

Сергей Егорович КРАВЧЕНКО,
кандидат технических наук,
директор республиканского
дочернего унитарного
предприятия
"Белорусский дорожный
научно-исследовательский
институт "БелдорНИИ"

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА

FATIGUE FRACTURE OF ASPHALT CONCRETE

В статье рассмотрены понятия и принципы теории усталостного разрушения применительно к дорожно-строительным материалам при условии учета в их составе включений различной величины, формы и ориентации. Это позволяет значительно повысить достоверность результатов обработки испытаний. Определен механизм разрушения и критерий повреждаемости асфальтобетона при жестком режиме испытания, основанный на анализе соотношения упругой и пластической деформаций по мере возрастания количества циклов нагружения.

The concepts and principles of the theory of failure due to fatigue have been considered in this article with reference to road-building materials, provided that the inclusions of various size, shape and orientation have been taken into account. This allows improving considerably the reliability of the test outcomes. The failure mechanism and damage criterion of asphalt concrete has been determined under severe test conditions and based on the analysis of elastic-plastic strain relationship depending on the increasing number of load cycles.

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь на автомобильный транспорт приходится более 80 % общего объема грузоперевозок, при этом наиболее интенсивно эксплуатируются дороги республиканского значения, которые обеспечивают 70 % всех грузовых перевозок автотранспортом. Интенсивность движения транспорта на автомобильных дорогах ежегодно увеличивается, растут средние скорости движения автомобилей и нагрузки на ось. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых подходов для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных характеристик дорожных покрытий.

В нашей стране наиболее распространенным материалом покрытий является асфальтобетон, обладающий высокой прочностью, деформативностью, хорошим сцеплением с шинами автомобилей и рядом других полезных качеств. Однако физико-механические и реологические характеристики асфальтобетона существенно изменяются в процессе эксплуатации, что вызывает преждевременное его разрушение. Одной из причин этого является низкая усталостная прочность асфальтобетона. Отсутствие единого подхода к ее оценке требует дальнейших исследований механизма усталостного разрушения асфальтобетона, разработки методики определения критерия повреждаемости и срока службы асфальтобетонного покрытия. Решение указанных вопросов позволит на основе расчета накопления усталостных повреждений подбирать состав асфальтобетона требуемой усталостной прочности и прогнозировать его усталостную долговечность при различных условиях эксплуатации.

ОСОБЕННОСТИ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Понятия и принципы, заложенные в теорию усталостного разрушения для металлов и полимерных материалов, могут быть применены и для дорожно-строительных материалов [1, 2]. Однако следует учитывать тот факт, что материалы, применяемые для устройства дорожных покрытий, существенно отличаются от таких материалов, как сталь или сплавы различных металлов, наличием в них включений различной величины, формы и ориентации. Поэтому результаты их испытаний могут иметь значительно больший разброс, чем результаты, полученные для металлов. Вопросам усталостной прочности и усталостного разрушения асфальтобетона посвящены работы многих исследователей: А. О. Салля, Б. С. Радовского, А. В. Руденского, С. К. Илиополова, Е. В. Угловой, Г. С. Бахраха и др. [3–6].

Под усталостным разрушением понимается процесс постепенного накопления необратимых механических изменений в материале, проявляющийся в изменении его структуры и свойств при приложении циклических нагрузок. Этот процесс сопровождается постепенным развитием трещин от однородных либо неоднородных циклических напряжений. Причиной такого разрушения можно считать результат повторных упруго-пластических деформаций. Однако следует отметить, что разрушение от повторных упруго-пластических деформаций происходит лишь при макроскопических напряжениях, превышающих предел упругости, в то время как усталостное разрушение может иметь место при значительно меньших напряжениях, чем предел упругости. Кроме

того, повторные упруго-пластические деформации развиваются в объемах, сопоставимых с объемом самого тела. Напротив, усталостные повреждения на первой стадии усталостного разрушения носят микроскопический и субмикроскопический характер, локализируются по площадкам сдвига, имеющим дефекты, обусловленные слабой адгезионной связью [6].

Разрушению в результате повторных упруго-пластических деформаций предшествует число циклов нагружения порядка $10 \div 10^4$. В то же время число циклов, предшествующих усталостному разрушению, обычно превышает 10^4 . Однако четкую границу между двумя типами разрушений установить довольно сложно.

Сопротивление материалов циклическому упруго-пластическому и усталостному деформированию существенно зависит от характера нагружения. Используются, как правило, два основных вида нагружения: мягкое и жесткое. При первом типе нагружения в процессе циклического деформирования постоянной сохраняется амплитуда напряжения, при втором — амплитуда деформаций.

При мягком нагружении циклически разупрочняющихся или стабильных материалов накапливаются пластические деформации, которые могут привести к двум типам разрушения: квазистатическому и усталостному. Квазистатическое разрушение связано с возрастанием остаточных деформаций до уровня, соответствующего разрушению при однократном статическом нагружении. Разрушение усталостного характера связано с накоплением повреждений, образованием прогрессирующих трещин при деформациях существенно меньших пластических. Возможны и промежуточные формы разрушения, когда образуются трещины усталости на фоне заметных пластических деформаций.

При жестком нагружении нет накопления деформаций, что исключает возможность квазистатического разрушения. В этом случае все разупрочняющиеся материалы, а к ним относится и асфальтобетон, разрушаются по усталостному типу с образованием трещин. В результате механических и температурных воздействий, наличия примеси кристаллическая сетка может иметь искажения, проявляющиеся в виде линий скольжения, которые служат причиной образования дислокаций. По мере повторных нагружений количество дислокаций в единице объема тела (плотность дислокаций) увеличивается. При некоторой плотности дислокаций и их определенном взаимном расположении они могут объединяться, образуя полосы скольжения и субмикроскопические трещины. Слияние субмикроскопических трещин образует микро- и макроскопические трещины. Принято считать, что на этом заканчивается первая стадия усталостного разрушения, на которую затрачивается примерно 60 %–90 % циклов нагружения.

На второй стадии прогрессирует образование макротрещин. На эту стадию затрачивается гораздо меньше циклов [1].

МОДЕЛЬ ИСПЫТАНИЯ

При выборе модели испытания учитывалась математическая модель деформирования композиционных материалов на полимерной матрице в условиях гармонического нагружения [7] и модель напряженно-деформированного состояния асфальтобетона [8]. Для численного описания (моделирования) процесса испыта-

ния образец представлен как балка, закрепленная на двух жестких опорах. Принята гипотеза об отсутствии давления продольных слоев (волокон) балки друг на друга и гипотеза плоских сечений. Касательные напряжения от поперечных сил в расчете не учитываются. Балка, изготовленная из асфальтобетона в форме параллелепипеда, подвергается кинематическому воздействию — периодически изгибается с фиксированным прогибом, равным $V_0 = 1$ мм, — режим жесткого нагружения (рис. 1).

На каждом цикле испытания фиксируется значение силы, требуемой для обеспечения заданного прогиба образца. Период пульсирующей нагрузки постоянен и не зависит от количества выполненных циклов. Образец в таких условиях испытывает неоднородное циклическое нагружение, так как при различных циклах величина максимальной силы меняется (рис. 2).

При определении напряженно-деформированного состояния модели образца использованы два условия — статическое и кинематическое.

Статическое условие состоит в том, что распределение нормальных напряжений по высоте во всех отмеченных сечениях образца должно быть таким, чтобы обеспечить условие равновесия — внутренний момент должен быть равен внешнему моменту с учетом возможности появления зон пластических деформаций. Рассмотрены четыре случая распределения нормальных напряжений по высоте сечения образца (рис. 3).

Очевидно, что согласно принятым условиям, напряжения ограничены величиной σ_{cr} . Поэтому равновесие (равенство внутреннего и внешнего моментов) в каждом сечении обеспечивается размером упругой части

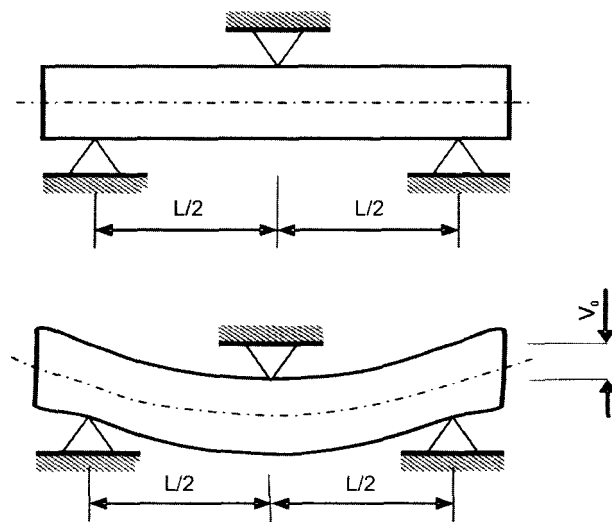


Рис. 1. Расчетная схема балки

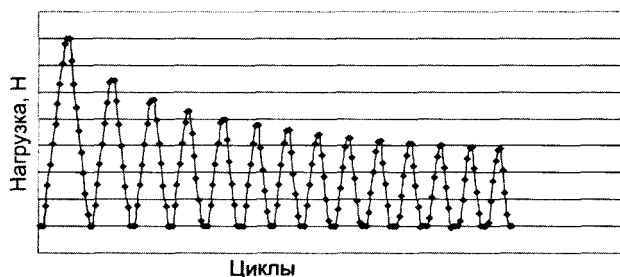
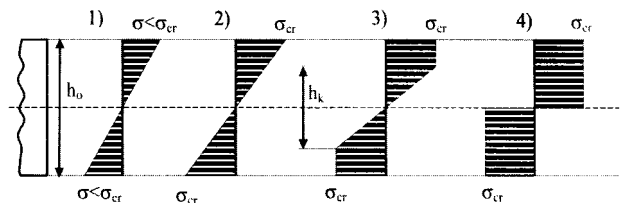


Рис. 2. Цикловые значения максимальной силы при жестком режиме нагружения

образца h_k . Для каждого случая распределения напряжений в сечении (см. рис. 3) высота упругой части образца h_k для каждого сечения вычисляется из условий:

$$\begin{aligned} & \text{— для сечений 1 и 2 } h_k = h_0, \quad \text{если } M_x \leq \frac{\sigma_{cr} \cdot b h_0^2}{6}, \\ & \text{— для сечения 3 } h_k = \sqrt{3 h_0^2 - \frac{12 M_x}{\sigma_{cr} \cdot b}}, \quad \text{если } \frac{\sigma_{cr} \cdot b h_0^2}{6} < M_x \leq \frac{\sigma_{cr} \cdot b h_0^2}{4}, \\ & \text{— для сечения 4 } h_k = 0 \text{ или малое число, если } M_x > \frac{\sigma_{cr} \cdot b h_0^2}{4}, \end{aligned} \quad (1)$$

где M_x — внутренний изгибающий момент в рассматриваемом сечении;
 σ_{cr} — напряжение на границе между упругой и пластической частями образца;
 h_0 — толщина образца;
 b — ширина образца.



h_0 — толщина образца; h_k — высота упругой части образца;
 σ_{cr} — напряжение на границе между упругой и пластической частями образца; b — ширина образца

Рис. 3. Распределение нормальных напряжений по высоте сечения образца

Кинематическое условие состоит в том, что прогиб образца в его средней точке во всех циклах испытания должен быть равен заданной величине полной деформации V_0

$$V_k = V_0, \quad (2)$$

где V_k — прогиб образца на k -м цикле испытания.

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦА АСФАЛЬТОБЕТОНА. КРИТЕРИЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Анализ диаграммы “ $F - \Delta l$ ”, полученной для каждого цикла испытания (рис. 4), показывает, что при нагружении образца в пределах одного цикла зависимость между силой F и деформацией Δl имеет четко выраженный нелинейный характер, обусловленный наличием в образце пластических деформаций. Разгрузка образца происходит по закону, близкому к линейному, что обусловлено исчезновением упругой деформации, складывающейся из мгновенно упругой деформации и части упругой деформации, образующейся вследствие проявления материалом свойств ретардации. В сумме упругие деформации составляют часть полной деформации V_0 , заданной по условию испытания образца.

С ростом номера цикла начало диаграммы “ $F - \Delta l$ ” все в большей мере смещается вправо, то есть происходит процесс последовательного накопления пластических деформаций в образце. Однако по мере увеличения номера цикла прирост пластических деформаций уменьшается, то есть накопление пластических деформаций происходит по затухающему закону.

Как показали результаты испытаний и расчеты по программе *ROTOR*, с каждым последующим циклом при выполнении условий (1) и (2) граничное напряжение σ_{cr} уменьшается. Это происходит потому, что с каждым очередным циклом испытания в части образца, имеющей пластические деформации, происходит разрушение какой-то доли этой части (рис. 5). Поэтому граничное напряжение не является истинно пределом текучести σ_y , а лишь приведенной величиной, отражающей сам предел текучести и размер части образца, получившей повреждение. Таким образом, имея закон изменения граничного напряжения σ_{cr} , можно дать оценку накопления повреждений образца по мере увеличения количества циклов.

Можно предположить, что на k -м цикле нагружения действительный предел текучести σ_y будет таким же, как и на первом цикле нагружения. Результаты расчета на k -м цикле отнесем к результатам расчета на 1-м цикле нагружения. Тогда условно примем, что $\sigma_y = \sigma_{cr1}$. Но за счет накопленных повреждений к k -му циклу значение σ_{crk} будет меньше, чем на первом цикле σ_{cr1} . По условию равенства площадей имеем уравнение

$$\sigma_{crk} \cdot S_1 = \sigma_{cr1} \cdot S_k. \quad (3)$$

где σ_{cr1} — граничное напряжение на первом цикле испытания;

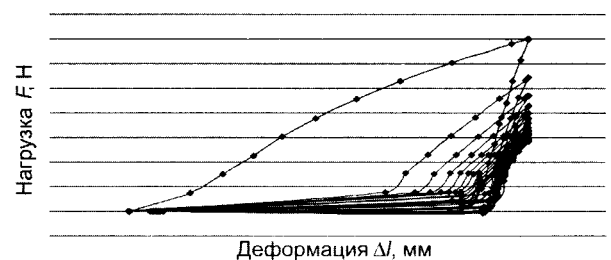


Рис. 4. Соотношение упругой и пластической деформаций при жестком режиме нагружения

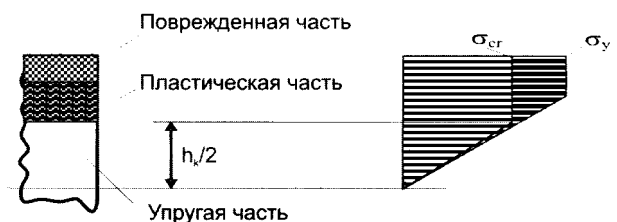


Рис. 5. Схема образования пластической и поврежденной частей образца

σ_{crk} — граничное напряжение на k -м цикле испытания;

S_1 — площадь зоны пластической деформации на первом цикле нагружения;

S_k — площадь зоны пластической деформации на k -м цикле нагружения.

Из уравнения (3) получим:

$$S_k = \frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{cr1}} \cdot S_1. \quad (4)$$

Тогда, учитывая, что размер поврежденной части равен $S_x = S_1 - S_k$, имеем:

$$S_x = S_1 - S_k = S_1 - \frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{cr1}} \cdot S_1 = S_1 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{cr1}}\right). \quad (5)$$

Учитывая, что ширина сечения образца одинаковая на k -м цикле нагружения, получим:

$$S_x = (h_0 - h_k) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{cr1}}\right). \quad (6)$$

Для перехода к относительной величине оценки повреждения образца отнесем размер поврежденной части S_x образца к его толщине h_0

$$D = \frac{(h_0 - h_k)}{h_0} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{cr1}}\right) \cdot 100, \quad (7)$$

где D — базовая усталостная повреждаемость асфальтобетона, %;

h_k — высота упругой части образца на k -м цикле испытаний.

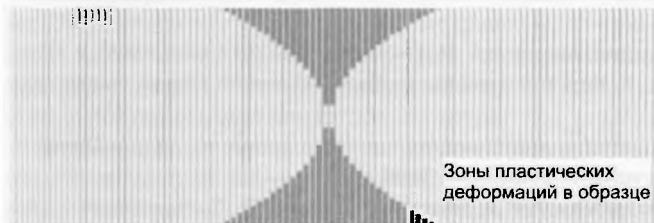


Рис. 6. Схема распределения пластических деформаций в асфальтобетонном образце при испытании на усталость

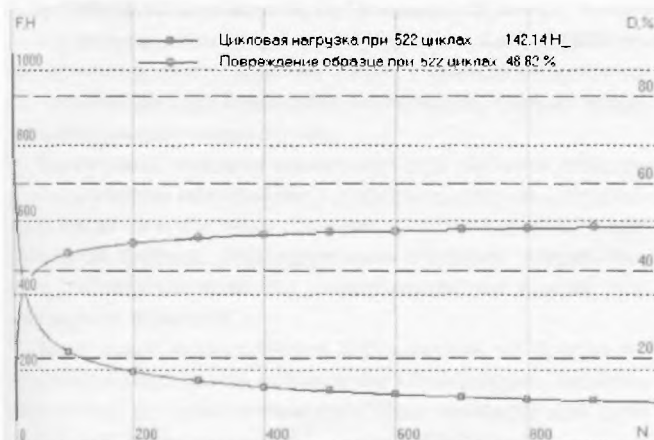


Рис. 7. Графики изменения цикловой нагрузки и процента повреждения образца асфальтобетона при испытании на усталость

Параметр D является критерием, определяющим уровень повреждаемости асфальтобетонного образца.

На рис. 6 и 7 приведены результаты моделирования процесса испытания асфальтобетонного образца на усталость при жестком условии нагружения. Очевидно, что зона пластических деформаций и повреждений материала расположена в средней части образца и имеет форму призмы с криволинейными гранями (см. рис. 6). По мере увеличения количества циклов нагружения цикловая нагрузка уменьшается по нелинейной гиперболично подобной зависимости (см. рис. 7). Увеличение количества циклов приводит к увеличению поврежденной части образца (см. рис. 7). Зависимость имеет нелинейный характер и затухает с увеличением количества циклов нагружений, стремясь к некоторому пределу.

На основе полученных результатов и проведенного выше их анализа предлагается следующий механизм усталостного разрушения образца из асфальтобетона, подвергнутого испытанию на пульсирующий изгиб при заданных статическом и кинематическом условиях. При нагружении образца в нем появляются упругие и пластические деформации. При этом часть пластических деформаций после разгрузки восстанавливается за счет упругого последствия, а часть — трансформируется и приводит к повреждению образца. При этом по мере увеличения номера цикла пластическая часть деформации уменьшается. Следовательно, уменьшается и прирост повреждений образца. Примем объем образца равным единице. Тогда, если последовательность накопленных повреждений стремится к единице, то это означает, что образец не способен воспринимать прикладываемую к нему циклическую нагрузку и разрушится на каком-то цикле испытания. Напротив, если последовательность накопленных повреждений стремится к пределу, меньшему чем единица, то образец способен выдерживать любое число циклов заданного режима испытания. При разрушении образца от циклического нагружения он будет терять всякую способность сопротивляться кинематическому воздействию, что проявится на диаграмме снижением цикловой нагрузки до нуля. Если образец выдерживает заданный режим нагружения, то он будет сохранять способность сопротивляться кинематическому воздействию и цикловая сила при любом, сколь угодно большом количестве циклов не станет равной нулю.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПО КРИТЕРИЮ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

В качестве объекта исследований был выбран асфальтобетон типа ЩМС_с-10 следующего состава: щебень — 67,0 %; песок из отсева дробления — 11,0 %; песок природный — 11,0 %; минеральный порошок — 11,0 %; битум — 6,5 %; целлюлозное волокно "VIATOP" — 0,3 %. Из данной смеси было устроено экспериментальное покрытие на участке автомобильной дороги Р-23 Минск — Микашевичи км 12,0 — км 12,1. Анализ интенсивности движения показал, что на данном участке автомобильной дороги Р-23 за предыдущие 5 лет интенсивность движения увеличилась примерно на 1000 автомобилей в сутки и суммарно соответствует интенсивности движения для первой категории дороги. В процессе устройства покрытия и его эксплуатации проводились испытания асфальтобетонной смеси на

стадии ее производства на асфальтобетонном заводе и асфальтобетона — по окончании устройства покрытия, а также после 1 месяца и 1 года его эксплуатации. При этом определялись: плотность, водонасыщение, набухание, предел прочности на сжатие при температуре 50 °С, модуль остаточной деформации при температуре 50 °С.

Результаты испытания подтвердили, что все нормируемые показатели качества асфальтобетона соответствуют нормативным требованиям, а также, что значения показателей изменились незначительно и соответствуют нормативным требованиям после 1 месяца и 1 года эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Параллельно в лаборатории испытывались балки ненарушенной структуры размерами 40х40х160 мм на усталостную прочность методом растяжения при изгибе. По результатам испытаний асфальтобетона из устроенного покрытия по изложенной выше методике определялась усталостная повреждаемость — она составила 37 %. Полученное значение усталостной повреждаемости является базовым для данного состава смеси. Усталостная повреждаемость, измеренная после года эксплуатации асфальтобетонного покрытия, составила 41 %.

Используя гипотезу суммирования накопления повреждаемости в материале, автор полагает, что разность усталостной повреждаемости через год эксплуатации покрытия D_1 , %, и базовой усталостной повреждаемости D , %, определяет усталостную повреждаемость за год эксплуатации. В соответствии с этим остаточный срок службы покрытия T рассчитывается по формуле

$$T = \frac{100\% - D}{D_1 - D} \cdot t_{\text{эк}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{эк}}$ — продолжительность эксплуатации асфальтобетонного покрытия, годы.

В рассмотренном случае срок службы асфальтобетонного покрытия из смеси типа ЩМС_ц-10 составил более 14 лет, что удовлетворяет требованиям нормативных документов по срокам службы для дороги первой категории.

ВЫВОДЫ

- 1 Понятия и принципы теории усталостного разрушения для металлов и полимерных материалов могут быть применены и для дорожно-строительных материалов при условии учета в их составе включений разной величины, формы и ориентации, что позволит значительно повысить достоверность при обработке результатов испытаний.
- 2 В результате исследований определен механизм разрушения и критерий повреждаемости асфальтобетона при жестком режиме нагружения, основанный на анализе соотношений упругой и пластической деформаций с учетом номера цикла нагружения, часть последней из которых после разгрузки восстанавливается за счет упругого последдействия, а часть — трансформируется и переходит в повреждение образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терентьев, В. Ф. Усталость металлических материалов / В. Ф. Терентьев; отв. ред. Н. П. Лякишев. — М.: Наука, 2002. — 248 с.: ил.
2. Гольдман, А. Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов / А. Я. Гольдман. — Л.: Химия, 1988. — 272 с.
3. Физика полимеров / Г. М. Бартенев, С. Я. Френель; под ред. докт. физ.-мат. наук А. М. Ельяшевича. — Л.: Химия, 1990. — 432 с.
4. Исследование усталости асфальтобетона / А. В. Руденский, Т. Н. Калашникова // Дорожно-строительные материалы: тр. ГипродорНИИ. — 1973. — Вып. 7. — С. 3–13.
5. Бахрах, Г. С. Усталостное разрушение асфальтобетонных покрытий и пути замедления этого процесса / Г. С. Бахрах // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог. — М.: Экспресс-информация, 1980. — 40 с.
6. Радовский, Б. С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд / Б. С. Радовский. — К.: Полиграф Консалтинг, 2003. — 240 с.
7. Черноус, Д. А. Математическая модель деформирования композиционных материалов на полимерной матрице в условиях гармонического нагружения / Д. А. Черноус, С. В. Шилько, С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. — 2009. — № 1. — С. 49–55.
8. Кравченко, С. Е. К вопросу о теоретической и экспериментальной оценке структурной устойчивости асфальтобетона / С. Е. Кравченко, Д. Л. Сериков // Строительная наука и техника. — 2009. — № 3. — С. 35–40.

Статья поступила в редакцию 02.09.2009.