

## ФОРМА DOG-BONE АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ПРЯМОЕ ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

### DOG-BONE SHAPED ASPHALT CONCRETE SAMPLES FOR DIRECT UNIAXIAL TENSION TESTING

Приводится обзор существующих форм асфальтобетонных образцов. Проведен их анализ на соответствие работы материала в конструкции дорожной одежды, а также на удобство изготовления и проведения экспериментальных исследований механических свойств. Предложена форма образцов для испытания асфальтобетона при прямом одноосном растяжении, обеспечивающая однородность напряженного состояния в рабочей (контрольной) зоне и возможность получения деформационных характеристик материала путем непосредственного измерения. Для оценки работоспособности оснастки, удобства проведения испытаний, выявления недостатков и адекватности предлагаемой формы изготовлена серия опытных образцов, проведены испытания, показавшие работоспособность как оснастки, так и образцов, разрушающихся в контрольной зоне по ожидаемому сценарию.

*Ключевые слова:* асфальтобетон, образец, одноосное растяжение, испытание, напряженно-деформированное состояние, разрушение.

The article presents an overview of the existing forms of asphalt concrete samples and their analysis for the suitability of the material's performance in the pavement design, the ease of manufacturing and conducting experimental studies of mechanical properties. The form of samples for testing asphalt concrete under direct uniaxial tension is proposed, which provides homogeneity of the stress state in the working (control) zone and the possibility of obtaining deformation characteristics of the material by direct measurement. In order to evaluate the performance of the tooling, convenience of testing, identification of shortcomings and adequacy of the proposed mould, a series of prototypes were manufactured and tests were carried out, showing the performance of both the tooling and samples failing in the control zone according to the expected scenario.

*Keywords:* asphalt concrete, specimen, uniaxial tension, testing, stress-strain state, fracture.

#### Введение

Прочность на растяжение материала является одной из его основных механических характеристик при оценке работоспособности элемента конструкции под нагрузкой [1]. В отечественных нормах, связанных с прочностью асфальтобетонов, отсутствует единый нормативный документ, регламентирующий и стандартизирующий прямые

испытания образцов, на основании которых можно было бы получать прочность материала при одинаковых условиях.

Сложность оценки прочности такого конструкционного материала, как асфальтобетон, диктуется не только нелинейностью его работы, обусловленной зависимостью прочности от температуры и времени, циклическим характером действующей нагрузки [2],

но и тем, что смесь превращается в конструкционный материал непосредственно в процессе изготовления дорожного покрытия [3, 4]. Поэтому выбор той или иной формы образцов асфальтобетона на одноосное растяжение определяется целым рядом обстоятельств.

Кроме общих требований, которым должны удовлетворять образцы из любых других материалов (создание однородного напряженного состояния в контрольной зоне образца и обеспечение захвата в испытательной машине), асфальтобетонные образцы из уплотняемых смесей должны отражать механические свойства, определяемые механическим уплотнением при производстве дорожного покрытия. Так как образцы на одноосное растяжение используются для исследования нормальных напряжений и деформаций, вызываемых изгибом полотна под нагрузкой от колес автомобилей и действующих горизонтально по вертикальным площадкам, а уплотняющее воздействие от уплотняющей техники направлено вертикально, то ось образца должна быть ориентирована перпендикулярно направлению уплотнения [5, 6].

Образцы могут быть как извлекаемыми из готового дорожного покрытия или из лабораторных заготовок, так и изготовленными в специальных формах, в которых с той или иной степенью точности моделируются условия уплотнения при производстве работ. Прочностные характеристики, определяемые на извлекаемых образцах, вырезанных фрезой, и на формованных, могут отличаться друг от друга. Это обусловлено тем, что вырезаемые имеют, с одной стороны, нарушенную структуру поверхности среза [6] (асфальтобетон в конструкции покрытия не имеет таких локальных повреждений), с другой стороны, различное распределение плотности материала (воздушных пустот) по объему образцов, которое существенным образом определяет их механические

свойства и связано с различным характером уплотнения.

Так как при испытаниях определяются не только разрушающие напряжения, но и другие параметры напряженно-деформированного состояния, форма образца должна обеспечивать возможность прямых измерений деформаций, то есть иметь поверхность для установки средств измерения, что существенно уточняет результаты испытаний [7].

Опираясь на вышеуказанные особенности, возможно разработать форму, позволяющую изготавливать образцы из горячего асфальтобетона на одноосное прямое растяжение как в лабораторных, так и производственных условиях. Целью представленных результатов исследований является экспериментальная проверка применяемой формы образцов на одноосное прямое растяжение при статическом нагружении.

#### Методы

Применяемые образцы для испытаний на одноосное растяжение отличаются геометрической формой, способом изготовления и способом передачи нагрузки от испытательной машины на образец. Эти отличия и определяют многообразие применяемых образцов. Проведен обзор и анализ образцов, освещенных в литературе [5, 8–13, 15–17]. Выполнен численный расчет методом конечных элементов (МКЭ) в двумерной постановке напряженно-деформированного состояния (НДС) образца при нагрузке испытаний, на основании чего сделан вывод о размере зоны однородного напряженного состояния. Изготовлена оснастка для принятой формы образца и проведены ее испытания в производственных условиях. Лабораторные испытания партии образцов на прочность определили зоны и характер их разрушения.

Характерные формы образцов асфальтобетона, применяемые при испытаниях на одноосное растяжение, следующие:

**1. Цилиндрический образец.** В исследовании американских ученых [8], разработавших двухпараметрическую модель поведения асфальтобетона под нагрузкой, были применены образцы в виде цилиндра с соотношением диаметра к высоте примерно 1:2 (рис. 1).

Уплотнение горячей смеси, находящейся в форме, осуществлялось путем подачи давления на торцы изготавливаемого образца. Плотность материала контролировалась по величине высоты получаемого образца при изначально заданной массе смеси. Нагружение образца осуществлялось через приклеенные эпоксидной двухкомпонентной смолой к торцам стальные крышки. Для измерения продольных и поперечных деформаций применялись индикаторы часового типа.

К положительным качествам данного варианта образца можно отнести наличие зоны однородного напряженного состояния с возможностью размещения на ней измерительных датчиков, надежное обеспечение захвата в испытательной машине с возможностью контроля центровки нагрузки, отсутствие поврежденной поверхности фрезерования.

К недостаткам следует отнести:

- воздушные пустоты по объему распределены неравномерно и определяемая прочность неточно отражает механические характеристики материала в конструкции;



Рис. 1. Цилиндрический образец Лала

- из-за стесненности деформаций в окрестностях приклейки крышек размер зоны однородного напряженного состояния изначально неизвестен и зависит от механических характеристик материала образца, что усложняет организацию инструментальных измерений и требует дополнительных предварительных оценок размеров этой зоны;

- направление уплотнения смеси совпадает с осью образца, что не соответствует искомым параметрам для материала, находящегося в конструкции.

Подобный образец использовался при разработке критерия прочности асфальтобетона с учетом температуры [9], однако соотношение диаметра к высоте образца было принято 1:1. В этом случае, кроме указанных выше недостатков, добавляется еще и то, что зона однородного напряженного состояния практически исчезает из-за слишком близкого взаимного расположения крышек крепления.

Для более равномерного распределения воздушных пустот по объему образца применяются образцы, изготавливаемые в гираторах, где смесь уплотняется не только статическим давлением вдоль оси цилиндрической формы, но и за счет действия центробежных сил при вращении. Кроме того, установка формы под углом к оси вращения гиратора вызывает появление касательных напряжений, действующих на поверхностях контакта смеси и формы и моделирует сдвиг от уплотняющей техники. В этом случае отсутствует поверхность с нарушенной структурой материала, но, как показывают исследования [10], распределение воздушных пустот по объему получается неравномерным. Большее количество пустот оказывается на периферии объема у криволинейных боковых поверхностей и у плоских торцов. Для получения образцов с более равномерным распределением пустот их вырезают из заготовок, уплотненных в гираторе, что при-

водит к появлению фрезерованных поверхностей.

Цилиндрические образцы (рис. 2) рекомендованы зарубежными нормативными документами [11], которые часто применяются в исследованиях асфальтобетона [12–14], в том числе и при определении усталостных характеристик при переменном воздействии нагрузки [5]. В указанной работе при обсуждении неполного соответствия ожидаемых параметров при прямом одноосном



Рис. 2. Вырезаемый цилиндрический образец

испытании и бразильской пробы выдвигается предположение о причинах искажения. Высказывается обоснованное мнение, что одной из таких причин является существенное влияние приклеенных жестких крышек крепления на однородность напряженного состояния в контролируемой зоне, вызванной стесненностью деформации.

**2. Параболический образец.** Во избежание концентрации напряжений и для точного расположения контрольной зоны однородного напряженного состояния применяются образцы в виде тела вращения с параболической поверхностью (рис. 3). Исследователи Делфтского технологического университета применяли образцы, уплотняемые в гираторе [15] с уклоном оси вращения и осью образца в  $2^\circ$ . Нагружение образцов органами испытательной машины осуществлялось через приклеенные к торцам эпоксидной смолой стальные чашки.

Данная форма образца обладает положительными характеристиками: ненарушенной структурой боковой поверхности, однозначно расположенной зоной с однородным напряженным состоянием, надежной организацией соосности образца с подаваемой нагрузкой от испытательной машины. Вместе с тем данная форма является сложной в изготовлении, не позволяет получить

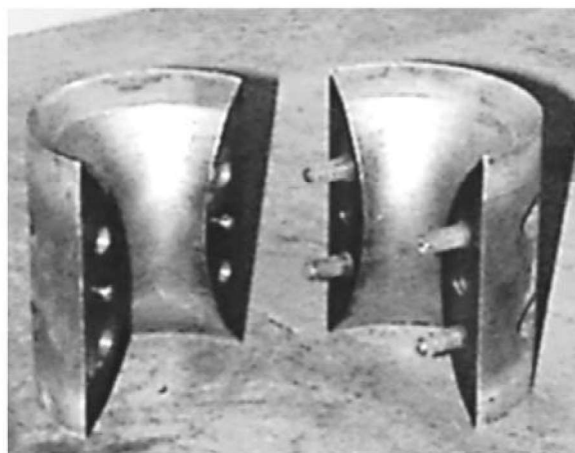


Рис. 3. Форма для параболического образца Эркенса-Пута

равномерное распределение воздушных пустот по объему, требует значительных трудозатрат и использования дополнительных приспособлений по извлечению уплотненных заготовок и их фрезерованию перед испытаниями. Кроме того, поскольку отсутствует плоская поверхность или прямая образующая, использование измерительных инструментов на таких образцах затруднительно. Примененные авторами тензодатчики, приклеенные на боковую криволинейную поверхность, должны давать не вполне точные величины и требуют пересчета осевых деформаций с введением упрощающих гипотез.

**3. Плоский образец-восьмерка.** В работе [16] авторы описывают образец двутавровой (гантелеобразной) формы из заготовленной асфальтобетонной плиты, полученный путем выпиливания фрезой. В таком образце имеется прямой входящий угол между зонами захватов и рабочей зоной, что неизбежно обусловит наличие концентрации напряжений и разрушение его не в области однородных растягивающих напряжений. Кроме того, выпиливание этого угла режущим инструментом приведет к образованию локальных разрушений и появлению микротрещин в наиболее напряженной зоне, поэтому представляется сомнительным, что на данных образцах могут быть получены достоверные результаты.

#### **Форма dog-bone**

Образцы с прямолинейной рабочей зоной, применяемые при исследованиях бетонов на минеральном вяжущем и называемые «dog-bone» (собачья кость), рассматривались в работе ван Миера [17]. В отличие от вышеупомянутого образца-восьмерки, в образцах dog-bone отсутствуют входящие углы, а между захватной и рабочей частями устраивается галтель. В этом случае образец будет иметь прямоугольное поперечное сечение и плоскость рабочей зоны для контрольных измерений. Галтель между захватными час-

тями и рабочей зоной обеспечит отсутствие входящих углов, минимизацию зон концентрации напряжений и наличие в ней однородного напряженного состояния. Уплотняющее давление на асфальтобетонную смесь при изготовлении будет перпендикулярно оси образца, что соответствует положению материала в конструкции дорожного покрытия и позволит исследовать НДС материала при изгибе в дорожной конструкции. Представляется немаловажным, что данная форма может применяться для изготовления как лабораторных образцов, так и образцов извлекаемых, приготовленных в производственных условиях. При этом в обоих случаях в образцах не будет нарушенной структуры материала, вызванных фрезерованием. Уплотнение лабораторных образцов может производиться в соответствии с действующими нормами для асфальтобетонов<sup>1,2</sup>, а в образцах из конструкции давление будет соответствовать реальному, применяемому при производстве работ. В этом случае даже при неравномерном распределении воздушных пустот по объему такая неравномерность будет отражать реальную структуру и свойства материала.

Форма образца выполнена в виде сварной рамки из стальной полосы толщиной 6 мм, образующей контур образца, для криволинейных участков применены вкладыши толщиной 3,2 мм. Для обеспечения легкости выемки готового образца после уплотнения смеси одна из торцевых пластин рамки соединяется с основным контуром разъемным соединением, образованным встречными надрезами на половину ширины полосы.

Размеры образца диктуются размером рабочей зоны, которая должна обеспечивать исключение влияния масштабного факто-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 58406.4–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Приготовление образцов-плит вальцовым уплотнителем.

<sup>2</sup> ОДН 218.3.108-2019. Методические рекомендации по применению различных методов уплотнения асфальтобетонных смесей в лабораторных условиях.

ра, обусловленного размером заполнителя. В качестве базового размера используется ширина поперечного сечения. Согласно ГОСТ<sup>3</sup> для среднего диапазона крупности заполнителя до 31,5 мм, линейный размер должен быть не менее 5,5 см. С учетом допускаемого диапазона ширина сечения образца принята 60 мм (рис. 4). Из этих же соображений, а также для обеспечения установки измерительных инструментов длина рабочей зоны должна быть не менее ширины, и поэтому ее размер с учетом толщин сварных швов между участками рамки принят равным 76 мм.

Ширина захватных частей принята равной 132 мм из удобства производства рамок, криволинейные части которых изготавливались из сегментов-квадрантов труб Ø75,5 с толщиной стенки 3,2 мм. Длины захватных частей сделаны разными, 57 и 83 мм для экспериментальной проверки их прочности под действием динамической нагрузки от уплотняющей техники.

Захватные устройства изготовлены подобно варианту конструкции ГОСТ<sup>4</sup> на испытания бетонов на минеральном вяжущем. Тяги выполнены из стальных полос сечением 40×4, накладываемых друг на друга, что вызывает незначительную разницу податливости стержней захвата. Такой вариант принят для возможности изменения угла раствора между тягами при экспериментальном подборе оптимального варианта, для которого в дальнейшем может использоваться траверса из пластины треугольной формы с фиксированным положением отверстий для стержней захвата, что позволит обеспечить безупречно симметричное нагружение.

Ширина рамки принята равной 70 мм, несколько больше ширины рабочей части с учетом возможного вдавливания смеси

<sup>3</sup> ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний.

<sup>4</sup> ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

в форму при уплотнении, что обеспечит минимальный размер 55 мм. Для обеспечения ровных лицевых поверхностей образцов на дно и поверх смеси укладываются стальные пластины-вкладыши толщиной 3 мм, контур которых повторяет контур формы с зазором 1 мм. Неподвижное вертикальное положение стенок формы при уплотнении в производственных условиях обеспечивается наличием смеси как внутри, так и вне ее, и подвержена одинаковому давлению. При изготовлении лабораторных образцов вертикальная фиксация стенок обеспечивается жесткими боковыми упорами.

Оценка размеров области однородного напряженного состояния образца выполнена на основании конечно-элементной модели в комплексе Инж-РУ с использованием гибридных конечных элементов. Задача решалась в условиях плоского напряженного состояния линейной теории упругости, коэффициент Пуассона принят равным 0,3. На рис. 5 приведены изополя эквивалентных напряжений по классической теории прочности формоизменения Мизеса.

Приведенные результаты показывают, что размер области однородного состояния по высоте образца составляет около 4 см, что достаточно для установки тензодатчиков

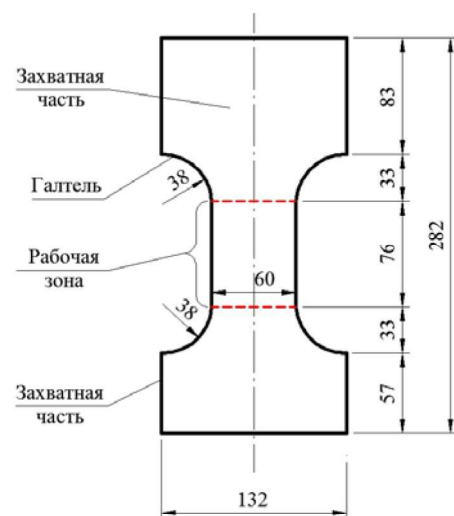


Рис. 4. Форма образца dog-bone

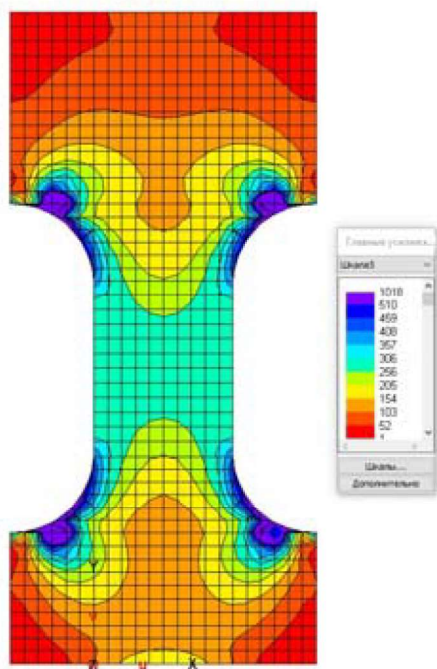


Рис. 5. Изополя эквивалентных напряжений

с базой 20–30 мм и получения достоверных результатов при испытаниях.

#### Изготовление образцов

Проверка работоспособности формы проведена при выполнении работ по укладке асфальтобетонной смеси марки М-1 С гранитным заполнителем, вяжущим БНД-60/90 с применением катка HD75 весом 75 кН (рис. 6).

Форму предварительно смазывали отработанным машинным маслом для устранения приклеивания смеси к ее стенкам.



Рис. 6. Уплотняющая техника

На основание из известнякового щебня укладывался выравнивающий слой из асфальтобетонной смеси толщиной 2–3 см. Затем на нее устанавливалась форма и нижний вкладыш (рис. 7, а). Далее форма заполнялась смесью до верхних кромок (рис. 7, б) и закрывалась верхним вкладышем. После этого асфальтобетонная смесь была досыпана до уровня проектной поверхности и начато ее уплотнение.

Уплотнение смеси проведено с помощью катка за 9 проходов, 7 последних из которых выполнены с вибрацией. Дополнительное поверхностное уплотнение асфальтобетона проведено с помощью ручной виброплощадки массой 88 кг. Работы выполнялись при температуре смеси 130 °С и температуре наружного воздуха 22 °С. Вырезание фрагмента и выемка образца проведены через сутки.

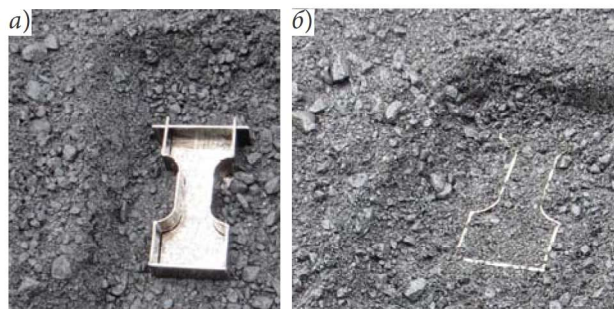


Рис. 7. Установка формы в смеси

Выемка образца проведена без затруднений, форма не имела признаков повреждений.

Кроме того, была изготовлена партия образцов из 5 штук, где прессование выполнено ударной нагрузкой с последующим уплотнением ручной виброплощадкой весом 88 кг (рис. 8).

#### Испытание образцов

Для проведения испытаний была изготовлена специальная оснастка захвата, схема которой показана на рис. 9.

Между стержнем захватов и поверхностью галтелей устанавливались подкладки,

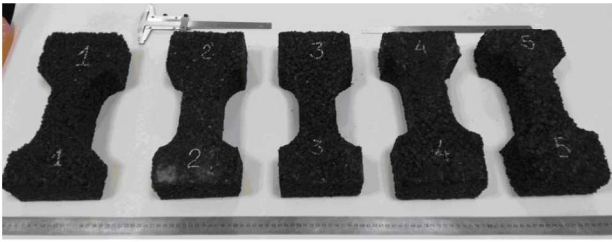


Рис. 8. Партия образцов

изготовленные из той же трубы, которая использовалась для криволинейных участков формы. Это обеспечило их плотное прилегание и более равномерное давление на галтели. Испытания проводились на разрывной машине Р-5 с максимальной нагрузкой 5 тс, оборудованной шарнирами Гука, что обеспечивало самоцентрирование нагрузки.

У всех испытанных образцов разрушение наступило в рабочей зоне. В одном из пяти образцов ударного уплотнения область разрушения касалась линии сопряжения рабочей зоны и начала галтели, но разрушение начиналось в области однородного напряженного состояния, поэтому результат испытания может считаться зачетным (рис. 10).

#### Результаты испытаний и выводы

На основании обзора применяемых форм образцов асфальтобетона на прямое одноосное растяжение и анализа их особенностей обоснован выбор плоского образца формы типа *dog-bone*. По картине НДС образца под нагрузкой, полученной на основании конечно-элементной модели, подтверждены размеры формы.

Изготовленная форма испытана в условиях производства асфальтобетонного покрытия, результаты подтвердили работоспособность как самой рамки, так и технологии изготовления образца.

Проведенные лабораторные испытания показали соответствие характера разрушения образцов ожидаемому.

Так как при испытаниях разрушению не подверглась захватная часть меньшего размера, то для минимизации размера образцов

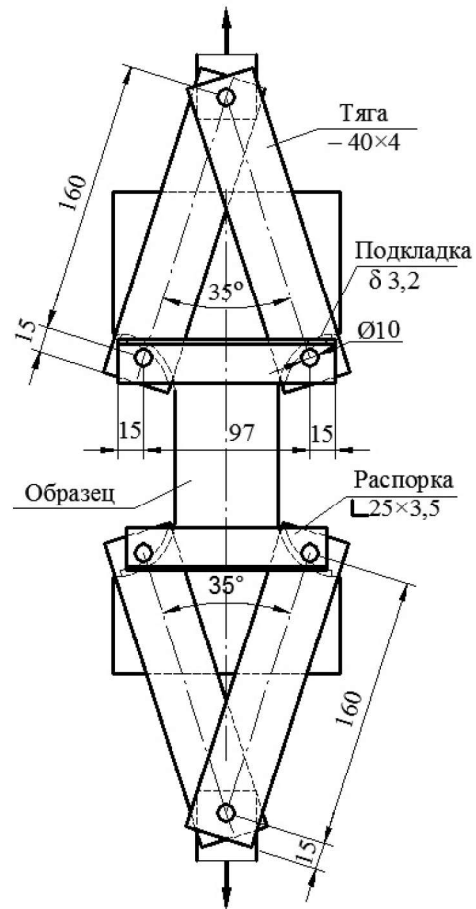


Рис. 9. Схема захватов



Рис. 10. Разрушенные образцы



можно ограничиться длиной обеих захватных зон 57 мм.

Разработанная форма имеет ресурс усовершенствования с целью минимизации размеров за счет допустимого уменьшения ширины захватных частей, которое может быть обосновано численным моделированием с учетом нелинейной работы материала и односторонних связей [19, 20].

Для дальнейших исследований необходимо иметь данные о механических характеристиках асфальтобетона при сжатии и растяжении в условиях однородного напряженного состояния, что может быть получено только на основании эксперимента.

Авторы выражают благодарность коллективам ООО «КМ-Строй» и ООО «СК Базис» за сотрудничество и помощь в изготовлении образцов в производственных условиях.

#### Библиографический список

1. Ширунов Г. Н., Сарвилин Д. А. Величина максимальных растягивающих напряжений в стандартном балочном асфальтобетонном образце при трехточечном изгибе // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 1 (102). С. 30–36.
2. Дровалева О. В. Лабораторные режимы усталостных испытаний асфальтобетона с учетом эксплуатационных условий работы материала в покрытии // Вестник ТГАСУ. 2009. № 1. С. 159–68.
3. Ермилов А. А., Алексигов С. В. Однородность виброуплотнения асфальтобетонных покрытий при ремонте городских дорог // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2014. 35 (54). С. 171–76.
4. Алексигов С. В., Ермилов А. А. Сравнительная оценка однородности уплотнения асфальтобетонных покрытий городских дорог при различных режимах работы катков // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2014. № 1 (33). С. 45–53.
5. Hafiang Wen. Fatigue performance evaluation of westrack asphalt mixtures based on viscoelastic analysis of indirect tensile test. Department of civil engineering Raleigh, North Carolina. 2001. 157 p.
6. Erkens S. M. J. G., Poot M. R. Additional compression tests. Asphalt Concrete response (ACRe). 2000. URL: [https://www.researchgate.net/publication/280564793additional\\_compression\\_tests](https://www.researchgate.net/publication/280564793additional_compression_tests) (дата обращения: 22.03.2024).
7. Uzan, Jacob. Uniaxial Tension Fatigue Test of Asphalt Concrete-An Improved Framework // ASTM, 2022. Vol. 50, Iss. 5. URL: <https://www.astm.org/jte20220048.html> (дата обращения: 11.01.2024).
8. Lal N. B. Two Dimensional Stress-Strain Relationships of a Fine Asphalt-Aggregate System. July, 1965, № 12. URL: <http://www.archive.org/details/twodimensionalst00Laln> (дата обращения: 17.03.2024).
9. Qian G, Yang H, Li X, Yu H, Gong X. and Zhou H. A Unified Strength Model of Asphalt Mixture Considering Temperature Effect. // *Front. Mater.* 2021. 8:754187. DOI 10.3389/fmats. 2021.754187.
10. Chehab G., Q'Quinn E. N., and Kim Y. R. Specimen Geometry Study for Direct Tension Test Based on Mechanical Tests and Air Void Variation in Asphalt Concrete Specimens Compacted by Superpave Gyrotory Compactor. Transportation Research Record, TRB. 2000. № 1723. Pp. 125–132.
11. Braham A. F., Underwood B. S. (eds.). State of the art and practice in fatigue cracking and evaluation of asphalt pavements, Association of Asphalt Paving Technologists, Version 1.0 // Lino Lakes, MN. 2016. URL: [http://www.andrewbraham.com/AAPT\\_Fatigue\\_2016.pdf](http://www.andrewbraham.com/AAPT_Fatigue_2016.pdf) (дата обращения: 11.01.2024).
12. Pell P. S., Brown S. F. The Characteristics of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures. Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Michigan, USA. 1972. Pp. 326–342.
13. Pell P. S., Cooper K. E. The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1975. Vol. 44. Pp. 1–37.
14. Gudipudi P. P., Underwood B. S. Development of Modulus and Fatigue Test Protocol for Fine Aggregate Matrix for Axial Direction of Loading // ASCE Journal of Testing and Evaluation. 2016. Vol. 45. № 2. 38 p.
15. Erkens S. M. J. G., Poot M. R. The uniaxial tension test. Asphalt Concrete Response (ACRe). 2001. 101 p.
16. Левашов Г. М., Сиротюк В. В. Об определении предела прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе // Вестник СибАДИ. 2011. №4 (22). С. 23–26.
17. Mier J. G. M. van. Fracture processes of concrete: assesment of material parameters for fracture models, CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo. 1997. 448 p.
18. Zeiada W. A., Kaloush K. E., Underwood B. S. and Mamlouk M. S. Development of Test Protocol to Measure Axial Fatigue Damage and Healing // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, In Press. 2016. Vol. 2576. Pp. 10–18.
19. Игнатъев А. В., Бочков М. И., Курочкина И. В. Сравнительный анализ эффективности некоторых алгоритмов расчета систем с односторонними связями // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 11 (731). С. 87–98.

20. Пеклов П. Н. Анализ динамических реакций стержневых систем консольного типа при сейсмическом воздействии // Военный инженер. 2019. № 1 (11). С. 21–27.

## References

- Shirunov G. N., Sarvilin D. A. *Velichina maksimal'nykh rastyagivayushchikh napryazheniy v standartnom balochnom asfal'tobetonnom obraztse pri trekhtochnom izgibe* [The value of maximum tensile stresses in a standard beam asphalt-concrete sample in three-point bending]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 1 (102), pp. 30–36.
- Drovalova O. V. *Laboratornye rezhimy ustalostnykh ispytaniy asfal'tobetona s uchedom ekspluatatsionnykh usloviy raboty materiala v pokrytii* [Laboratory modes of asphalt concrete fatigue tests taking into account the operational conditions of the material used in the pavement]. *Vestnik TGASU – Bulletin of TGASU*, 2009, no. 1, pp. 159–68.
- Ermilov A. A., Aleksikov S. V. *Odnorodnost' vibrouplotneniya asfal'tobetonnykh pokrytiy pri remonte gorodskikh dorog* [Homogeneity of vibro-compaction of asphalt-concrete pavements at repair works of city roads]. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of VolgGASU. Series: Construction and Architecture*, 2014, no. 35 (54), pp. 171–76.
- Aleksikov S. V., Ermilov A. A. *Sravnitel'naya otsenka odnorodnosti uplotneniya asfal'tobetonnykh pokrytiy gorodskikh dorog pri razlichnykh rezhimakh raboty katkov* [Comparative assessment of homogeneity of compaction of asphalt concrete pavements of urban roads at different modes of roller operation]. *Nauchniy vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura – Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2014, no. 1 (33), pp. 45–53.
- Hafiang Wen. *Fatigue performance evaluation of westrack asphalt mixtures based on viscoelastic analysis of indirect tensile test*. Department of civil engineering Raleigh, North Carolina, 2001, 157 p.
- Erkens S. M. J. G., Poot M. R. Additional compression tests. *Asphalt Concrete esponse (ACRe)*. 2000. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/280564793additional\\_compression\\_tests](https://www.researchgate.net/publication/280564793additional_compression_tests) (accessed: 22.03.2024).
- Uzan Jacob. Uniaxial tension fatigue test of asphalt concrete-an improved framework. *ASTM*, 2022. Vol. 50, iss. 5. Available at: <https://www.astm.org/jte20220048.html> (accessed: 11.01.2024).
- Lal N. B. Two dimensional stress-strain relationships of a fine asphalt-aggregate system. July, 1965, no. 12. Available at: <http://www.archive.org/details/twodimensionalst00Lal> (accessed: 17.03.2024).
- Qian G, Yang H, Li X, Yu H, Gong X. and Zhou H. A Unified strength model of asphalt mixture considering temperature effect. *Front. Mater.*, 2021. 8:754187. DOI 10.3389/fmats.2021.754187.
- Chehab G, Q'Quinn E. N., and Kim Y. R. Specimen geometry study for direct tension test based on mechanical tests and air void variation in asphalt concrete specimens compacted by super-pave gyratory compactor. *Transportation Research Record, TRB*, 2000, no. 1723, pp. 125–132.
- Braham A. F., Underwood B.S. (eds.). State of the art and practice in fatigue cracking and evaluation of asphalt pavements. Association of Asphalt Paving Technologists, Version 1.0. Lino Lakes, MN, 2016. Available at: [http://www.andrewbraham.com/AAPT\\_Fatigue\\_2016.pdf](http://www.andrewbraham.com/AAPT_Fatigue_2016.pdf) (accessed: 11.01.2024).
- Pell P. S., Brown S. F. The characteristics of materials for the design of flexible pavement structures. *Proceedings of the Third International conference on the structural design of asphalt pavements*, Michigan, USA, 1972, pp. 326–342.
- Pell P. S., Cooper K. E. The effect of testing and mix variables on the fatigue performance of bituminous materials. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1975, vol. 44, pp. 1–37.
- Gudipudi P. P., Underwood B. S. Development of modulus and fatigue test protocol for fine aggregate matrix for axial direction of loading. *ASCE Journal of Testing and Evaluation*, 2016, vol. 45, no. 2, 38 p.
- Erkens S. M. J. G., Poot M. R. *The uniaxial tension test. asphalt concrete response (ACRe)*. 2001, 101 p.
- Levashov G. M., Sirotyuk V. V. *Ob opredelenii predela prochnosti asfal'tobetona na rastyazhenie pri izgibe* [About determination of asphalt concrete tensile strength limit at bending]. *Vestnik SibADI – Bulletin of SibADI*, 2011, no. 4 (22), pp. 23–26.
- Mier J. G. M. van. *Fracture processes of concrete: assessment of material parameters for fracture models*. CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo, 1997, 448 p.
- Zeida W. A., Kaloush K. E., Underwood B. S., Mamlouk M. S. Development of test protocol to measure axial fatigue damage and healing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, in Press. 2016, vol. 2576, pp. 10–18.
- Ignat'ev A. V., Bochkov M. I., Kurochkina I. V. *Sravnitel'niy analiz effektivnosti nekotorykh algoritmov raschyota sistem s odnostoronnimi svyaziyami* [Comparative analysis of efficiency of some algorithms for calculation of systems with one-sided links]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – Bulletin of Higher Schools. Construction*, 2019, no. 11 (731), pp. 87–98.
- Peklov P. N. *Analiz dinamicheskikh reaktsiy sterzhnevyykh sistem konsol'nogo tipa pri seysmicheskoy vozddeystvii* [Analyses of dynamic reactions of cantilever-type rod systems under seismic action]. *Voenniy inzhener – Military Engineer*, 2019, no. 1 (11), pp. 21–27.