

РАЗДЕЛ III

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 625.7

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ СДВИГУ С УЧЕТОМ НАКАПЛИВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Н.П. Александрова, В.В. Чусов
ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье анализируются условия работы асфальтобетона при высоких летних температурах, и показывается, что в таких условиях асфальтобетонные покрытия испытывают пластические деформации сдвига. Такие деформации обусловлены потерей способности асфальтобетона работать на изгиб, вследствие чего по всей толщине покрытия его материал испытывает трехосное сжатие. Авторы предлагают выполнять проверку асфальтобетона в дорожном покрытии по сопротивлению сдвигу, используя для этих целей модифицированный критерий Кулона – Мора, включающий в себя три параметра материала и одну из мер теории поврежденности (сплошность Л.М. Качанова или поврежденность Ю.Н. Работнова). Применением интегральных уравнений наследственных теорий получены математические модели изменения сплошности и поврежденности при воздействии повторных нагрузок.

Ключевые слова: критерий прочности, условие пластичности, поврежденность Ю.Н. Работнова, сплошность Л.М. Качанова.

Постановка научной задачи

Обследования дорог, выполняемые при их диагностике, показывают, что на асфальтобетонных покрытиях отмечается поверхностная и глубинная колея. Поверхностная колея сопровождается боковым выпором (рис. 1), а причиной ее возникновения является недостаточное сопротивление асфальтобетона сдвигу при данных условиях эксплуатации. Кроме того,



Рис. 1. Поверхностная колея на покрытии, сопровождаемая выпором асфальтобетона

Из анализа рисунка 1 и рисунка 2 следует, что слои дорожных одежд из асфальтобетонных материалов следует рассчитывать, как по критерию

колеяность может носить комбинированный характер и включать в себя поверхностную и глубинную составляющие, по мере развития которых возникает просадка покрытия (рис. 2). Одной из причин просадки асфальтобетонного покрытия так же является его недостаточное сопротивление сдвигу. Поэтому при проектировании дорожных одежд целесообразно выполнять проверку асфальтобетона по сопротивлению сдвигу.



Рис. 2. Поверхностная колея на покрытии, сопровождаемая просадкой асфальтобетона

сопротивления растяжению от изгиба, так и по критерию сопротивления сдвигу. Как известно, асфальтобетонные покрытия рассчитывают только на усталостное

разрушение от растяжения при изгибе [1–3], причем в основе нормативных методов расчета заложена первая теория прочности, учитывающая только влияние одной компоненты тензора напряжений. Недостатки этого критерия отмечены в работах авторов [4 – 6]. Из анализа этих работ следует, что критерий прочности необходимо заменить критерием, учитывающим возникновение в асфальтобетонной плите сложного напряженного состояния, например, критерием О. Мора [7].

Другой особенностью асфальтобетонных покрытий является то, что при повышении температуры и достаточно большой суммарной толщине материал теряет способность работать на изгиб. Вследствие этого при высоких температурах асфальтобетон, подобно дискретным материалам, испытывает деформации сдвига. Таким образом, в зависимости от температуры асфальтобетона и толщины покрытия, оно может испытывать одно из трех напряженных состояний:

- чистый изгиб, при котором покрытие подобно пластине или тонкой плите испытывает изгиб без возникновения вертикальных деформаций и напряжений. В этом случае для расчета растягивающих и сжимающих напряжений может быть

использована гипотеза плоских сечений и формулы М.Б. Корсунского;

- изгиб толстых плит, при котором наряду с горизонтальными деформациями и растяжениями в плите возникают вертикальные компоненты тензоров;

- трехосное сжатие, при котором подобно дискретным материалам в асфальтобетоне по всей его толщине возникают только сжимающие напряжения.

Ещё одной особенностью напряженного состояния асфальтобетона является возникновение в структуре материала повреждений, и способность накапливать их.

Учитывая выполненный анализ, авторы ставят задачу разработки методики расчета асфальтобетонного покрытия по сопротивлению сдвигу в условиях воздействия повторных нагрузок, обуславливающих эффект накопления повреждений в структуре материала.

Состояние вопроса

Наглядную картину возникновения в асфальтобетонном покрытии трехосного сжатия дают результаты шурфирования дорожной одежды, благодаря которым отчетливо видны зоны сдвигов в местах выпора колеи, как в нижнем, так и в верхнем слое покрытия [8]. Иллюстрация такого деформирования приведена на рисунке 3.



Рис. 3. Измерение глубины поверхностной колеи в верхнем и нижнем слое покрытия, сопровождаемой выпором асфальтобетона

Вследствие возникновения в асфальтобетонном покрытии трехосного сжатия для расчета максимальных и минимальных главных напряжений могут быть применены формулы механики сплошной среды или инженерные методы [9 – 12]. Применяя способ расчета минимального главного напряжения, предложенный в работах [10,12], можно выполнить модификацию любой модели,

предназначенной для расчета только максимального главного напряжения [13 – 15]. Применяя способ Н. Одемарка [16,17], можно выполнить модификацию моделей [13 – 15] так, что они могут быть применены для расчета напряжений в слое конечной толщины [18]. Такие модифицированные модели позволяют рассчитывать напряжения в критериях прочности и условиях пластичности, параметрами материала в

которых могут быть пределы прочности на сжатие и растяжение или сцепление и угол внутреннего трения. В последнее время предложен ряд критериев, которые могут быть применены для расчета различных материалов по критерию сопротивления сдвигу [19 – 23]. Расчет асфальтобетонного покрытия по сопротивлению сдвигу может быть подобен проверки сдвигоустойчивости грунтов земляного полотна, заключающейся в расчете касательных напряжений или безопасных давлений [24 – 28] и сравнении вычисленных значений с предельными.

Недостатком критериев прочности и условий пластичности, модифицированных в работах [19 – 23] и используемых в разработанных методах расчета [24 – 28], является не учет способности асфальтобетона накапливать повреждения структуры.

Поэтому задачами публикации являются:

1. Модификация условия пластичности, полученного в работах [18, 24], путем ввода в него сплошности Л.М. Качанова или поврежденности Ю.Н. Работнова.

2. Разработка метода прогнозирования уменьшения сплошности и увеличения поврежденности в процессе воздействия повторной нагрузки.

Применение интегральных уравнений наследственных теорий к расчету поврежденности

Любая компонента тензора напряжений поврежденного тела $\sigma_{ij\omega}$ может быть определена с использованием основного правила алгебры матриц, которое записывают в виде

$$\sigma_{ij\omega} = \frac{\sigma_{ij}}{1-\omega} = \frac{\sigma_{ij}}{\psi}, \quad (1)$$

где σ_{ij} - компоненты тензора напряжений сплошного тела; ω - поврежденность Ю.Н. Работнова, ψ - сплошность Л.М. Качанова.

Из зависимости (1) следует, что главные напряжения в поврежденной $\sigma_{1\omega}$, $\sigma_{2\omega}$ и $\sigma_{3\omega}$ среде определяются по формулам

$$\sigma_{1\omega} = \frac{\sigma_1}{1-\omega} = \frac{\sigma_1}{\psi}; \quad \sigma_{2\omega} = \frac{\sigma_2}{1-\omega} = \frac{\sigma_2}{\psi};$$

$$\sigma_{3\omega} = \frac{\sigma_3}{1-\omega} = \frac{\sigma_3}{\psi}, \quad (2)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 - главные напряжения в неповрежденном теле.

Подстановка зависимостей (2) в любое условие пластичности сплошной среды позволяет его модифицировать так, что в полученном критерии учитываются дефекты

структуры, накапливаемые материалом при воздействии нагрузки, в том числе циклической. Анализируя первую зависимость формул (2), несложно заметить, что при увеличении поврежденности и уменьшении сплошности максимальное главное напряжение возрастает во всех точках сечения, в том числе и на границе раздела слоев. Это означает, что рост поврежденности асфальтобетона в процессе эксплуатации покрытия приводит к увеличению давлений, передаваемых на щебеночные основания и грунты земляного полотна. Поэтому увеличение поврежденности и снижение сплошности асфальтобетона приводит к более интенсивному накоплению деформаций, как в слоях покрытия, так и в основании дорожной одежды из дискретных материалов, а так же грунтах земляного полотна. Этот вывод подтверждается моделями деформирования дискретных сред и грунтов, полученных в работах [29 – 35].

Для определения мер теории поврежденности используют соотношения различных показателей физических и механических характеристик сплошных и поврежденных материалов. Одним из наиболее часто применяемых способов является расчет поврежденности через отношения модулей упругости поврежденных тел. Этот способ основан на принципе эквивалентности деформаций. Согласно этому принципу деформацию поврежденного тела ε_D можно вычислить по формулам [36]

$$\varepsilon_D = \frac{\sigma}{(1-\omega)} \cdot \frac{1}{E}; \quad \varepsilon_D = \frac{\sigma}{E_D}. \quad (3)$$

В первой формуле зависимостей (3) напряжение в поврежденном теле определено согласно выражению (1), а модуль упругости принят для неповрежденного материала. Во второй формуле зависимостей (3), наоборот модуль упругости принят для поврежденного материала, а величина напряжения считается такой же, как в неповрежденном теле. Приравняв зависимости (3) и выполнив преобразования, получим

$$E_D = E \cdot (1-\omega). \quad (4)$$

$$\omega = 1 - \frac{E_D}{E}; \quad \psi = \frac{E_D}{E}. \quad (5)$$

Специалисты положительно оценивают деформационный подход и достаточно широко применяют представление (5) для

определения поврежденности и характеристик тензора напряжений поврежденной среды [37 – 40]. Более того, специалисты отмечают, что изменение модуля упругости является наиболее удобным при определении поврежденности, как для металлов [36, 41], так и для композитов [42 – 44].

Зависимости (4) и (5) претерпели модификацию, в результате которой возник другой постулат, известный как принцип энергетической эквивалентности [45]. Согласно этому принципу поврежденность так же определяется через отношение модулей упругости поврежденного тела и неповрежденной среды, но по иному выражению, которое имеет вид [45 – 48]

$$\omega = 1 - \sqrt{\frac{E_D}{E}}. \quad (6)$$

Из анализа зависимостей (5) и (6) следует, что модуль упругости поврежденного тела уменьшается по мере роста поврежденности. В условиях воздействия повторной нагрузки этот процесс непрерывен и имеет наследственный характер. Такой характер проявляется в том, что величина модуля упругости, наблюдаемая при воздействии n -ой нагрузки, обусловлена приложением как этой, так и всех предшествующих ей нагрузок. Следовательно, для определения функции изменения модуля упругости можно воспользоваться интегральными уравнениями теории усталости. Подынтегральную функцию, определяющую уменьшение модуля упругости от приложения нагрузки с номером n , дадим в виде степенного уравнения

$$\Delta E_D = a \cdot n^b, \quad (7)$$

где a и b – параметры материалы.

Интегральное уравнение запишем в виде

$$E_{DN} = E \cdot \left(1 - a \cdot \int_1^N n^b dn \right). \quad (8)$$

Взяв интеграл (8), получим

$$E_{DN} = E \cdot \left(1 - a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b+1} \right). \quad (9)$$

Подставив (9) в формулы (5) и (6), получим

$$\omega = a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b+1}; \quad \omega = 1 - \sqrt{1 - a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b+1}}. \quad (10)$$

Примем в качестве условия пластичности критерий, модифицированный в работе [24], который имеет вид

$$\frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \cdot \sigma_3 \right) = c, \quad (11)$$

где φ – угол внутреннего трения, °; c – сцепление, МПа; d – параметр материала, зависящий от величины деформации, принимаемой за предельную при выполнении трехосных испытаний.

Особенностью условия пластичности (11) является зависимость касательных напряжений, вычисляемых по левой части этого уравнения, от параметра d . В зависимости от величины параметра d это условие способно принимать вид других критериев. Так при $d=0,5$ уравнение (11) становится критерием Кулона – Мора, а при $d=0$ это уравнение тождественно третьей теории прочности. Применяя в (11) правила (2), получим

$$\frac{1}{2 \cdot (1 - \omega)} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \cdot \sigma_3 \right) = c. \quad (12)$$

Подставив в выражение (12) формулы (10), получим два варианта уравнений предельного равновесия

$$\frac{1}{2 \cdot \left(1 - a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b+1} \right)} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \cdot \sigma_3 \right) = c. \quad (13)$$

$$\frac{1}{2 \cdot \left(\sqrt{1 - a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b+1}} \right)} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \cdot \sigma_3 \right) = c. \quad (14)$$

Зависимости (13) и (14) являются окончательной модификацией критерия (11), в которых учитывается накопление повреждений в асфальтобетоне при воздействии повторных нагрузок.

Заключение

В заключение целесообразно дать рекомендации по применению материалов статьи и дальнейших путях развития исследования.

1. В статье предложен способ модификации критериев прочности и условий пластичности материалов, заключающийся в подстановке в уравнения предельного состояния характеристик напряженного состояния поврежденного тела. В этих критериях сохраняется физический смысл теории Качанова – Работного, в соответствии

с которым увеличение поврежденности материала или уменьшение его сплошности приводит к росту компонент тензора напряжений. Предложенные условия могут быть применены для расчета асфальтобетонного покрытия на сопротивление сдвигу.

2. Применением интегральных уравнений получена степенная модель уменьшения модуля упругости и увеличения поврежденности при повторных нагрузках.

3. Дальнейшие исследования должны состоять в разработке методики экспериментального определения поврежденности асфальтобетона при трехосном сжатии в условиях воздействия многократно прикладываемых нагрузок.

Библиографический список

1. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-72. М.: Транспорт, 1973. – 110 с.
2. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83. М.: Транспорт, 1985. – 157 с.
3. Проектирование нежестких дорожных одежд. ОДН 218.046-01. М.: Информавтодор, 2001. – 145 с.
4. Александрова, Н.П. Учет поврежденности структуры асфальтобетона в критериях прочности и условиях пластичности / Н.П. Александрова, А.С. Александров, В.В. Чусов // МАТЕРИАЛЫ VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия - ЕС. «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на дальнем востоке». – Новосибирск 2015. – С. 219 – 225.
5. Батраков, О.Т. Усиление нежестких дорожных одежд / О.Т. Батраков. – М.: Транспорт, 1985. – 144 с.
6. Александрова, Н.П. Модификация критериев прочности и условий пластичности при расчетах дорожных одежд / Н.П. Александрова, А.С. Александров, В.В. Чусов // Вестник СибАДИ. – 2015. – № 4. – С. 47 – 54.
7. Александрова, Н.П. Проверка толщины монолитных слоев покрытий по модифицированному критерию Кулона – Мора, учитывающему микрповреждения структуры / А.С. Александров, Н.П. Александрова, Е.В. Андреева и др. // В кн. Стандарт организации. Расчет дорожных одежд нежесткого типа дорог газовых промыслов Ямало-Ненецкого автономного округа по критериям прочности. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2014. – С. 49 – 51.
8. Герцог, В.Н. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий / В.Н. Герцог, Г.В. Долгих, В.Н. Кузин // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №5 (57). – С. 45-57.
9. Ahlvin R.G., Ulery H.H. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Load on a Homogeneous Half Space, Bull. 342, Highway Research Record, pp. 1–13, 1962.
10. Александров, А.С. Расчет главных напряжений в слоях дорожной одежды из дискретных материалов / А.С. Александров, Г.В. Долгих // Транспортное строительство. – 2011. – № 7. – С. 17 – 22.
11. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. – 2003. – 189 p.
12. Александров, А.С. Один из путей расчета минимальных главных напряжений в грунтах земляного полотна / А.С. Александров // В сборнике: Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ». – Омск, СибАДИ, 2013. – С. 217 – 228.
13. Александров, А.С., Александрова Н.П., Долгих Г.В. Модифицированные модели для расчета главных напряжений в дорожных конструкциях из дискретных материалов // Строительные материалы. – 2012. – № 10. – С. 14 – 17.
14. Александрова, Н.П. Модифицированные модели для расчета главных напряжений в грунте земляного полотна // В сборнике: Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ». Омск, 2013. – С. 236 – 246.
15. Александрова, Н.П. Совершенствование моделей расчета главных напряжений и девиатора в грунте земляного полотна / Н.П. Александрова, Т.В. Семенова, Г.В. Долгих // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 2 (36). – С. 49 – 54.
16. Odemark N. Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements according to the Theory of Elasticity. Ph.D. thesis. Statens Väginstitut, Mitteilug No. 77. Stockholm, Sweden, 1949.
17. Александров, А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Состояние вопроса: монография / А.С. Александров. – Омск: СибАДИ, 2015. – 292 с.
18. Александров, А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 2. Предложения: монография / А.С. Александров. – Омск: СибАДИ, 2015. – 262 с.
19. Чусов, В.В. Перспективы применения эмпирических условий пластичности грунтов и определение их параметров при трехосных испытаниях грунтов / В.В. Чусов // Вестник ВолГАСУ. – 2015. – № 4 (61). – С. 49-57.
20. Александров, А.С. Модификация критериев прочности сплошной среды для расчета грунтов земляного полотна по сопротивлению сдвигу / А.С. Александров, Г.В. Долгих А.Л. Калинин // В сборнике: Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации Материалы

Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ». – Омск: СибАДИ, 2013. – С. 228-235.

21. Калинин, А.Л. Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна / А.Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал – 2013. – № 4 (39). – С. 35 – 45.

22. Александров А.С. Применение критерия Друкера – Прагера для модификации условий пластичности / А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 2. – С. 26 – 29.

23. Калинин, А.Л. Применение модифицированного критерия Писаренко – Лебедева для расчета касательных напряжений в земляном полотне / А.Л. Калинин // В сборнике: Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ». Омск, 2013. – С. 299-307.

24. Александров А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора / А.С. Александров, А.Л. Калинин // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 7 (59). – С. 4 – 17.

25. Долгих, Г.В. Применение критерия безопасных давлений для расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна / Г.В. Долгих // В сборнике: Политранспортные системы материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия - ЕС. Новосибирск, 2015. – С. 176-182.

26. Александров, А.С. Один из путей совершенствования расчета дорожных одежд по условию сопротивления сдвигу в грунте земляного полотна / А.С.Александров, Долгих Г.В., А.Л. Калинин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2013. Т 3. – С. 9 – 22.

27. Долгих, Г.В. Расчет нежестких дорожных одежд по критерию безопасных давлений на грунты земляного полотна: дис. ... канд. техн. наук / Г.В. Долгих. – Омск: 2014. – 237 с.

28. Александров, А.С. О допускаемых давлениях на грунты земляного полотна и слою дорожной одежды / А.С. Александров, Г.В. Долгих, А.Л. Калинин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 2. – С. 10 – 13.

29. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. //Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements. London – 1972. – P. 161-174.

30. Александров, А.С. Пластическое деформирование гнейс и диабаз материалов при воздействии повторяющихся нагрузок /А.С. Александров, Н.Ю. Киселева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 6. – С. 49 – 59.

31. Khedr S.A. Deformation characteristics of granular base course in flexible pavements // Transportation Research Record, № 1043, Transportation Research Board, Washington, D. C. – 1985. – P. 131-138.

32. Александров, А.С. Применение теории наследственной ползучести к расчету деформаций при воздействии повторных нагрузок: монография / А.С. Александров. – Омск: СибАДИ, 2014. – 150 с.

33. Sweere G.T.H. Unbound granular bases of roads. // PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1990.

34. Александров, А.С. Пластическое деформирование гранодиоритового щебня и песчано-гравийной смеси при воздействии трехосной циклической нагрузки / А.С. Александров // ИСЖ. – 2013. – №4. – С. 22 – 34.

35. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. – 2003. – 189 p.

36. Lemaitre J., Dufailly J. Damage measurements. Engineetieg Fntcturr Mechanics 1987. Vol. 28. No. 516. – Pp. 643 – 661.

37. Ambroziak, A Klosowski, P. Survey of modern trends in analysis of continuum damage mechanics. Task Quarterly. 2006. No 4, 437 – 454.

38. Bhattacharya, B., Ellingwood, B. Continuum Damage Mechanics Analysis Of Fatigue Crack Initiation. Int. J. Fatigue 1998. Vol. 20, No. 9, Pp. 631–639.

39. Granda Marroquin, L.E. et al. Cumulative Damage Evaluation under Fatigue Loading. Applied Mechanics and Materials. 2008. no. 13-14. Pp 141 – 150.

40. 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.

41. Kim, S., Kim, W. A progressive damage modeling based on the continuum damage mechanics and its finite element analysis. Journal of Applied Mechanics. 1994. Vol. 61. Pp. 45 – 53.

42. Delaet M, Lataillade J, Wol C. Intralaminar shear loading effects on the damage process of multiply composites at impact rates. In: International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading - Journal de Physique IV. Les EÂditions de Physique and DYMAT, 1994. Pp. 213 – 218.

43. Lemaitre, J., Leckie, F., Sherman D. Crazing of laminates. European Journal of Mechanics, A/Solids 1992. Vol.11(3). Pp. 289 – 304.

44. Tang, C., Plumtree, A. Damage mechanics applied to polymers. Engineering Fracture Mechanics 1994. Vol. 49(4). Pp. 499 – 508.

45. Alves, M., Yu J., Jones, N. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics. Computers and Structures 2000. Vol. 76. Pp. 703 – 712.

46. Cordebois, J., Sidoro, F. Damage induced elastic anisotropy. In: Boehler J, editor. Mechanical behaviour of anisotropic solids. London; Paris: Martinus Nijhoff Publishers; Editions du CNRS, 1979. pp. 761–774.

47. Chow, C.L., Lu, T.L. On evolution laws of anisotropic damage. Engineering Fracture Mechanics. 1989. Vol. 34(3). Pp. 679–701.

48. Shen, J. et al. Material damage evaluation with measured microdefects and multiresolution numerical analysis. International Journal of Damage Mechanics. 2014, Vol. 23(4) Pp. 537 – 566.

**CALCULATION OF ASPHALT CONCRETE
PAVEMENTS ON SHEAR STRENGTH TAKING
INTO ACCOUNT THE ACCUMULATION
OF MICRODAMAGE**

N.P. Alexandrova, V.V. Chusov

Abstract. The article analyzes the working conditions of asphalt at high summer temperatures, and shows that in such conditions, asphalt pavement experiencing plastic shear strain. Such deformations are due to the loss of the ability of asphalt to work on bending, resulting throughout the coating thickness of the material tests triaxial compression. The authors propose to perform inspection of asphalt in the pavement on the shear strength, using for this purpose a modified criterion of Mohr – Coulomb, which includes three material parameter and a measure of theory of damage (the continuity of L. M. Kachanov or damage Y. Rabotnov). By use of integral equations of hereditary theories received mathematical model changes the integrity and damage when exposed to repeated loads.

Keywords: Strength criterion, plasticity condition, damage of Y.N. Rabotnova, continuity L.M. Kachanov, twin shear criterion.

References

1. *Instrukcija po projektirovaniju dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa. VSN 46-72* [Instructions for designing pavements nonrigid type]. Moscow: Transport, 1973. 110 p.
2. *Instrukcija po projektirovaniju dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa. VSN 46-83* [Instructions for designing pavements nonrigid type]. Moscow: Transport, 1985. 157 p.
3. *Projektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd. ODN 218.046-01* [Design of of nonrigid pavements]. Moscow: Informavtodor, 2001. 145 p.
4. Aleksandrova N.P., Aleksandrov A.S., Chusov V.V. Uchet povrezhdennosti struktury asfal'tobetona v kriterijah prochnosti i uslovijah plastichnosti [Accounting for patterns of damage in asphalt concrete evaluation criteria of strength and plasticity condition]. MATERIALY VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii v ramkah goda nauki Rossiya - ES. «Nauchnye problemy realizacii transportnyh projektov v Sibiri i na dal'nem vostoke» Novosibirsk, 2015. pp 219-225.
5. Batrakov O.T. *Usilenie nezhestkih dorozhnyh odezhd* [Strengthening of nonrigid pavements]. Moscow: Transport, 1985. 144 p.
6. Aleksandrova N.P., Aleksandrov A.S., Chusov V.V. Modifikacija kriteriev prochnosti i uslovij plastichnosti pri raschetah dorozhnyh odezhd [Application the theory of damage for modification strength and plasticity condition criteria]. *Vestnik SibADI*, 2015, no 4(44). pp 47-54.
7. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Andreeva E.V. i dr. Proverka tolshhiny monolitnyh sloev pokrytij po modifitsirovannomu kriteriju Kulona – Mora, uchityvajushhemu mikropovrezhdenija struktury [Check the thickness of monolithic layers of coatings on the modified criterion of Mohr – Coulomb, taking into account the microdamage patterns] V kn. *Standart organizacii. Raschet dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa dorog gazovyh promyslov Jamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga po kriterijam prochnosti*. Omsk: Publ. SibADI, 2014. pp 49 – 51.
8. Gercog V.N., Dolgih G.V., Kuzin V.N. Raschet dorozhnyh odezhd po kriterijam rovnosti. Chast' 1. Obosnovanie norm rovnosti as-fal'tobetonnyh pokrytij [Calculation of pavement on the criteria of flatness. Part 1. The justification of standards of flatness asphalt pavement]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Magazine of civil engineering], 2015, no 5 (57). pp 45-57.
9. Ahlvin R.G., Ulery H.H. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Load on a Homogeneous Half Space, Bull. 342, Highway Research Record, pp. 1–13, 1962.
10. Aleksandrov A.S., Dolgih G.V. Raschet glavnyh naprjazhenij v slojah dorozhnoj odezhd iz diskretnykh materialov [The calculation of the principal stresses in the pavement layers of discrete materials]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 2011, no 7, pp 17-22.
11. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. – 2003. – 189 p.
12. Aleksandrov A.S. Odin iz putej rascheta minimal'nyh glavnyh naprjazhenij v gruntah zemljanogo polotna [One of the ways of calculating minimum principal stresses in the soil subgrade]. V sbornike: *Arhitektura. Stroitel'stvo. Transport. Tehnologii. Innovacii Materialy Mezhdunarodnogo kongressa FGBOU VPO «SibADI»*. Omsk: Publ. SibADI, 2013. pp 217 – 228.
13. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Dolgih G.V. Modifitsirovannye modeli dlja rascheta glavnyh naprjazhenij v dorozhnyh konstrukcijah iz diskretnykh materialov [Modified model for the calculation of the principal stresses in road constructions of discrete materials]. *Stroitel'nye materialy*, 2012, no 10. pp 14 – 17.
14. Aleksandrova N.P. Modifitsirovannye modeli dlja rascheta glavnyh naprjazhenij v grunte zemljanogo polotna [Modified model for the calculation of the principal stresses in the soil subgrade]. V sbornike: *Arhitektura. Stroitel'stvo. Transport. Tehnologii. Innovacii Materialy Mezhdunarodnogo kongressa FGBOU VPO «SibADI»*. Omsk, 2013. pp 236 – 246.
15. Aleksandrova N.P., Semenova T.V., Dolgih G.V. Sovershenstvovanie modelej rascheta glavnyh naprjazhenij i deviatora v grunte zemljanogo polotna [Improved models for calculating the principal stresses of the deviator and in the soil subgrade]. *Vestnik SibADI*, 2014, no 2 (36). pp 49 – 54.
16. Odemark N. Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements according to the Theory of Elasticity. Ph.D. thesis. Statens Väginstitut, Mitteilug No. 77. Stockholm, Sweden, 1949.
17. Aleksandrov A.S. *Sovershenstvovanie rascheta dorozhnyh konstrukcij po soprotivleniju*

sdvigu. Chast' 1. Sostojanie voprosa [Improvement of calculation of road designs for shear strength. Part 1. State of issue: monograph]. Omsk: SibADI, 2015, 292 p.

18. Aleksandrov A.S. *Sovershenstvovanie rascheta dorozhnykh konstrukcij po soprotivleniju sdvigu. Chast' 2. Predlozhenija* [Improvement of calculation of road designs for shear strength. Part 2. Suggestions]. Omsk: SibADI, 2015, 262 p.

19. Chusov V.V. *Perspektivy primeneniya jempiricheskikh uslovij plastichnosti gruntov i opredelenie ih parametrov pri trehosnykh ispytaniyah gruntov* [Prospects of application of the empirical conditions of plasticity of soils and determination of their parameters during triaxial testing of soils]. *Vestnik VolGASU*, 2015, no 4 (61), pp 49-57.

20. Aleksandrov A.S., Dolgih G.V., Kalinin A.L. *Modifikacija kriteriev prochnosti sploshnoj sredy dlja rascheta gruntov zemljanogo polotna po soprotivleniju sdvigu* [Modification of strength criteria continuum for the calculation of subgrade soil by shear strength] *V sbornike: Arhitektura. Stroitel'stvo. Transport. Tehnologii. Innovacii Materialy Mezhdunarodnogo kongressa FGBOU VPO «SibADI»*. Omsk: SibADI, 2013, pp 228-235.

21. Kalinin A.L. *Primenenie modifitsirovannykh uslovij plastichnosti dlja rascheta bezopasnykh davlenij na grunty zemljanogo polotna* [The application of modified plasticity conditions for the calculation of safe pressure on the subgrade soils]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2013, no 4 (39), pp 35 – 45.

22. Aleksandrov A.S., Dolgih G.V., Kalinin A.L. *Primenenie kriterija Drukera – Pragera dlja modifikacii uslovij plastichnosti* [The application of the criterion of Drucker – Prager for modification of the conditions of plasticity]. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*, 2013, no 2, pp 26 – 29.

23. Kalinin A.L. *Primenenie modifitsirovannogo kriterija Pisarenko – Lebedeva dlja rascheta kasatel'nykh naprazhenij v zemljanom polotne* [The criterion of application of the modified Pisarenko – Lebedev for the calculation of shear stresses in the roadbed] *V sbornike: Arhitektura. Stroitel'stvo. Transport. Tehnologii. Innovacii Materialy Mezhdunarodnogo kongressa FGBOU VPO «SibADI»*. Omsk, 2013, pp 299-307.

24. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. *Sovershenstvovanie rascheta dorozhnykh konstrukcij po soprotivleniju sdvigu. Chast' 1. Uchet deformacij v uslovii plastichnosti Kulona – Mora* [Improvement of calculation of road designs for shear strength. Part 1. Accounting for the deformations in condition of plasticity Coulomb – Mohr] *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2015, no 7 (59), pp 4 – 17.

25. Dolgih G.V. *Primenenie kriterija bezopasnykh davlenij dlja rascheta dorozhnykh konstrukcij po soprotivleniju sdvigu v grunte zemljanogo polotna* [The application of the criterion of safe pressures for the calculation of road structures on the shear strength of soil subgrade] *V sbornike: Politransportnye sistemy materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii v ramkah goda nauki Rossija – ES*. Novosibirsk, 2015, pp 176-182.

26. Aleksandrov A.S., Dolgih G.V., Kalinin A.L. *Odin iz putej sovershenstvovaniya rascheta dorozhnykh odezhd po usloviju soprotivlenija sdvigu v grunte zemljanogo polotna* [One of the ways to improve the calculation of pavement condition on the shear resistance of the soil subgrade] *Modernizacija i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*. 2013. T 3. Pp. 9 – 22.

27. Dolgih G.V. *Raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd po kriteriju bezopasnykh davlenij na grunty zemljanogo polotna*. Dis. kand. tehn. Nauk [The analysis for flexible pavements as the criterion of safe pressure on the soil subgrade. Candidate of technical Sciences dissertation]. Omsk, 2014. 237 p.

28. Aleksandrov A.S., Dolgih G.V., Kalinin A.L. *O dopuskaemykh davlenijah na grunty zemljanogo polotna i sloi dorozhnoj odezhd* [On allowable pressures on the soil subgrade and pavement layers] *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*, 2012, no 2, pp 10 – 13.

29. Barksdale R.D. *Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials*. //Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements. London – 1972. – P. 161-174.

30. Aleksandrov, A.S., Kiseleva N.Ju. *Plasticheskoe deformirovanie gnejs i diabaz materialov pri vozdejstvii povtorjajushchih nagruzok* [Plastic deformation of gneiss and diabase materials when subjected to repeated loading] *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*, 2012, no 6, pp 49 – 59.

31. Khedr S.A. *Deformation characteristics of granular base course in flexible pavements* // Transportation Research Record, № 1043, Transportation Research Board, Washington, D. C. – 1985. – P. 131-138.

32. Aleksandrov, A.S. *Primenenie teorii nasledstvennoj polzuchesti k raschetu deformacij pri vozdejstvii povtornykh nagruzok* [Application of the theory of hereditary creep to the calculation of deformations under the influence of repeated loads]. Omsk: SibADI, 2014. 150 p.

33. Sweere G.T.H. *Unbound granular bases of roads*. // PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 1990.

34. Aleksandrov, A.S. *Plasticheskoe deformirovanie granodioritovogo shhebnya i peschano-gravijnoj smesi pri vozdejstvii trehosnoj ciklicheskoj nagruzki* [Plastic deformation of the granodiorite of rubble and sand-gravel mixtures when exposed to triaxial cyclic loading]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2013, no 4, pp 22 – 34.

35. Werkmeister S. *Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions* // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. – 2003. – 189 p.

36. Lemaitre J., Dufailly J. *Damage measurements*. *Engineetieg Fntcturr Mechanics* 1987. Vol. 28. no. 516. – Pp. 643 – 661.

37. Ambroziak, A Klosowski, P. *Survey of modern trends in analysis of continuum damage mechanics*. Task Quarterly. 2006, no 4, 437 – 454.

38. Bhattacharya, B., Ellingwood, B. *Continuum Damage Mechanics Analysis Of Fatigue Crack*

Initiation. Int. J. Fatigue 1998. Vol. 20, no. 9, pp. 631–639.

39. Granda Marroquin, L.E. et al. Cumulative Damage Evaluation under Fatigue Loading. Applied Mechanics and Materials. 2008. Vols. 13-14. pp 141 – 150.

40. 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.

41. Kim, S., Kim, W. A progressive damage modeling based on the continuum damage mechanics and its finite element analysis. Journal of Applied Mechanics. 1994. Vol. 61. Pp. 45 – 53.

42. Delaet M, Lataillade J, Wol C. Intralaminar shear loading effects on the damage process of multiply composites at impact rates. In: International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading - Journal de Physique IV. Les Éditions de Physique and DYMAT, 1994. Pp. 213 – 218.

43. Lemaitre, J., Leckie, F., Sherman D. Crazing of laminates. European Journal of Mechanics, A/Solids 1992. Vol.11(3). Pp. 289 – 304.

44. Tang, C., Plumtree, A. Damage mechanics applied to polymers. Engineering Fracture Mechanics 1994. Vol. 49 (4). Pp. 499 – 508.

45. Alves, M., Yu J., Jones, N. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics. Computers and Structures 2000. Vol. 76. Pp. 703 – 712.

46. Cordebois, J., Sidorov, F. Damage induced elastic anisotropy. In: Boehler J, editor. Mechanical behaviour of anisotropic solids. London; Paris: Martinus Nijhoff Publishers; Editions du CNRS, 1979. Pp. 761–774.

47. Chow, C.L., Lu, T.L. On evolution laws of anisotropic damage. Engineering Fracture Mechanics. 1989. Vol. 34(3). Pp. 679–701.

48. Shen, J. et al. Material damage evaluation with measured microdefects and multiresolution numerical analysis. International Journal of Damage Mechanics. 2014, Vol. 23(4) Pp. 537 – 566.

Александрова Наталья Павловна (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО СиБАДИ (644080, г. Омск, пр. Мира 5, e-mail: aleksandrov00@mail.ru).

Чусов Василий Владимирович (Россия, г. Омск) – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» ФГБОУ ВО «СиБАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира 5, e-mail: chysow@gmail.com).

Natalia Pavlovna Alexandrova – candidate technical sciences, docent, docent The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, pr. Mira 5, e-mail: aleksandrov00@mail.ru).

Chusov Vasily Vladimirovich – graduate student of «Construction and maintenance of roads» The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, pr. Mira 5, e-mail: chysow@gmail.com).

УДК 693.95:658.562

СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА БЕЗРИГЕЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Н.С. Воловник, А.Ф. Андриюшенков, В.А. Казаков
ФГБОУ ВО «СиБАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования точности изготовления и монтажа железобетонных колонн жилого здания, возведенного по технологии «КУБ 2,5». В исследованиях использован математический аппарат теории вероятностей и математической статистики. Погрешности изготовления и монтажа колонн были исследованы как случайные величины в малых выборках. Полученные гистограммы отображают эмпирическое распределение погрешностей. Кривые теоретического распределения построены по значениям вероятностей для каждого интервала в исследуемой совокупности. Степень близости теоретического и эмпирического распределений оценивалась по критериям К. Пирсона, Б.С. Ястремского и А.Н. Колмогорова. Определены классы точности действительных и номинальных значений параметров. Рассмотрены преимущества технологий «КУБ 2,5» и «КУБ 3V», вопросы внедрения в Сибирском регионе.

Ключевые слова: сборно-монолитные безригельные каркасы зданий, точность изготовления и монтажа.

Введение

Одним из аспектов качества возводимых объектов является точность изготовления и монтажа конструкций зданий. Своевременный

анализ качества возводимых объектов позволяет совершенствовать технологические процессы, способствует обеспечению собираемости зданий и