

УЧЕТ РЕСУРСНЫХ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Кошелев Д. В.

заместитель начальника отдела асфальтобетона и дорожных технологий отраслевой дорожной лаборатории республиканского дочернего унитарного предприятия «Белорусский дорожный научно-исследовательский институт «БелдорНИИ»;
ORCID 0009-0009-4807-9348; e-mail: Koshelev.d@beldornii.by

Бусел А. В.

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отраслевой дорожной лаборатории республиканского дочернего унитарного предприятия «Белорусский дорожный научно-исследовательский институт «БелдорНИИ»;
ORCID 0000-0003-1168-1780; e-mail: Bulex@tut.by

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены практические вопросы определения ресурсных (усталостных) свойств асфальтобетонов с помощью испытания на четырехточечный изгиб и учета результатов этих испытания при проектировании нежестких дорожных одежд. Представлены результаты исследования усталостных свойств асфальтобетонов различных типов и рекомендации по их применению в целях оптимизации конструкции дорожной одежды по критерию усталостной долговечности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

асфальтобетон, четырехточечный изгиб, усталостная долговечность, расчет конструкции нежесткой дорожной одежды.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации автомобильной дороги все конструктивные слои дорожной одежды испытывают комплекс транспортных нагрузок, перепадов температуры, циклов водонасыщения-высушивания и замораживания-оттаивания, других внешних факторов, в результате чего в них формируются напряжения и деформации различной величины. Особенностью нагрузок от транспортных средств является то, что в большинстве случаев напряжения, возникающие в материалах дорожного покрытия, не превышают критических значений, однако при многократном динамическом их приложении в асфальтобетоне развиваются усталостные процессы. Это приводит к исчерпанию ресурса прочности, постепенному накоплению дефектов в структуре материала, образованию усталостных трещин с последующим его разрушением. Как показывает практика эксплуатации нежестких дорожных одежд усталостное разрушение покрытий дорог является достаточно частым явлением, поэтому проблема обеспечения усталостной прочности асфальтобетонных слоев дорожных одежд является актуальной, особенно в условиях интенсивной транспортной нагрузки, характерной для магистральных дорог.

Таким образом существует необходимость разработки, либо адаптации зарубежного экспериментального метода определения параметров работоспособности асфальтобетона под действием циклических нагрузок, а также методики оптимизации конструкции дорожной одежды по критерию усталостной долговечности асфальтобетонных слоев.

АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ, УСТАНОВЛИВАЮЩИХ ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ И РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ МОНОЛИТНЫХ СЛОЕВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПРИ ИЗГИБЕ

Как показывает практика эксплуатации дорожных одежд с асфальтобетонными слоями в Республике Беларусь на покрытиях часто встречаются дефекты в виде усталостных трещин (рисунок 1). Причин этому может быть несколько: ошибочное определение количества циклов ежегодного нагружения конструкции, искаженный или неэффективный учет климатических условий эксплуатации дорожно-строительных материалов в слоях дорожной одежды, неточная методика определения максимально-допустимых деформаций, а также накопления их в процессе эксплуатации [1].



Рисунок 1 – Усталостные трещины на автомобильных дорогах М-1 и М-4

Впервые расчет монолитных слоев на сопротивление усталостному разрушению был представлен в инструкции ВСН 46-83 «Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» [2] выпущенной в 1984 году. Расчет по данному критерию с некоторыми незначительными изменениями применяется и в действующих правилах проектирования нежестких дорожных одежд, кодексе установившейся практики ТКП 45-3.03-112-2008 «Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» [3], где предполагается, что напряжения, возникающие при прогибе дорожной одежды под действием кратковременных повторных нагружений, не должны вызывать нарушения структуры материала и приводить к образованию трещин. Для этого должно выполняться условие:

$$K_{IP}^{TP} \leq R_{доп} / \sigma_r \quad (1)$$

где K_{IP}^{TP} - коэффициент прочности дорожной одежды с учетом заданного коэффициента надежности;

$R_{доп}$ - предельно допустимое напряжение изгиба материала слоя с учетом усталости, МПа;

σ_r - полное растягивающее напряжение при изгибе в монолитном слое, МПа.

Полное растягивающее напряжение при изгибе σ_r определяется по номограммам, исходя из значений модулей упругости слоев и отношения расчетного диаметра отпечатка колеса D к толщине монолитного слоя. Расчетная температура при этом составляет 0°C .

Предельно допустимое напряжение изгиба материала слоя с учетом усталости $R_{доп}$ основано на двух показателях:

- R_{II} - прочность асфальтобетона на растяжение при изгибе с учетом повторности действия напряжений, МПа;

- m - показатель усталости материала (табличные данные).

До настоящего времени не существует нормированной методики, которая бы позволяла определять данные показатели в лабораторных условиях, что не дает возможности оценить усталостные свойства конкретного асфальтобетона при подборе состава и оптимизировать конструкцию дорожной одежды по критерию усталостной долговечности.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПО КРИТЕРИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ С УЧЕТОМ УСТАЛОСТНЫХ (РЕСУРСНЫХ) СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

Государственным предприятием «БелдорНИИ» был разработан дорожный методический документ «Рекомендации по расчету дорожной одежды по критерию усталостной долговечности с учетом ресурсных свойств асфальтобетонов», в котором реализован современный подход к определению усталостных свойств асфальтобетонов и их учета при расчете конструкции дорожной одежды. Алгоритм расчета состоит из трех последовательных действий:

1) определение усталостных свойств асфальтобетонов при помощи испытания на четырехточечный изгиб с построением зависимости относительная деформация растяжения - количество циклов приложения нагрузки до отказа материала;

2) моделирование воздействия расчетной нагрузки на конструкцию дорожной одежды с определением горизонтальных относительных деформаций растяжения, возникающих в слоях асфальтобетона;

3) расчет количества приложений расчетной нагрузки к дорожной одежде до ее отказа по критерию усталостной долговечности.

Определение усталостных свойств асфальтобетонов при помощи испытания на четырехточечный изгиб

Испытания асфальтобетонов проводили согласно СТБ EN 12697-26 [4].

Условия проведения испытания представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия проведения испытания

Наименование показателя	Значение показателя
Критерий нагружения	Постоянная амплитуда относительной деформации
Частота приложения нагрузки, Гц	10 (5)
Температура образца, $^\circ\text{C}$	10
Амплитуда относительной деформации растяжения, 10^{-6}	1) 1000 2) 900 3) 800 4) 700 5) 600 (Если данные испытания возможны)
Критерий завершения испытания (отказа материала)	Падение значения модуля жесткости на 50 %
Количество циклов предварительного нагружения	20

Для построения зависимости относительная деформация растяжения – количество циклов до отказа материала производили не менее трех испытаний при различных деформациях, по четыре образца на каждую величину деформации.

После проведения испытаний вычисляли среднее арифметическое значения количества циклов до отказа материала для каждой относительной деформации растяжения.

Далее проводили регрессионный анализ полученных данных используя зависимость:

$$N \varepsilon C(\varepsilon)^m \quad (2)$$

где N – число циклов приложения расчетной нагрузки до отказа материала по критерию усталости;

C и m – постоянные величины, получаемые в лаборатории при испытании конкретного асфальтобетона;

ε – амплитуда относительной деформации растяжения.

Применимость этой зависимости к оценке сопротивления материала дорожных покрытий циклическим транспортным нагрузкам получила экспериментальное подтверждение и признание [5-6].

Далее вычисляли коэффициент детерминации R^2 по формуле:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{N}_i - \bar{N})^2}{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2} \quad (3)$$

где n – количество проведенных испытаний при различных относительных деформациях растяжения;

N_i – значение числа циклов приложения нагрузки до отказа, полученное из регрессионного выражения при относительной деформации растяжения i -го испытания;

\bar{N} – среднее арифметическое значение числа циклов приложения нагрузки всех испытаний;

N_i – результат i -го испытания.

Испытания проводили с учетом того, что коэффициент детерминации должен быть более 0,75.

Были проведены исследования усталостных свойств различных типов асфальтобетонов. Составы асфальтобетонов представлены в таблице 2

Таблица 2 – Составы исследуемых асфальтобетонов

Наименование материала	Содержание материала в смеси, %		
	Щебеночно-мастичный	Плотный типа А	Пористый
Гранитный щебень фракции 5-20 мм	-	-	63
Гранитный щебень фракции 8-16 мм	-	40	-
Гранитный щебень фр. 5-10 мм	70	20	-
Гранитный отсев дробления 0-5 мм	20	35	37
Минеральный порошок	10	5	-
Битум 70/100 сверх 100 % минеральной части	6,3	4,3	4,3
Гранулированное целлюлозное волокно, сверх 100 % минеральной части	0,3	-	-

Результаты испытаний приведены в таблицах 3 – 5 и на рисунке 2.

Таблица 3 – Результаты исследования усталостных свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона

Наименование показателя	Асфальтобетон ЦМСт10-1/2,2			
Относительная деформация растяжения при проведении испытания, мкм/м	1400	1200	1000	800
Число циклов до потери модуля упругости на 50 % (отказа материала)	5258	11437	29320	92086
Начальное значение модуля упругости, МПа	4087	4095	4416	4228
Коэффициент регрессии C	$1,26 \times 10^{-11}$			
Коэффициент регрессии m	-5,12			
Коэффициент детерминации R^2	0,999			
Количество циклов до отказа материала при относительной деформации 200 мкм/м	$1,11 \times 10^8$			

Таблица 4 – Результаты исследования усталостных свойств плотного асфальтобетона типа А

Наименование показателя	Асфальтобетон ЦМАг20-1/2,7 (4,3 % битума)			
Относительная деформация растяжения при проведении испытания, мкм/м	800	700	600	550
Число циклов до потери модуля упругости на 50 % (отказа материала)	5006	14993	23958	32345
Начальное значение модуля упругости, МПа	7854	7444	7956	8507
Коэффициент регрессии C	$9,42 \times 10^{-12}$			

Коэффициент регрессии m	-4,78
Коэффициент детерминации R^2	0,940
Количество циклов до отказа материала при относительной деформации 200 мкм/м	4 530 107

Таблица 5 – Результаты исследования усталостных свойств пористого асфальтобетона

Наименование показателя	Асфальтобетон ЩМПГ20-II			
Относительная деформация растяжения при проведении испытания, мкм/м	1200	1000	800	600
Число циклов до потери модуля упругости на 50 % (отказа материала)	1070	1217	8259	16134
Начальное значение модуля упругости, МПа	4796	4810	4894	4902
Коэффициент регрессии C	$1,65 \cdot 10^{-10}$			
Коэффициент регрессии m	-4,36			
Коэффициент детерминации R^2	0,912			
Количество циклов до отказа материала при относительной деформации 200 мкм/м	2 221 798			

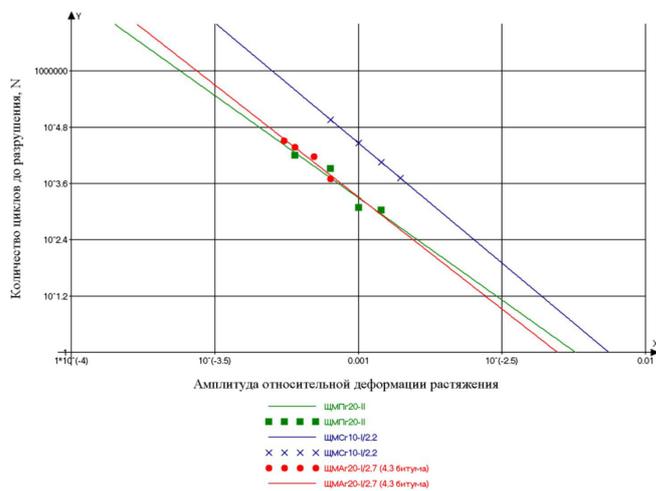


Рисунок 2 – Зависимости количества циклов работы до отказа от амплитуды относительной деформации для асфальтобетонных различных типов

По результатам проведенных испытаний установлено, что наибольшей усталостной прочностью (долговечностью) обладают щебеночно-мастичные асфальтобетоны, наименьшей – пористые, причем при относительной деформации растяжения 200 мкм/м щебеночно-мастичный асфальтобетон выдерживает в 55 раз, а плотный тип А в 2 раза больше циклов до отказа чем пористый.

Моделирование воздействия расчетной нагрузки на конструкцию дорожной одежды с определением горизонтальных относительных деформаций растяжения, возникающих в слоях асфальтобетона

Моделирование воздействия расчетной нагрузки на конструкции дорожной одежды выполняли с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Благодаря работам О. Зенкевича, Р. Галлагера, Дж. Одена, и других ученых [7, 8], начиная с 1970 г., МКЭ является наиболее популярным в инженерных расчетах.

При решении задачи о нахождении относительной деформации растяжения в асфальтобетонных слоях нежесткой дорожной одежды от приложения расчетной нагрузки при переходе от физической (реальной) модели к расчетной принимают следующие допущения:

- все слои дорожной одежды являются однородными, изотропными и не обладают весом;
- модель деформирования материалов дорожной одежды линейно-упругая, т.к. при приложении расчетной нагрузки не происходит значительных (разрушающих) деформаций;
- расчетная температура (для которой определя-

ются расчетные характеристики асфальтобетонных, модуль упругости и коэффициент Пуассона) составляет 10 0С.

Нагрузка, имитирующая расчетную нагрузку типа А2, прикладываемая к модели конструкции дорожной одежды, является динамической в виде штампа радиусом 150 мм давлением 0,8 МПа. Нагрузка увеличивается по синусоидальному закону от 0 до 0,8 МПа за 0,1 секунду. Деформации определяются в момент максимального значения нагрузки. Для расчета использовали следующее прикладное программное обеспечение: PLAXIS и ELLEA1 ver. 0.96 (метод конечных элементов, реализованный в среде Microsoft EXCEL в техническом университете Дании и верифицированный посредством сравнения показателей с экспериментальными данными).

Для примера моделирования была взята конструкция дорожной одежды I технической категории, характерная для Республики Беларусь. Также был произведен расчет улучшенной по критерию усталостной долговечности конструкции дорожной одежды, где верхний слой основания (самый нижний асфальтобетонный слой) устроен из плотного асфальтобетона типа А, вместо пористого. Расчетные характеристики слоев дорожных одежд представлены в таблицах 6 и 7. Расчетный модуль упругости асфальтобетонных принимался как среднее значение начального модуля упругости, сниженного на 25 %, определенного при испытании на четырехточечный изгиб, так как при эксплуатации дорожной одежды значение модуля асфальтобетона снижается.

Таблица 6 – Расчетные характеристики слоев дорожной одежды для дороги I технической категории

Наименование материала	Толщина конструктивного слоя, м	Расчетные характеристики материала слоя
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	0,05	Модуль упругости – 3155 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,35;
Плотный асфальтобетон типа А	0,07	Модуль упругости – 5955 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,35;
Пористый асфальтобетон	0,08	Модуль упругости – 3638 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,35;
Щебеночная смесь из гранитного щебня	0,30	Модуль упругости – 280 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,27;
Песок средней крупности	-	Модуль упругости – 120 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,30;

Таблица 7 – Расчетные характеристики слоев улучшенной дорожной одежды для дороги I технической категории

Наименование материала	Толщина конструктивного слоя, м	Расчетные характеристики материала слоя
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	0,05	Модуль упругости – 3155 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,35;
Плотный асфальтобетон типа А	0,07	Модуль упругости – 5955 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,35;
Пористый асфальтобетон	0,08	Модуль упругости – 5955 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,35;
Щебеночная смесь из гранитного щебня	0,30	Модуль упругости – 280 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,27;
Песок средней крупности	-	Модуль упругости – 120 Мпа; Коэффициент Пуассона – 0,30;

Результаты моделирования представлены на рисунке 3 и в таблицах 8 и 9.

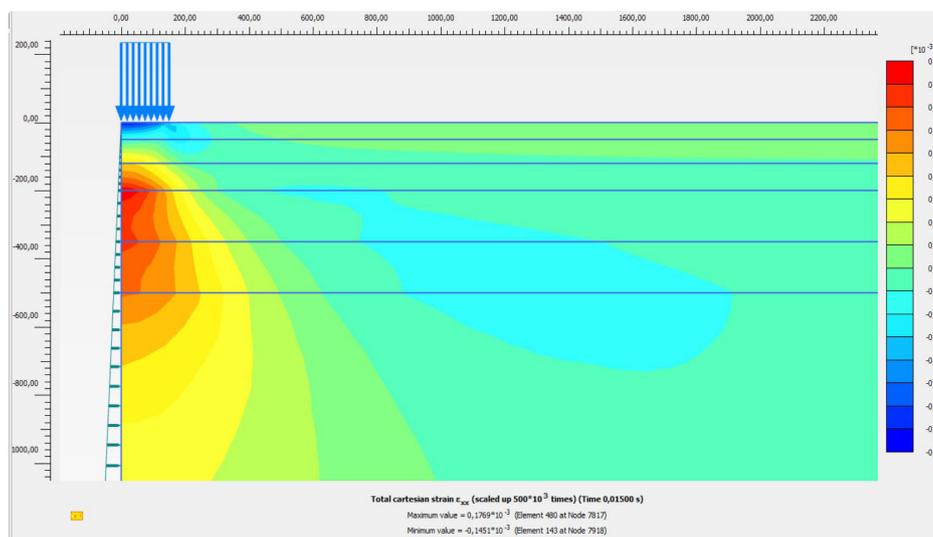


Рисунок 3 – Изополя относительных деформаций (по горизонтальной оси) при моделировании воздействия расчетной нагрузки на дорожную одежду

Как следует из полей деформации, представленных на рисунке 3, максимальное растяжение наблюдается в верхнем слое основания.

Таблица 8 – Максимальные относительные деформации растяжения, возникающие в слоях асфальтобетона для дорожной одежды дороги I технической категории

Наименование слоя асфальтобетона	Максимальная относительная деформация растяжения, мкм/м
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	22
Плотный асфальтобетон типа А	57
Пористый асфальтобетон	166

Таблица 8 – Максимальные относительные деформации растяжения, возникающие в слоях асфальтобетона для дорожной одежды дороги I технической категории

Наименование слоя асфальтобетона	Максимальная относительная деформация растяжения, мкм/м
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	20
Плотный асфальтобетон типа А	27
Плотный асфальтобетон типа А	135

Также необходимо учитывать деформаций растяжения, возникающих в верхнем асфальтобетонном слое от воздействия протектора шины рисунок 4. По данным исследователей [9] такие деформации не достигают 200 мкм/м.

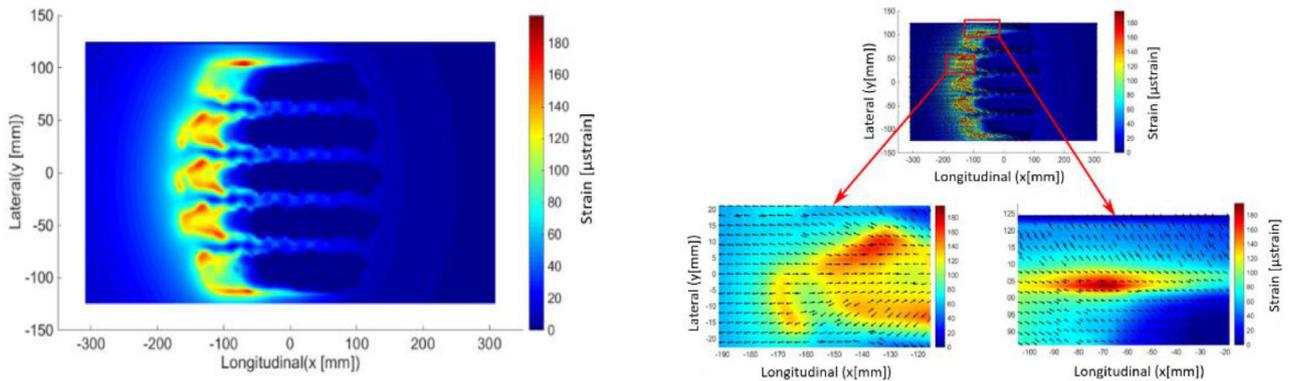


Рисунок 4 – Относительные деформации растяжения верхнего асфальтобетонного слоя от воздействия протектора шины при разгоне грузового автомобиля

Таким образом установлено, что максимальные деформации растяжения в асфальтобетонных слоях от воздействия транспортной нагрузки возникают в самом верхнем асфальтобетонном слое от воздействия протектора шины грузового автомобиля, также ощутимые деформации возникают в самом нижнем связном слое, который как правило устраивают из пористого асфальтобетона.

Определение количества циклов приложения расчетной нагрузки при котором произойдет усталостное разрушение (отказ) конструкции дорожной одежды

Число накопленных осей при котором произойдет усталостное разрушение (отказ) конструкции дорожной одежды, ед., рассчитывали по формуле:

$$\sum N_y = C \cdot \varepsilon_p^m \cdot K_p \cdot K_d \cdot K_n, \quad (4)$$

где $\sum N_y$ – число накопленных осей, при котором произойдет усталостное разрушение (отказ) конструкции дорожной одежды, ед.;

C и m – коэффициенты, определяемые путем регрессионного анализа лабораторных данных при испытании асфальтобетонных образцов на четырехточечный изгиб;

ε_p – максимальная относительная деформация растяжения асфальтобетонного слоя дорожной одежды, полученная при моделировании нагружения конструкции дорожной одежды методом конечных элементов;

K_p – коэффициент, учитывающий восстановление микрповреждений в асфальтобетоне при отсутствии транспортной нагрузки; принимается равным 1,2;

K_d – коэффициент, учитывающий неравномерное движение автомобилей по полосе, принимаем равный 1;

K_n – коэффициент, учитывающий неблагоприятные периоды эксплуатации дорожной одежды (эксплуатация при водонасыщенном земляном полотне), принимается равным 0,7.

Расчет количества осей при котором произойдет отказ конструкции дорожной одежды определяли для двух слоев асфальтобетона, в которых возникают максимальные деформации растяжения от воздействия расчетной нагрузки: верхнего и самого нижнего. Таким образом возможно определить сторону развития усталостного трещинообразования «сверху-вниз» или «снизу-вверх». Результаты расчета представлены в таблицах 10, 11.

Таблица 10 – Количество циклов приложения расчетной нагрузки при котором произойдет усталостное разрушение (отказ) конструкции дорожной одежды дороги I технической категории

Наименование слоя асфальтобетона	Количество приложений расчетной нагрузки до отказа конструкции дорожной одежды по критерию усталостной долговечности
Верхний слой асфальтобетона	93 622 020
Нижний слой асфальтобетона (пористый)	4 205 973

Таблица 11 – Количество циклов приложения расчетной нагрузки при котором произойдет усталостное разрушение (отказ) конструкции улучшенной дорожной одежды дороги I технической категории

Наименование слоя асфальтобетона	Количество приложений расчетной нагрузки до отказа конструкции дорожной одежды по критерию усталостной долговечности
Верхний слой асфальтобетона	93 622 020
Нижний слой асфальтобетона (тип А)	24 909 772

По результатам расчета можно сделать следующие выводы:

- усталостное трещинообразование в представленных конструкциях будет развиваться «снизу-вверх»;
- улучшенная конструкция дорожной одежды при замене нижнего пористого слоя асфальтобетона на плотный асфальтобетон типа А при одинаковых условиях эксплуатации увеличивает свой ресурс в 5,9 раз.

Имея данные о интенсивности, составе транспортного потока и изменении интенсивности по годам возможно определить расчетный срок службы дорожной одежды по критерию усталостной долговечности T_y , лет по формуле:

$$T_y = \frac{\sum N_y}{365 \cdot N_p \cdot q}, \quad (5)$$

где $\sum N_y$ – число накопленных осей, при котором произойдет усталостное разрушение (отказ) конструкции дорожной одежды, ед.;

N_p – величина приведенной интенсивности движения, ед./сут; определяется по ТКП 45-3.03-112;

q – показатель изменения интенсивности движения по годам.

Дорожная одежда должна функционировать без отказа по критерию усталостной долговечности весь расчетный срок службы с определенной надежностью. Для этого должно выполняться условие:

$$K_{пр}^{ТР} \leq \frac{\sum N_y}{365 \cdot N_p \cdot T_{сл} \cdot q}, \quad (6)$$

где $K_{пр}^{ТР}$ – требуемый коэффициент прочности дорожной одежды с учетом заданного коэффициента надежности, принимается согласно ТКП 45-3.03-112;

$T_{сл}$ – расчетный срок службы дорожной одежды;

В случае выполнения условия (6) дорожная одежда считается усталостно-долговечной и надежной, в ином случае необходимо предусмотреть следующие мероприятия по улучшению усталостной долговечности дорожной одежды:

- увеличение толщин асфальтобетонных слоев дорожной одежды;
- применение в основании материалов с более высоким модулем упругости;
- применение более стойкого к усталости асфальтобетона в верхнем или самом нижнем слое пакета асфальтобетонных слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До настоящего времени не существует нормированной методики расчета дорожной одежды, которая бы позволяла учитывать данные исследований ресурсных показателей асфальтобетона.

Разработанный в государственном предприятии «БелдорНИИ» дорожный методический документ «Рекомендации по расчету дорожной одежды по критерию усталостной долговечности с учетом ресурсных свойств асфальтобетонов» содержит методику, позволяющую сравнивать усталостные характеристики различных асфальтобетонов и определять их ресурс работы в конструкциях дорожной одежды.

По результатам проведенных испытаний асфальтобетонов различных типов установлено, что наибольшей усталостной прочностью (долговечностью) обладают щебеночно-мастичные асфальтобетоны, наименьшей – пористые, причем при относительной деформации растяжения 200 мкм/м щебеночно-мастичный асфальтобетон выдерживает в 55 раз, а плотный тип А в 2 раза больше циклов до отказа чем пористый.

Было установлено, что максимальные деформации растяжения в асфальтобетонных слоях от воздействия транспортного груза возникают в самом верхнем асфальтобетонном слое от воздействия протектора шины грузового автомобиля, также ощутимые деформации возникают в самом нижнем связанном слое, который как правило устраивают из пористого асфальтобетона. Замена его на плотный асфальтобетон типа А обеспечивает увеличение ресурса дорожной одежды в 5,9 раза.

Таким образом представленная методика позволяет рассчитать устойчивую к усталостному разрушению конструкцию дорожной одежды и подобрать соответствующие типы асфальтобетонов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Углова Е.В., Шило О.А. Анализ критериев расчета нежестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока / Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №3, <https://t-s.today/PDF/14SAT318.pdf> (доступ свободный).
2. ВСН 46-83 «Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» – Введ, 1984 – М., Минтрансстрой СССР, 1984 – 41 с.
3. ТКП 45-3.03-112-2008 «Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» - Введ. 2008 – Мн., ГП «БелдорНИИ», БНТУ, 2008 – 84 с.
4. СТБ EN 12697-24-2011 «Смеси битумные. Методы испытания горячих асфальтобетонных смесей. Часть 24. Усталостная прочность» - Введ. 2011 – Мн., ГП «БелдорНИИ», 2011 – 111 с.
5. Wojciech Bankowski. Evaluation of Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement. Appl. Sci. 2018, 8(3), 469; <https://doi.org/10.3390/app8030469>
6. New Phenomenological Approach for Modelling Fatigue Life of Asphalt Mixes / Nikhil Saboo, Bhaskar Pratim Das, Praveen Kumar. – Construction and Building Materials 121, 2016. – 134-142 p.
7. Галагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
8. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
9. E.Y. Manyo, B. Picoux, P. Reynaud, R.Tauton, D. Nelias, F. Fillou, C. Petit Approach of pavement surface layer degradation caused by tire contact using semi-analytical model / Materials, 2021, №14, 2117 – 14 p., <https://doi.org/10.3390/ma14092117>