

УДК 625.855.3.033

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОГО СРОКА СЛУЖБЫ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УЧЕТА УСТАЛОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

*FORECAST OF ESTIMATED SERVICE
LIFE AND REMAINING LIFE
OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS
ACCOUNTING FOR FATIGUE PHENOMENA*

В статье рассмотрены теоретические основы прогнозирования расчетного срока службы, остаточного ресурса асфальтобетонных покрытий на основе учета усталостных явлений, а также методы определения усталостной повреждаемости.

The article deals with the theory of forecasting estimated service life, remaining life of asphalt concrete pavements accounting for fatigue phenomena, including methods for determination of fatigue defects probability.

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь на автомобильный транспорт приходится более 80% общего объема грузоперевозок различными видами транспорта, при этом наиболее напряженно эксплуатируются дороги республиканского значения, которые обеспечивают 70% всех грузовых перевозок автотранспортом. Интенсивность движения автомобильного транспорта на автомобильных дорогах, его грузонапряженность, средняя скорость движения и количество транспортных средств постоянно растут, значительно опережая темпы строительства автомобильных дорог с покрытиями капитального типа. Проблема строительства и содержания автомобильных дорог, обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных характеристик покрытий в условиях ограниченного финансирования выдвигает все новые требования к научному обоснованию надежности и долговечности автомобильных дорог, рациональному

использованию финансовых и материальных ресурсов. Соответственно, важнейшей задачей при этом является получение достоверной информации о состоянии покрытия автомобильных дорог в процессе их диагностики.

Многочисленные исследования транспортно-эксплуатационных и прочностных свойств асфальтобетонных покрытий свидетельствуют об имеющем место преждевременном их разрушении из-за недостаточной долговечности асфальтобетона, определяемой в первую очередь его низкой усталостной прочностью. В этой связи возникает необходимость в создании методик, позволяющих прогнозировать характер и степень разрушения асфальтобетона с учетом его усталостных свойств и определять расчетный срок службы вновь устраиваемых и остаточный ресурс эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий, что в итоге позволит обоснованно планировать сроки и затраты и, как следствие, снизить материальные, трудовые и энергетические затраты на ремонт и содержание асфальтобетонных покрытий.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСЧЕТНОГО СРОКА СЛУЖБЫ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УЧЕТА УСТАЛОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Разработка методики основывалась на известной гипотезе о суммировании усталостных повреждений [1], в соответствии с которой повреждение, вызываемое данным циклом нагружения, предполагается независимым от состояния конструкции в данный момент и от предшествующей

*С. Е. Кравченко,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» Белорусского национального технического университета,
г. Минск, Беларусь*

истории нагружения. Поэтому каждое новое повреждение суммируется с повреждением, вызванным предшествующими циклами, что позволяет определять течение и величину накопленного повреждения с начала процесса нагружения до заданной его величины. Данная гипотеза наиболее полно подтверждает понятия и принципы, заложенные в теорию усталостного разрушения для металлов и полимерных материалов. Однако с определенными допущениями она может быть применена и для дорожно-строительных материалов [2-4]. При этом следует учитывать, что материалы, используемые для устройства дорожных покрытий, существенно отличаются от таких мелкозернистых материалов, как стали или сплавы различных металлов, наличием в них включений различной величины, формы и ориентации, что не позволяет отнести их к так называемым квазиоднородным материалам. Поэтому результаты их испытаний могут иметь значительно больший разброс, чем результаты, полученные для металлов или полимерных материалов.

При разработке методики использованы теоретические и экспериментальные методы исследований, включающие математическое моделирование усталостной долговечности, метод математической теории планирования эксперимента, как наиболее эффективного для решения рецептурно-технологических задач, метод теории вероятностей и математической статистики при обработке результатов эксперимента. При исследовании усталостных свойств асфальтобетона учитывались технологический и масштабный факторы, форма, размеры и особенности изготовления образцов, а также условия их испытания, определяемые видом напряженно-деформированного состояния и режимом нагружения. Так, образцы асфальтобетона испытывались на усталость при циклическом динамическом изгибе в режиме жесткого и мягкого нагружения, что, на наш взгляд, и с учетом результатов проведенных ранее

исследований наиболее близко имитирует реальные условия работы материала покрытия в условиях воздействия на асфальтобетонное покрытие потока автомобилей.

По результатам испытаний строятся графические зависимости в виде диаграмм «усилие-перемещение» (рис. 1), по которым анализируется соотношение упругой и пластической деформаций. Очевидно, что часть диаграммы, соответствующая стадии нагружения, имеет четко выраженный криволинейный характер, что подтверждает наличие происходящих в образце пластических деформаций. В свою очередь, часть диаграммы, соответствующая стадии разгрузки, близка к прямой линии, что указывает на наличие при разгрузке только упругих деформаций и лишь в конечной своей части незначительно искривляется, что подтверждает восстановление

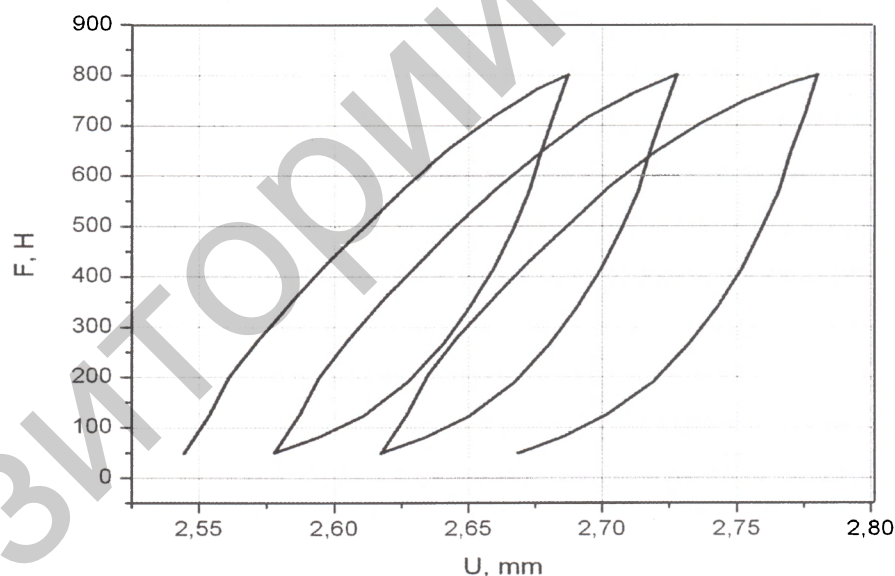


Рисунок 1 - Зависимость «усилие (Н) - перемещение (мм)» для n-ых циклов образца асфальтобетона на трехточечный изгиб

упругой деформации за счет проявления свойств ретардации, вследствие чего образец частично возвращает свои упругие свойства [5].

Отметим, что накопленные пластические деформации образца включают две составляющих деформации – это пластические деформации, вызванные нагружением в рассматриваемом цикле, и деформации, связанные с повреждением образца за счет предыдущих циклов. Таким образом, в расчете принимается схема, когда часть пластических деформаций, появившихся в предыду-

щих циклах, переходит в повреждения образца, снижающие сопротивление образца изгибу. При этом с каждым последующим циклом 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. 2). 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, используя закон изменения граничного напряжения σ_{cr} , можно дать оценку накопления повреждений образца по мере увеличения количества циклов.

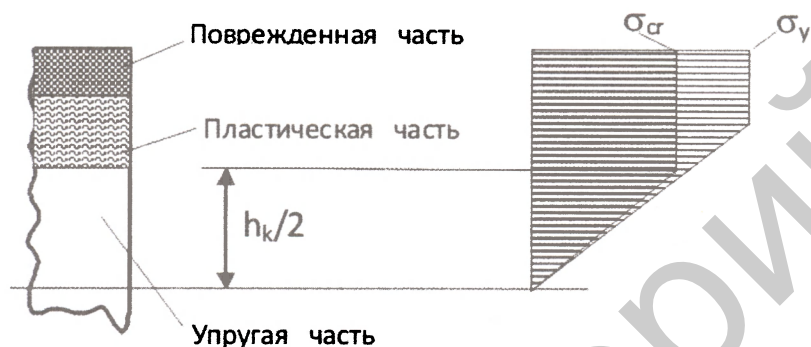


Рисунок 2 - Схема образования пластической и поврежденной частей образца

Площадь поврежденной части сечения и определяет степень усталостных повреждений образца по мере увеличения количества циклов нагружения, что может быть основанием для определения расчетного срока службы и остаточного ресурса асфальтобетонных покрытий.

ПРОГНОЗИРУЕМЫЙ РАСЧЕТНЫЙ СРОК СЛУЖБЫ ВНОВЬ УСТРАИВАЕМЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Процесс приготовления и укладки асфальтобетонных смесей сопровождается рядом технологических операций, оказывающих силовое и температурное воздействие как на ее составляющие, так и на саму смесь в целом. Все они, как правило, в той или иной степени снижают каче-

ственные характеристики исходных составляющих материалов асфальтобетонных смесей, что в итоге ведет к снижению показателей свойств асфальтобетона. Если рассматривать снижение транспортно-эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий как процесс нарастания усталостной повреждаемости, то асфальтобетонное покрытие начинает эксплуатироваться уже с некоторой усталостной повреждаемостью. Определим ее как базовую технологическую усталостную повреждаемость (D) и характеризующую деградационные изменения в структуре асфальтобетона, происходящие как в процессе технологической обработки его составляющих, так и в процессе его приготовления. В процессе дальнейшей

эксплуатации асфальтобетонного покрытия усталостная повреждаемость в течение определенного периода увеличивается. Обозначим ее как D_t – текущую усталостную повреждаемость асфальтобетона, рассчитываемую на момент определения его остаточного ресурса, а степень ее увеличения обозначим как ΔD и определим как усталостную повреждаемость, получаемую как разницу усталостных повреждаемостей, наступивших соответственно в текущем и предыдущем годах, или как усредненную усталостную повреждаемость

асфальтобетона, образующуюся в течение года эксплуатации и принимаемую по результатам статистической обработки результатов определения усталостной повреждаемости и физико-механических характеристик эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий.

Увеличение усталостной повреждаемости проявляется в росте дефектности покрытия. Площадь поврежденного покрытия проезжей части автомобильной дороги выражается в процентах от общей площади обследуемого участка дороги с учетом приведения отдельных видов дефектов к единому показателю. В соответствии с [6] различают дефектность 1, 2 и 3 уровня. Дефектность 3 уровня характеризует состояние покрытия как критическое и требует проведения первоочередных ремонтных мероприятий, что можно определять в данный период эксплуатации и как критическую усталостную повреждаемость. Обозначим ее D_{cr} и определим как критическую усталостную повреждаемость асфальтобетона, принимаемую по результатам статистической обработки результатов определения усталостной повреждаемости и физико-механических характеристик асфальто-

бетона, состояние которого достигло дефектности 3 уровня.

Принимая во внимание вышеприведенное, расчетный срок службы асфальтобетонных покрытий определяется по (1), а остаточный ресурс эксплуатируемых покрытий по (2).

$$T = \frac{D_{cr} - D_{20}}{\Delta D}, \quad (1)$$

где D_{20} – базовая усталостная повреждаемость асфальтобетона вновь устроенного покрытия, %;

ΔD – усредненная усталостная повреждаемость асфальтобетона, образующаяся в течение года эксплуатации, %;

D_{cr} – критическая усталостная повреждае-

Таблица 1 - Критическая усталостная повреждаемость

Показатель	Категория дороги			
	I	II	III	IV
Критическая усталостная повреждаемость, %	65	68	72	76

мость асфальтобетона, принимается в соответствии с таблицей 1, %.

$$T = \frac{D_{cr} - D_t}{\Delta D}, \quad (2)$$

где D_t – текущая усталостная повреждаемость асфальтобетона, рассчитываемая на момент определения его остаточного ресурса, %.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

1. Метод экспериментально-статистического моделирования

Усталостная повреждаемость асфальтобетона может быть определена как один из вариантов при испытаниях на трехточечный изгиб в жестком режиме нагружения его образцов размером 40x40x160 мм в форме параллелепипеда, изготовленных из асфальтобетона. При этом принимается гипотеза об отсутствии давлений продольных слоев (волокон) балки друг на друга и гипотеза плоских сечений. Касательные напряжения от поперечных сил в расчете не учитываются. Образец подвергается кинематическому воздействию V_0 – периодически изгибается с фиксированным прогибом, равным 1 мм. Результаты расчета усталостной повреждаемости асфальтобетона по программе «ROTOR» приведены на рисунке 3.

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

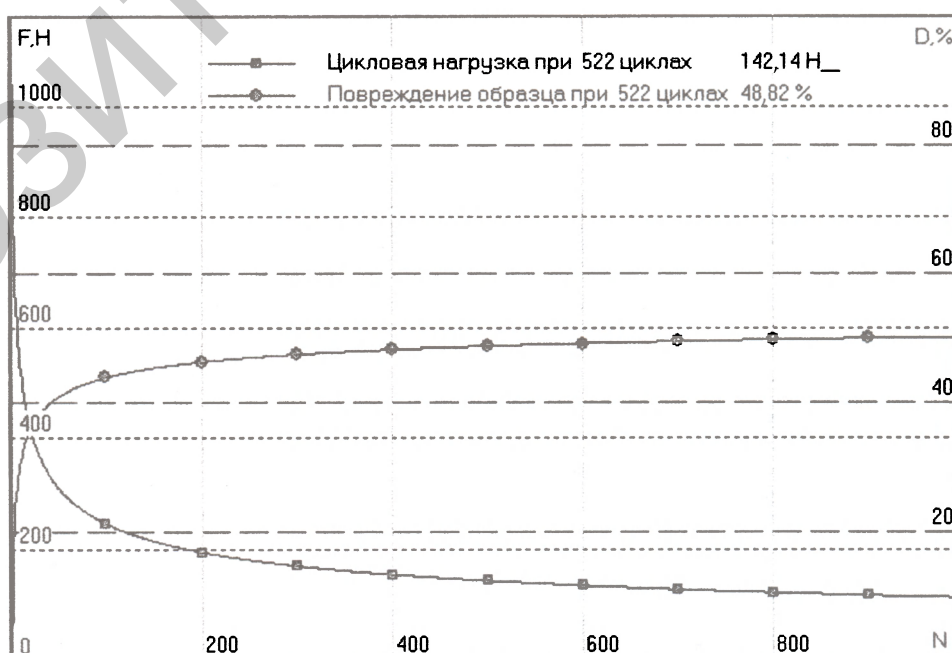


Рисунок 3 - Зависимость силы и усталостной повреждаемости от числа циклов нагружения

неоднородное циклическое нагружение, так как при различных циклах величина максимальной силы меняется.

Определение поврежденной части сечения образца относительно его первоначальных размеров, то есть степень усталостной повреждаемости может быть оценена с помощью выражения (3), %:

$$D = \frac{(h_0 - h_k^*)}{h_0} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{crk}}{\sigma_{cr1}}\right) \cdot 100, \quad (3)$$

где h_0 – высота сечения образца;

h_k^* – высота упругой части среднего сечения образца на k -ом цикле испытаний;

σ_{cr1} – граничное напряжение на первом цикле испытания, $\sigma_{cr1} = \sigma_y$;

σ_{crk} – граничное напряжение на k -ом цикле испытания.

Параметр D и является критерием, определяющим уровень повреждаемости асфальтобетонного образца.

Отметим, что все данные расчета относятся к конкретному испытанию и получаются из опытных диаграмм (рис. 4 и рис. 5). Например, нельзя при расчете по программе «ROTOR» просто взять и изменить величину кинематического воздействия V_0 . Для того, чтобы это сделать, необходимо предварительно провести испытание образца на это воздействие, получить диаграм-

мы испытания (рис. 4 и рис. 5) и найти функции аппроксимации максимальных цикловых сил и упругих прогибов по соответствующим зависимостям.

2. Метод корреляционной зависимости усталостной повреждаемости и показателей механических свойств асфальтобетона

Для исследования механических свойств асфальтобетона используются его экспериментально-статистические модели, строящиеся по экспериментальным данным при помощи статистической программы «Statist», со всеми необходимыми при экспериментально-статистическом моделировании процедурами [7,8].

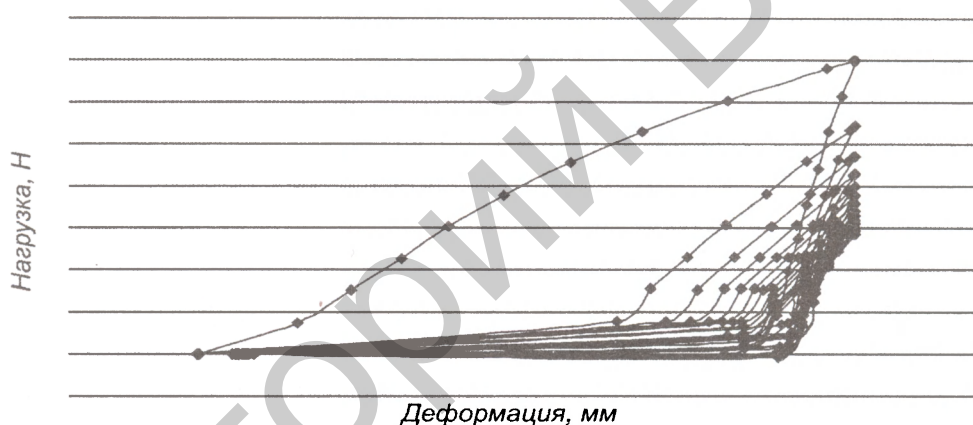


Рисунок 4 - Соотношение упругой и пластической деформаций при жестком режиме нагружения

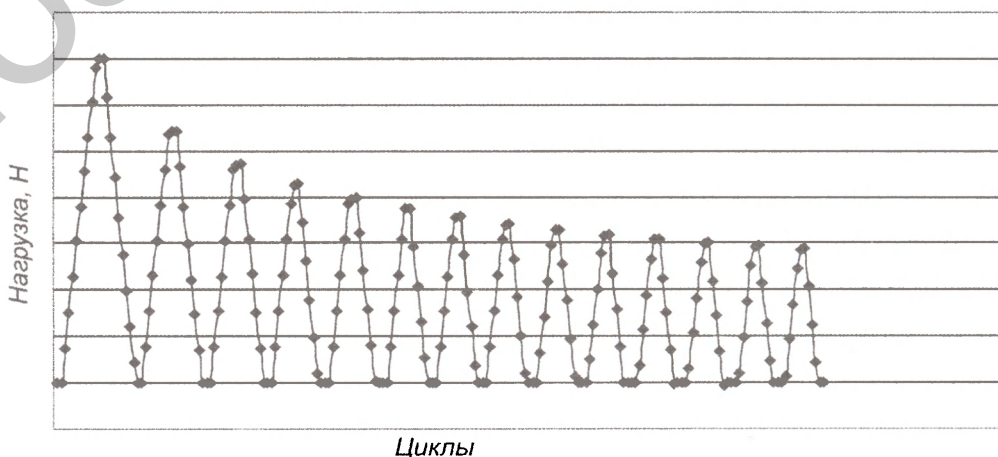


Рисунок 5 - Цикловые значения максимальной силы при жестком режиме нагружения

При анализе первичной информации математических моделей было установлено, что коэффициенты корреляции между показателями механических свойств $\{R_i; R_j\}$ достаточно велики, статистически значимы с риском предсказания $\alpha = 0,05$. Подтверждение гипотезы о корреляционной связи позволило получить модель, по которой можно прогнозировать усталостную долговечность асфальтобетона, характеризуемую показателем усталостной повреждаемости D_{20} по данным испытаний на изгиб (R_u) и при определении индекса трещиностойкости (I_{TR}).

$$D_{20} = 52,8196 \cdot R_u^{-0,2170} \cdot I_{TR}^{-0,0147} \quad (4)$$

Наибольшую приемлемость предложенной модели подтверждает и тот факт, что она учитывает прочность асфальтобетона на изгиб при температуре 20°C и одновременно комплексный показатель индекса трещиностойкости, в котором учтена прочность асфальтобетона на раскол при низких температурах 0°C и -15°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование расчетного срока службы вновь устраиваемых и остаточного ресурса эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий может быть реализовано в соответствии с гипотезой о суммировании усталостных повреждений на основе учета усталостных явлений, происходящих в асфальтобетоне, и позволит обоснованно планировать сроки ремонта и содержания асфальтобетонных покрытий, то есть снизить материальные, трудовые и энергетические затраты.

Литература

1. Серенсен, С.В. *Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению: учеб. пособие для вузов.* - М.: Атомиздат, 1975. - 192 с.
2. Терентьев, В.Ф. *Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев; отв. ред. Н.П. Лякшеев.* - М.: Наука, 2002. - 248 с.
3. Бартенева, Г.М. *Физика полимеров / Г.М. Бартенева, С.Я. Френель; под ред. докт. физ.-мат. наук А.М. Ельяшевича.* - Л.: Химия, 1990. - 432 с.
4. Гольдман, А.Я. *Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов / А.Я. Гольдман.* - Л.: Химия, 1988. - 272 с.
5. Кравченко, С.Е. *Связь деградации структуры асфальтобетона с гистерезисными потерями при его циклическом деформировании в условиях режима мягкого нагружения / С.Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты.* - 2009. - № 2. - С. 24-29.
6. *Автомобильные дороги. Порядок выполнения диагностики: ТКП 140-2008.*
7. Зедгендзе, И.Г. *Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных смесей.* - М.: Наука, 1976. - 390 с.
8. Джонеон, Н. *Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента / Джонеон Н., Лион Ф.* - М.: Наука, 1981. - 518 с.