Мора и Писаренко–Лебедева) и при сжатии (для критерия Мора–Кулона). При этом нужно учесть, что различные конструктивные элементы дороги с асфальтобетонным покрытием рассчитываются на воздействие различных нагрузок. Покрытие в пределах проезжей части проектируется на воздействие динамической кратковременной многократно прикладываемой нагрузки. Асфальто-

Таблица 2. Формулы принципов эквивалентности для расчета скалярной величины D [11]

Принцип эквивалентности	Математическое выражение	Рекомендации по выбору принципа в зависимости от вида повреждений				
		хрупкое разрушение	пластическая деформация	ползучесть	малоцикловая усталость	многоцикловая усталость
Площадей повреждений	$D = \frac{A_D}{A}$	Нет	Да	Да	Нет	Нет
Плотностей поврежденных и сплошных тел	$D = \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho}\right)^2$	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
Деформаций (модулей упругости)	$D = 1 - \frac{E_D}{E}$	Да	Да	Да	Да	Нет
Скоростей ультразвуковых волн	$D = 1 - \frac{\vartheta_D^2}{\vartheta^2}$	Да	Да	Да	Нет	Нет
Энергий деформаций	$D = 1 - \sqrt{\frac{E_D}{E}}$	Нет информации о рекомендациях				
Микротвердость	$D = 1 - \frac{H_D}{H}$	Да	Да	Да	Да	Нет

Примечание. В табл. 2 ρ_D и ρ – плотность поврежденного и сплошного тела, г/см³; E_D и E – модули упругости поврежденной и сплошной среды, Па; ϑ_D и ϑ – скорость распространения ультразвуковых волн в поврежденной и сплошной среде, м/с; H_D и H – микротвердость поврежденного и сплошного тела.

бетонные покрытия, расположенные на участках дорог в пределах стоянок, парковок, остановок общественного транспорта, пересечений с железнодорожными путями в одном уровне, вблизи светофорных объектов, рассчитывают на воздействие длительных однократных и повторных нагрузок.

Безусловно, для охвата такой большой области расчетов асфальтобетонных покрытий необходимо проделать множество экспериментов по различным методикам. Поэтому в настоящей работе рассматривается определение поврежденности через модули упругости асфальтобетона при приложении однократной нагрузки. При определении модуля упругости или модуля упругопластической деформации следует учитывать, что модуль может быть секущий, касательный [25–28], а также кусочно-линейный и нелинейный. Правила определения таких модулей приведены на рис. 1.

Секущий модуль определяется арктангенсом угла (β) наклона прямой, проведенной через начало координат и точку, выбранную на графической зависимости деформации от напряжения, к оси деформаций. То есть, $E = \arctg\beta$. Процедура определения приведена на рис. 1, а. Для вычисления касательного модуля к выбранной на графической зависимости деформации от напряжения точке строят касательную, а модуль определяется арктангенсом угла (β) наклона этой касательной к оси деформаций (рис. 1, б). Для определения кусочно-линейного модуля необходимо рассматривать приращения деформаций $\Delta\varepsilon$ и напряжений $\Delta\sigma$ от двух последовательно приложенных нагрузок.

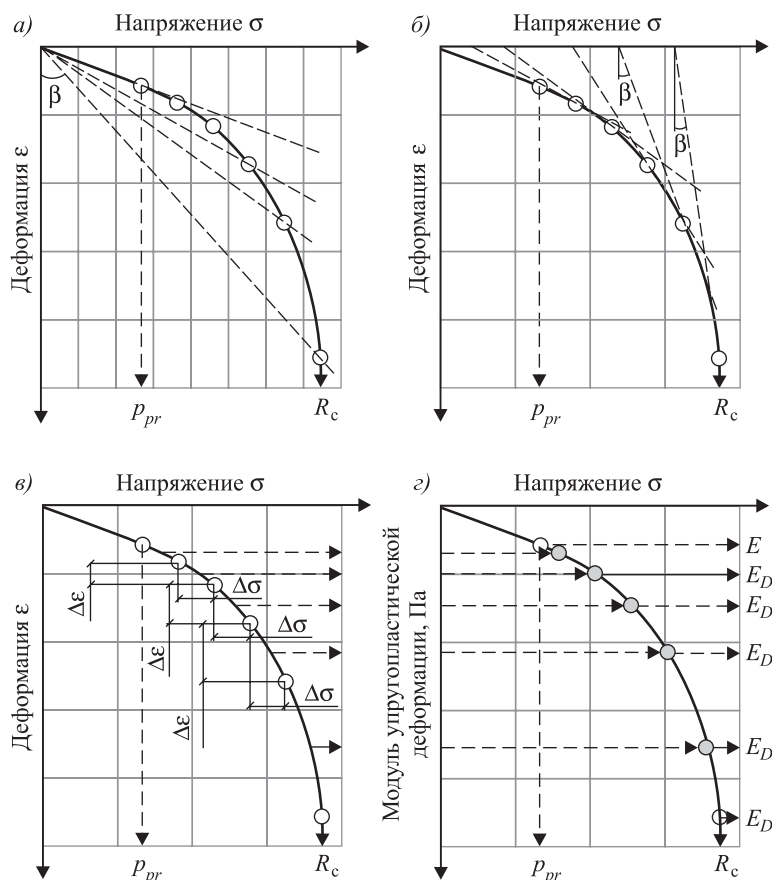


Рис. 1. Диаграммы сжатия схемы определения секущего (а), касательного (б), кусочно-линейного (в) и нелинейного (з) модуля

Модуль составит отношение приращения напряжений к приращению деформаций, т.е. $E = \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ (рис. 1, в). Результаты определения кусочно-линейного модуля можно интерпретировать как нелинейный модуль, что показано на рис. 1, з. На каждом рисунке приведены характерные пределы напряжений, предел пропорциональности p_{pr} и предел прочности R_c .

Предел пропорциональности характеризует наибольшую величину напряжения, при которой сохраняется линейная зависимость между напряжением и деформацией. Это значит, что первый прямолинейный участок любого из графиков является упругим деформированием. Так как закон Гука постулирует полное восстановление упругой деформации после снятия нагрузки, то можно сказать, что напряжения, варьирующиеся в диапазоне $0 < \sigma \leq p_{pr}$, не вызывают повреждений. Поэтому величина напряжения $\sigma = p_{pr}$ является наибольшим значением, при котором может быть установлен модуль неповрежденного (сплошного) тела E . При напряжениях $p_{pr} < \sigma \leq R_c$ определяется модуль упругопластической деформации поврежденного тела E_D . Отсюда вытекает, что уровень напряженного состояния, при котором возникает поврежденность, целесообразно характеризовать отношением

$$k_\sigma = \frac{\sigma - p_{pr}}{R_c - p_{pr}}. \quad (3)$$

Зависимость (3) удобна тем, что при величине $k_{\sigma} = 0$ поврежденность тоже равна нулю $D = 0$, а при $k_{\sigma} = 1$ поврежденность достигает значения, соответствующего исчерпанию прочности материала, но она меньше 1, т.е. при $k_{\sigma} = 1 D < 1$. Это объясняется тем, что после достижения напряжением предела прочности деформирование продолжается, но сопровождается падением нагрузки. Однако знаний о варьировании поврежденности в пределах уровня напряженного состояния $0 \leq k_{\sigma} \leq R_c$ вполне достаточно для расчетов на прочность и пластичность.

В качестве исходного материала применена горячая, мелкозернистая, плотная асфальтобетонная смесь типа Б, марки I. Компоненты, использованные для приготовления асфальтобетонной смеси (битум, щебень, песок, минеральный порошок и добавки), были предварительно испытаны для определения соответствия их контролируемых параметров требованиям государственных стандартов РФ. После подтверждения качества битума, щебня, песка, минерального порошка и добавок из них приготовили асфальтобетонную смесь и образцы. Эти образцы тестировали по методикам, оговоренным стандартом ГОСТ 12801–98, в целях определения соответствия контролируемых параметров асфальтобетонной смеси требованиям стандарта ГОСТ 9128–2013. После подтверждения качества асфальтобетонной смеси из нее готовили образцы для исследования накапливания повреждений. Для испытаний изготовлены цилиндрические асфальтобетонные образцы диаметром и высотой 10 см по методике, регламентируемой государственным стандартом РФ (ГОСТ 12801–98).



Рис. 2. Иллюстрации этапов испытаний асфальтобетонных образцов
a – измерение геометрических размеров образца, которые вводятся в программу испытаний в качестве исходных данных; *б* – термостатирование образцов до требуемой температуры (10, 25 и 50 °С); *в* – проведение испытания и работа оператора; *г* – деформирование образца с образованием дефектов

Испытание на поврежденность выполнено при помощи измерительно-вычислительного комплекса, в состав которого входит разрывная машина и программное обеспечение, установленное на компьютере. Испытание включало в себя три этапа. Иллюстрации каждого этапа приведены на рис. 2.

Образцы, изготовленные для испытаний, разделены на три группы. Первая группа испытана при температуре 10 °С, вторая – 25 и третья – 50 °С. Количество образцов в каждой группе было одинаковое и составляло 12 единиц. На рис. 3 даны графические зависимости деформаций от давлений при испытании образцов 17 и 28 при температуре асфальтобетона 25 и 50 °С соответственно. Результаты испытаний каждой группы образцов обработаны методами математической статистики, при тестировании сгруппированы в три выборки данных. Для каждой выборки выполнены проверка наличия грубых ошибок и определение статистических характеристик: среднего и среднеквадратического значения, коэффициента вариации, интервала варьирования случайной величины и расчетные значения характеристик, ограничивающих интервал варьирования.

В табл. 3 приведены пределы пропорциональности и прочности асфальтобетона.

При напряжениях и деформациях, соответствующих пределу пропорциональности, определены модули упругости неповрежденного асфальтобетона. Для остальных ступеней нагрузки, от приложения которых напряжения превышают предел пропорциональности, вычислены модули упругопластической деформации поврежденного асфальтобетона. Используя принцип эквивалентности деформаций, рассчитана поврежденность асфальтобетона. Выборки поврежденности асфальтобетона при испытании образцов при различных температурах обработаны статистическими методами. В результате

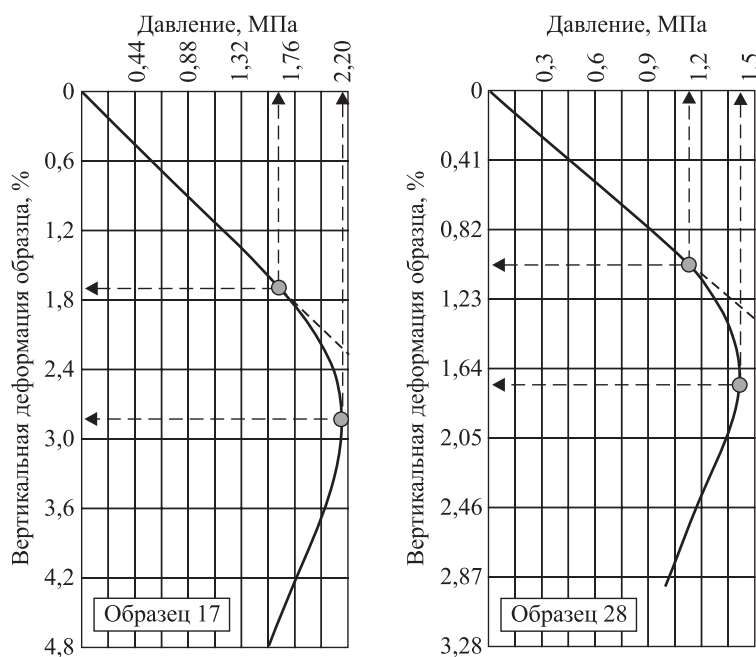


Рис. 3. Зависимость вертикальной деформации образцов от давления, испытанных при температуре асфальтобетона 25 (а) и 50 °С (б)

Таблица 3. Пределы пропорциональности и прочности асфальтобетона

Температура испытаний, °С	Математическое ожидание предела	
	пропорциональности, МПа	прочности, МПа
10	3,52	5,27
25	1,53	2,15
50	0,98	1,32

определены средние значения и интервалы варьирования действительного значения поврежденности. Зависимость средних значений поврежденности от уровня напряженного состояния приведена на рис. 4.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 4, обрабатывались методами математического анализа. Цель обработки заключалась в математическом моделировании поврежденности от уровня напряженного состояния. Так как нижний предел варьирования уровня напряженного состояния и поврежденности равен нулю, то не все функциональные зависимости пригодны для аппроксимации или линеаризации экспериментальных данных. Вследствие этого, математическое моделирование выполнено полиномами третьей степени.

В результате установлено, что зависимость поврежденности от температуры горячего, плотного, мелкозернистого асфальтобетона типа Б, марки I от уровня напряженного состояния описывается зависимостью

$$D = a \left(\frac{\sigma - p_{pr}}{R_c - p_{pr}} \right)^3 + b \left(\frac{\sigma - p_{pr}}{R_c - p_{pr}} \right)^2 + c \frac{\sigma - p_{pr}}{R_c - p_{pr}}, \quad (4)$$

где a , b и c – параметры материала, зависящие от температуры.

Параметры модели (4) a , b и c аппроксимируются в зависимости от температуры асфальтобетона. В диапазоне температур от 10 до 50 °С для аппрок-

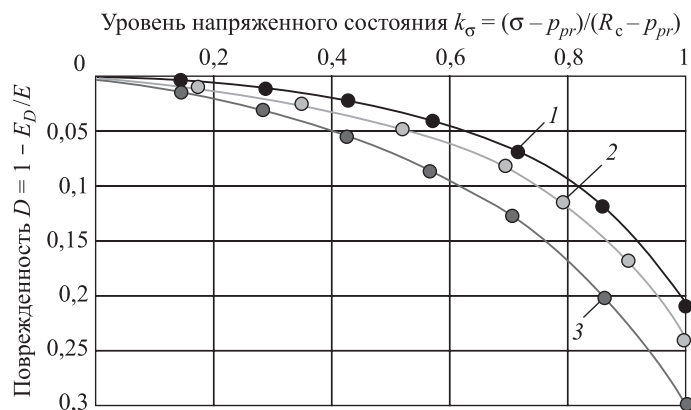


Рис. 4. Зависимость поврежденности от уровня напряженного состояния и температуры асфальтобетона
1 – 10 °С; 2 – 25 °С; 3 – 50 °С

симации этих коэффициентов достаточно воспользоваться полиномами второй степени.

В результате исследования установлено, что поврежденность можно использовать в критериях прочности как параметр, увеличивающий величину напряжений или инвариантных характеристик тензора и девиатора напряжений. Определение поврежденности асфальтобетона целесообразно выполнять на основе принципа деформационной эквивалентности, вычисляя разность единицы и отношения модулей поврежденного и неповрежденного асфальтобетона.

Тем не менее задачей дальнейших исследований должна стать разработка теоретического и экспериментального метода расчета и определения поврежденности при воздействии повторных нагрузок. Такие исследования позволят проектировать асфальтобетонные покрытия не только в местах стоянок и остановок автомобилей, но и на проезжей части дорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wagnoner M.P., Buttler W.G., Paulino G.H. Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture // *Experimental Mechanics*. 2005. No. 45(3). P. 270–277.
2. Aleksandrov A., Aleksandrova N., Chusov V. Ways of application of the provisions of mechanics of bodies with cracks to the calculation of asphalt concrete on strength and plasticity // *MATEC Web of Conferences*. 2018. No. 239. P. 1–8.
3. Babich D.V. A statistical strength criterion for brittle materials // *Strength of Materials*. 2011. No. 43(5). P. 573–582.
4. Tsybul'ko A.E., Romanenko E.A., Kravchenko E.V. A new strength criterion for isotropic materials, taking account of their elastic or deformational properties // *Russian Engineering Research*. 2008. No. 28(11). P. 1047–1050.
5. Huang J., Zhao M., Du X. et al. An elasto-plastic damage model for rocks based on a new nonlinear strength criterion // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. No. 51(5). P. 1413–1429.
6. Das A. Structural design of asphalt pavements: Principles and practices in various design guidelines // *Transportation in Developing Economies*. 2015. No. 1(1). P. 25–32.
7. Das A., Pandey B.B. Mechanistic-empirical design of bituminous roads: an Indian perspective // *J. Transp. Eng.* 1999. No. 125(5). P. 463–471.
8. Obando-Ante J., Palmeira E.M. A laboratory study on the performance of geosynthetic reinforced asphalt overlays // *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2015. No. 1. P. 5.
9. Wang X.R., Yin B.Y., Luo W.B. Fatigue damage analysis of an asphalt mixture based on pseudostiffness // *Strength Materials*. 2018. No. 50(5). P. 764–771.
10. Aleksandrova N.P., Chusov V.V., Stolbov Y.V. Criteria of strength and plasticity of asphalt concrete with the account of effect of accumulation of the damage while influence of re-load // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. No. 463. P. 1–10.
11. Lemaître J. A course on damage mechanics 2nd edn. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
12. Murakami S. Continuum damage mechanics // *A continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture*. Springer Netherlands, 2012.
13. Altenbach H., Maugin G.A., Erofeev V. *Mechanics of generalized continua*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.

14. Ambrozia A., Klosowski P. Survey of modern trends in analysis of continuum damage mechanics // *Task Quarterly*. 2006. No. 4. P. 437–454.
15. Aleksandrova N.P., Chysov V.V. The usage of integral equations hereditary theories for calculating changes of measures of the theory of damage when exposed to repeated loads // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. P. 69–82.
16. Aleksandrova N.P., Aleksandrov A.S., Chusov V.V. Application of principles of theory of damage accumulation to calculation of asphalt-concrete coatings // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. No. 262. P. 1–7.
17. Brekelmans W.A.M., de Vree J.H.P. Reduction of mesh sensitivity in continuum damage mechanics // *Acta Mechanica*. 1995. No. 110. P. 49–56.
18. Bhattacharya B., Ellingwood B. Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation // *Int. J. Fatigue*. 1998. No. 20(9). P. 631–639.
19. Granda Marroquín L.E. et al. Cumulative damage evaluation under fatigue loading // *Applied Mechanics and Materials*. 2008. No. 13-14. P. 141–150.
20. Tsiloufas S.P., Plaut R.L. Ductile fracture characterization for medium carbon steel using continuum damage mechanics // *Materials Sciences and Applications*. 2012. No. 3. P. 745–755.
21. Chow C.L., Lu T.L. On evolution laws of anisotropic damage // *Engineering Fracture Mechanics*. 1989. No. 34(3). P. 679–701.
22. Alves M., Yu J., Jones N. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics // *Computers and Structures*. 2000. No. 76. P. 703–712.
23. Shen J. et al. Material damage evaluation with measured microdefects and multiresolution numerical analysis // *International Journal of Damage Mechanics*. 2014. No. 23(4). P. 537–566.
24. Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Применение принципов энергетической эквивалентности сплошных и поврежденных тел к расчету асфальтобетонных покрытий по критериям прочности и пластичности // *Изв. вузов. Строительство*. 2018. № 3. С. 79–88.
25. A d e s C.S. Reduction of strain rosettes in the plastic range // *Experimental Mechanics*. 1962. No. 2. P. 345–349.
26. P a p i r n o R. Plastic stress-strain history at notch roots in tensile strips under monotonic loading // *Experimental Mechanics*. 1971. No. 11(10). P. 446–452.
27. A u g u s t i n P., O n e ț T. Elastic deformation of concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression // *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*. 2012. No. 55(2). P. 190–200.
28. W e n S., L i X. Experimental study on Young's modulus of concrete // *Journal of Central South University of Technology*. 2000. No. 7(1). P. 43–45.

Александрова Наталья Павловна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: nata26.74@mail.ru
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Александров Анатолий Сергеевич, канд. техн. наук, доц.;
E-mail: aleksandrov00@mail.ru
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Семенова Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: stv8@yandex.ru
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Чусов Василий Владимирович, инж.; E-mail: chysow@gmail.com
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Получено после доработки 26.03.19

Aleksandrova Natalia Pavlovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: nata26.74@mail.ru
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Aleksandrov Anatoliy Sergeevich, PhD, Ass. Professor;

E-mail: aleksandrov00@mail.ru

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Semenova Tatiana Victorovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: stv8@yandex.ru

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Chusov Vasily Vladimirovich, Engineer; E-mail: chysow@gmail.com

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DAMAGE ACCUMULATION IN ASPHALT-CONCRETE COATINGS

The article deals with the presentation of various principles of equivalence of physical and mechanical states of solid and damaged bodies. Given the recommendations on the application of these concepts to the calculation of damage D at different types of strength loss and deformation stability: brittle fracture, plastic deformation, creep, low-cycle and multi-cycle fatigue. It is shown that to calculate the damage accumulated by asphalt concrete, it is possible to apply the principle of equivalence of deformations, according to which the scalar value D is determined by the difference between the one and attitude of elastic modulus E_D/E of the damaged and undamaged body. Reviewed the case of the impact of long-term load, which acts on the road clothes in Parking lots, public transport stops, intersections with railways in the same level, near traffic lights. In this case, the value of E_D module depends on the stress value, and at sufficiently high stress values, this module characterizes the elastic-plastic deformation. The value of the modulus of elastic-plastic deformation decreases with the increase of the pressure on the sample. Considering the non-linear dependence of the modulus from the stress performed by the input action of the stress state of k_σ . This measure is calculated with respect to the difference between the stress and the limit of proportionality to the difference of limits of strength and proportionality. On the basis of the tests of asphalt concrete samples, a mathematical model is obtained that allows to calculate the scalar D depending on the value of the measure k_σ and the temperature of asphalt concrete.

Key words: damage material, asphalt pavement, limit of proportionality, strength limit.

REFERENCES

1. W a g n o n e r M.P., B u t t l a r W.G., P a u l i n o G.H. Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental Mechanics*. 2005. No. 45(3). Pp. 270–277.
2. A l e k s a n d r o v A., A l e k s a n d r o v a N., C h u s o v V. Ways of application of the provisions of mechanics of bodies with cracks to the calculation of asphalt concrete on strength and plasticity. *MATEC Web of Conferences*. 2018. No. 239. Pp. 1–8.
3. B a b i c h D.V. A statistical strength criterion for brittle materials. *Strength of Materials*. 2011. No. 43(5). Pp. 573–582.
4. T s y b u l ' k o A.E., R o m a n e n k o E.A., K r a v c h e n k o E.V. A new strength criterion for isotropic materials, taking account of their elastic or deformational properties. *Russian Engineering Research*. 2008. No. 28(11). Pp. 1047–1050.
5. H u a n g J., Z h a o M., D u X. et al. An elasto-plastic damage model for rocks based on a new nonlinear strength criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. No. 51(5). Pp. 1413–1429.

6. Das A. Structural design of asphalt pavements: principles and practices in various design guidelines. *Transportation in Developing Economies*. 2015. No. 1(1). Pp. 25–32.
7. Das A., Pandey B.B. Mechanistic–empirical design of bituminous roads: an Indian perspective. *J. Transp. Eng.* 1999. No. 125(5). Pp. 463–471.
8. Obando-Ante J., Palmeira E.M. A laboratory study on the performance of geosynthetic reinforced asphalt overlays. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2015. No. 1. P. 5.
9. Wang X.R., Yin B.Y., Luo W.B. Fatigue damage analysis of an asphalt mixture based on pseudostiffness. *Strength Materials*. 2018. No. 50(5). Pp. 764–771.
10. Aleksandrova N.P., Chusov V.V., Stolbov Y.V. Criteria of strength and plasticity of asphalt concrete with the account of effect of accumulation of the damage while influence of re-load. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. No. 463. Pp. 1–10.
11. Lemaitre J. A course on damage mechanics. 2nd edn. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996.
12. Murakami S. Continuum damage mechanics. A continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture. Springer Netherlands, 2012.
13. Altenbach H., Maugin G.A., Erofeev V. Mechanics of generalized continua. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.
14. Ambroziaak A., Klosowski P. Survey of modern trends in analysis of continuum damage mechanics. *Task Quarterly*. 2006. No. 4. Pp. 437–454.
15. Aleksandrova N.P., Chusov V.V. The usage of integral equations hereditary theories for calculating changes of measures of the theory of damage when exposed to repeated loads. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 69–82.
16. Aleksandrova N.P., Aleksandrov A.S., Chusov V.V. Application of principles of theory of damage accumulation to calculation of asphalt-concrete coatings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. No. 262. Pp. 1–7.
17. Brekelmans W.A.M., de Vree J.H.P. Reduction of mesh sensitivity in continuum damage mechanics. *Acta Mechanica*. 1995. No. 110. Pp. 49–56.
18. Bhattacharya B., Ellingwood B. Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation. *Int. J. Fatigue*. 1998. No. 20(9). Pp. 631–639.
19. Granda Marroquín L.E. et al. Cumulative damage evaluation under fatigue loading. *Applied Mechanics and Materials*. 2008. No. 13-14. Pp. 141–150.
20. Tsiloufas S.P., Plaut R.L. Ductile fracture characterization for medium carbon steel using continuum damage mechanics. *Materials Sciences and Applications*. 2012. No. 3. Pp. 745–755.
21. Chow C.L., Lu T.L. On evolution laws of anisotropic damage. *Engineering Fracture Mechanics*. 1989. No. 34(3). Pp. 679–701.
22. Alves M., Yu J., Jones N. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics. *Computers and Structures*. 2000. No. 76. Pp. 703–712.
23. Shen J. et al. Material damage evaluation with measured microdefects and multiresolution numerical analysis. *International Journal of Damage Mechanics*. 2014. No. 23(4). Pp. 537–566.
24. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Primenenie printsipov energeticheskoy ekvivalentnosti sploshnykh i povrezhdennykh tel k raschetu asfal'tobetonnykh pokrytiy po kriteriyam prochnosti i plastichnosti [Application of the principles of energy equivalence of solid and damaged bodies to the calculation of asphalt concrete coatings on the criteria of strength and plasticity]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 3. Pp. 79–88. (in Russian)

25. A d e s C.S. Reduction of strain rosettes in the plastic range. *Experimental Mechanics*. 1962. No. 2. Pp. 345–349.
 26. P a p i r n o R. Plastic stress-strain history at notch roots in tensile strips under monotonic loading. *Experimental Mechanics*. 1971. No. 11(10). Pp. 446–452.
 27. A u g u s t i n P., O n e ț T. Elastic deformation of concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*. 2012. No. 55(2). Pp. 190–2004.
 28. W e n S., L i X. Experimental study on Young's modulus of concrete. *Journal of Central South University of Technology*. 2000. No. 7(1). Pp. 43–45.
-