

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-451-457>

УДК 691.168

Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов, модифицированных полимерными добавками различных типов

Докт. техн. наук, проф. В. А. Веренько¹⁾, инж. А. В. Ладышев¹⁾, асп. Р. К. Гатальский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье проанализировано влияние на усталостную долговечность асфальтобетонов добавок группы термоэластопласты и комплексных модификаторов на основе термопластов. Установлены закономерности поведения материалов во времени, для которых получены близкие значения физико-механических свойств при применении различных типов вяжущих и модификаторов. На основании статистических и лабораторных исследований получены теоретические параметры усталостной долговечности для материалов покрытия дорожной одежды. При проведении анализа обратились к статистическим показателям обычных и модифицированных асфальтобетонов, которые получили в процессе испытаний асфальтобетонных смесей типов С и А за период с 2010 по 2016 г. На основании статистического анализа сопоставлен индекс сопротивления пластическим деформациям $I_{пл}$ с количеством упругих связей n_y и предельной структурной прочностью R_c . Для реализации задач второго исследования выполнены 12 расчетов (№ 1–12). Вычислены расчетные характеристики асфальтобетона, необходимые для определения параметров надежности. Объектом исследования выбран нижний слой двух- или трехслойного покрытия как наиболее подверженный воздействию циклических растягивающих напряжений от транспортной нагрузки. Необходимое для вычисления значение растягивающих напряжений σ при расчетной температуре 0°C принято на основании проведенных расчетов методом конечных элементов, где выявлено распределение напряжений по толщине конструкции 20 см от нагрузки A_2 . По полученным результатам сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: асфальтобетоны, усталостная долговечность, полимерные добавки, модификатор, термопласты, дорожная одежда

Для цитирования: Веренько, В. А. Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов, модифицированных полимерными добавками различных типов / В. А. Веренько, А. В. Ладышев, Р. К. Гатальский // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 451–457. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-451-457>

Investigation of Fatigue Life for Asphalt Concrete Modified by Polymer Additives of Various Types

V. A. Veranko¹⁾, A. V. Ladyshau¹⁾, R. K. Hatalski¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper has analyzed influence of additives representing a group of thermoplastic elastomers and complex thermoplast-based modifiers on fatigue life of asphalt concrete. Regularities in behavior of materials in time have been determined

Адрес для переписки

Веренько Владимир Адольфович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-93-63
pd_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Veranko Vladimir A.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-93-63
pd_ftk@bntu.by

in the paper and close values of their physical and mechanical properties have been obtained while using various types of binders and modifiers. Statistic and laboratory investigations have made it possible to obtain theoretical parameters of the fatigue life for materials used for road dressing. The analysis has been based on statistical values of ordinary and modified asphalt concrete and asphalt concrete mixes of C- and A-type obtained during the experiments for the period from 2010 till 2016. A statistic analysis has permitted to compare a parameter $I_{\text{ин}}$ (resistance index to plastic deformations) with such parameters as n_y (number of elastic constraints) and R_c (threshold structural strength). 12 calculations (Nos. 1–12) have been carried out in order to realize targets of the second investigation. Calculative characteristics of asphalt concrete required for determination of reliability parameters have been estimated in the paper. A bottom layer of two- or three-coat pavement has been selected as an object of the investigation due to the fact that it is more often subjected to an impact of cyclic tensile stresses caused by a transport load. The required value for calculation of tensile stresses σ at calculated temperature θ has been accepted on the basis of executed estimations while using finite elements method and distribution of stresses has been determined along structure with 20 cm thickness due to load A_2 . Corresponding conclusions have been made in accordance with the obtained results.

Keywords: asphalt concrete, fatigue life, polymer additives, modifier, thermoplastics, road dressing

For citation: Veranko V. A., Ladyshau A. V., Hatalski R. K. (2018) Investigation of Fatigue Life for Asphalt Concrete Modified by Polymer Additives of Various Types. *Science and Technique*. 17 (6), 451–457. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-451-457> (in Russian)

Введение

В условиях постоянного повышения интенсивности воздействий и колесной нагрузки транспортного потока при проектировании дорожных одежд все сложнее обеспечить требуемые значения надежности и долговечности материалов конструктивных слоев. В частности, асфальтобетон, приготовленный традиционным способом, в ряде случаев не может обеспечить требуемую прочность и деформативность по какому-либо критерию прочности. Для решения указанной проблемы в настоящее время в мировой и отечественной практике в асфальтобетонных смесях применяются модификаторы, которые различаются по способу введения в смесь, по своему составу и функциональному назначению.

В статье проанализировано влияние на усталостную долговечность асфальтобетонов добавок группы термоэластопластов и комплексных модификаторов на основе термопластов.

Термоэластопласты – модификаторы, улучшающие эластичность асфальтобетонов при низких температурах и вязкопластические свойства при высоких температурах [1, 2]. К данной группе относятся сополимеры стирола: СБ – стирол-бутадиеновый сополимер, СБС – стирол-бутадиен-стирольный сополимер и т. д.

Термопласты – полимерные материалы, способные обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние. К данной группе относятся: ЭВА – этиленвинилацетат, ЭМА – этиленметилакрилат, АПП – атактический полипропилен, ПЭ – полиэтилен, ПО – полиолефины [3, 4].

На основании статистических и лабораторных исследований получены теоретические параметры усталостной долговечности для материалов покрытия дорожной одежды. Особенностью данного исследования является то, что изучены параметры долговечности для асфальтобетонов, приготовленных на различных добавках, которые имеют близкие физико-механические параметры по СТБ 1033–2016 [5].

Под усталостной долговечностью асфальтобетона понимается его устойчивость на протяжении расчетного срока службы к воздействию повторных нагрузок в широком температурно-временном поле, когда материал проявляет весь комплекс реологических свойств [6–8]. Если по данному параметру долговечность не обеспечена, то на покрытии возникают усталостные деформации в виде отдельных трещин и сетки трещин, обусловленных накоплением в структуре материала повреждаемости (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид усталостных разрушений

Fig. 1. General view of fatigue failure

Основные положения теории

Для того чтобы показать зависимость усталостной долговечности асфальтобетона и оце-

нить его устойчивость к усталостным трещинам согласно гипотезе [1, 9], надо знать величину напряжения, приходящуюся на упругие связи σ_y и максимальную структурную прочность R_c . Значение σ_y определяется по формуле

$$\sigma_y = \sigma n_y, \quad (1)$$

где σ – уровень напряжения от транспортной нагрузки, зависящий от конструкции дорожной одежды и модуля упругости материала при расчетной температуре; n_y – число вовлеченных в процесс деформирования упругих связей при расчетной температуре.

В результате выполненных авторами статьи исследований установлено, что циклическая (усталостная) долговечность материала в дорожной одежде с допустимой степенью точности будет определяться эмпирической формулой вида

$$N = A \left(\frac{R_c}{\sigma n_y} \right)^m, \quad (2)$$

где A , m – эмпирические параметры, определенные экспериментально; R_c – предельная структурная прочность материала; σ – максимальное растягивающее напряжение в конструктивном слое, возникающее от действия транспортной нагрузки; n_y – параметр, характеризующий количество упругих связей, вовлеченных в процесс деформирования, определяемый по формуле:

$$n_y = \frac{E_t}{E_c} = \left(\frac{R_t}{R_c} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

E_t , R_t – модуль упругости и прочность асфальтобетона при конкретных условиях действия нагрузки и температуры, МПа; E_c , R_c – максимальное значение модуля релаксации и прочности во всем диапазоне температуры и скорости (времени) действия нагрузки, МПа; n – параметр, зависящий от свойств (типов) материала (для асфальтобетонов, применяемых в Республике Беларусь, принимается равным 0,80).

При необходимости сравнения различных материалов можно определять коэффициент запаса прочности по формуле

$$K_3 = \frac{\left(\frac{R_c^{\text{II}}}{\sigma n_y^{\text{II}}} \right)^{m^{\text{II}}}}{\left(\frac{R_c^{\text{I}}}{\sigma n_y^{\text{I}}} \right)^{m^{\text{I}}}}, \quad (4)$$

где индекс I – базовые характеристики для материалов различных слоев; индекс II – параметры исследуемого материала.

В качестве базовых характеристик для расчетов принимали среднестатистические значения параметров для немодифицированных асфальтобетонов: $n_y^{\text{I}} = 0,50$; $R_c = 4,80$ МПа.

При необходимости определения надежности и долговечности материалов конструктивных слоев в практике проектирования дорожных одежд, используя коэффициенты запаса прочности по методике ТКП 45-3.03-3–2004 [10], можно вычислить уровни надежности и расчетные сроки службы материала до разрушения.

Ход исследования

На основании предложенной методологии оценки надежности и долговечности асфальтобетонных смесей рассмотрим эффективность модификации асфальтобетонных смесей различными способами.

Исследовано, как изменяются надежность и долговечность асфальтобетонного слоя, если его устраивать из асфальтобетона одного типа и марки по СТБ 1033–2016 [5], для которого достигнут один и тот же показатель сдвигоустойчивости путем применения обычного битума, модифицирующей добавки на основе термопластов и модифицированного термоэластопластами битума. То есть необходимо установить зависимость, как может отличаться работа асфальтобетона, для которого достигнуты одинаковые физико-механические свойства согласно действующим нормативным документам, при использовании вяжущих различного типа.

Согласно изложенной в [10] методологии, можно выделить физико-механические свойства асфальтобетона, определяющие его расчетные сроки службы и уровни надежности:

φ° – угол внутреннего трения (используется в расчете по критерию сдвигоустойчивости);

C – внутреннее сцепление материала, МПа (используется в расчете по критерию сдвигоустойчивости);

R_c – предельная структурная прочность, МПа, характеризует максимальный уровень прочности материала во всем диапазоне температур и скоростей нагружения и циклическую долговечность в упругой стадии (используется в расчете по критерию устойчивости к усталостным и температурным разрушениям);

R_0 – прочность на растяжение при температуре 0 °С, МПа (используется в расчете по критерию устойчивости к температурным разрушениям);

n_y – параметр, характеризующий количество упругих связей, вовлеченных в процесс деформирования, определяемый по формуле (3) (используется в расчете по критерию устойчивости к усталостным разрушениям);

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, характеризует устойчивость материала к попеременному замораживанию-оттаиванию (используется в расчете по критерию устойчивости к коррозионным разрушениям).

При проведении анализа обратимся к статистическим показателям обычных и модифицированных асфальтобетонов, которые были получены при испытаниях асфальтобетонных смесей типов С и А за период с 2010 по 2016 г. На основании статистического анализа сопоставлен индекс сопротивления пластическим деформациям $I_{пл}$ с количеством упругих связей n_y и предельной структурной прочностью R_c . Полученные статистические зависимости представлены на рис. 2, 3.

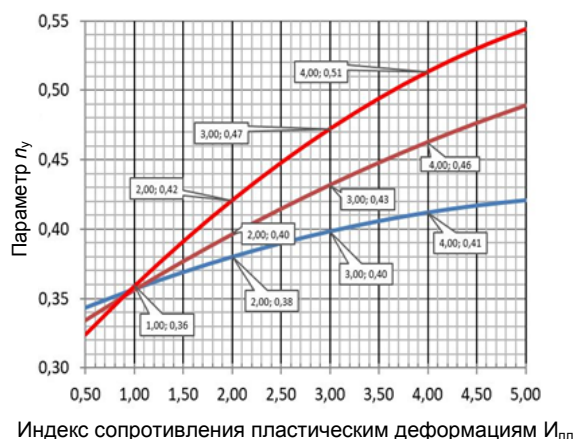


Рис. 2. Статистическая обработка сходимости параметров n_y и $I_{пл}$: — модифицированный битум; — модифицирующая добавка; — обычный битум

Fig. 2. Statistical processing of parameter convergence n_y and $I_{пл}$: — normal bitumen; — modifying additive; — modified bitumen

При исследовании приняты следующие значения индекса сопротивления пластическим деформациям: $I_{пл}^1 = 1,0$; $I_{пл}^2 = 2,0$; $I_{пл}^3 = 3,0$; $I_{пл}^4 = 4,0$. Для приведенных значений $I_{пл}$ по статистическим зависимостям были определены характерные параметры R_c и n_y для различных типов вяжущих.

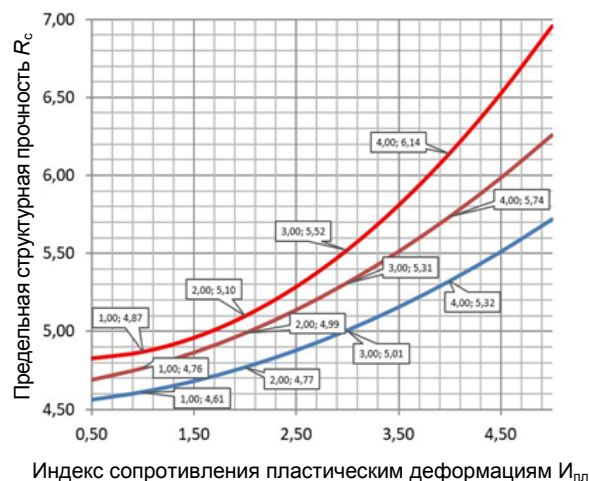


Рис. 3. Статистическая обработка сходимости параметров R_c и $I_{пл}$ (обозначения те же, что на рис. 2)

Fig. 3. Statistical processing of parameter convergence R_c and $I_{пл}$ (designations are the same as in fig. 2)

Для реализации задач второго исследования выполнены 12 расчетов (№ 1–12). Расчетные характеристики асфальтобетона, необходимые для определения параметров надежности и долговечности по методике ТКП 45-3.03-3-2004 [4], определены исходя из выбранных значений $I_{пл}$, R_c и n_y . Параметры ϕ и C находили на основании значений $I_{пл}$ согласно СТБ 1115-2013 [2]. Величина R_0 определена пересчетом по формуле (3) на основании заданных значений R_c и n_y . Коэффициент морозостойкости $K_{мрз}$ вычисляли по эмпирической зависимости, представленной в [7, 8], на основании заданных значений R_c и R_0 при одинаковом водонасыщении. Расчетные характеристики сведены в табл. 1.

Объектом исследования выбран нижний слой двух- или трехслойного покрытия (рис. 4) как наиболее подверженный воздействию циклических растягивающих напряжений от транспортной нагрузки.

Расчетные характеристики материалов
Design characteristics of materials

| № п/п | Тип вяжущего | $I_{пл}$ | R_c | n_y | φ | C | R_0 | W | $K_{мрз}$ |
|-------|---|----------|-------|-------|-----------|------|-------|------|-----------|
| 1 | Обычный битум | 1,00 | 4,61 | 0,36 | 41,00 | 0,18 | 2,04 | 2,00 | 0,63 |
| 2 | Модифицирующая добавка (термопласт) | 1,00 | 4,76 | 0,36 | 41,00 | 0,18 | 2,10 | 2,00 | 0,63 |
| 3 | Модифицированный битум (термоэластопласт) | 1,00 | 4,87 | 0,36 | 41,00 | 0,18 | 2,15 | 2,00 | 0,63 |
| 4 | Обычный битум | 2,00 | 4,77 | 0,42 | 41,00 | 0,36 | 2,38 | 2,00 | 0,61 |
| 5 | Модифицирующая добавка (термопласт) | 2,00 | 4,99 | 0,40 | 41,00 | 0,36 | 2,40 | 2,00 | 0,62 |
| 6 | Модифицированный битум (термоэластопласт) | 2,00 | 5,10 | 0,38 | 41,00 | 0,36 | 2,35 | 2,00 | 0,62 |
| 7 | Обычный битум | 3,00 | 5,01 | 0,47 | 41,00 | 0,54 | 2,74 | 2,00 | 0,60 |
| 8 | Модифицирующая добавка (термопласт) | 3,00 | 5,31 | 0,43 | 41,00 | 0,54 | 2,70 | 2,00 | 0,61 |
| 9 | Модифицированный битум (термоэластопласт) | 3,00 | 5,52 | 0,40 | 41,00 | 0,54 | 2,65 | 2,00 | 0,61 |
| 10 | Обычный битум | 4,00 | 5,32 | 0,51 | 41,00 | 0,72 | 3,10 | 2,00 | 0,58 |
| 11 | Модифицирующая добавка (термопласт) | 4,00 | 5,74 | 0,46 | 41,00 | 0,72 | 3,08 | 2,00 | 0,60 |
| 12 | Модифицированный битум (термоэластопласт) | 4,00 | 6,14 | 0,41 | 41,00 | 0,72 | 3,01 | 2,00 | 0,61 |

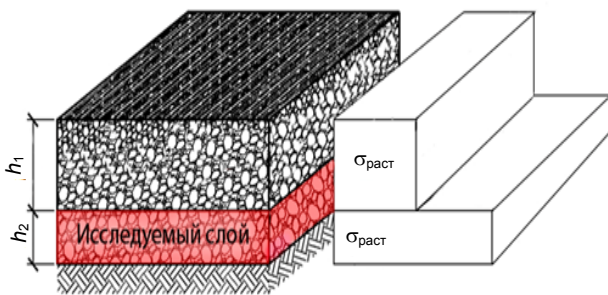


Рис. 4. Исследуемый конструктивный слой

Fig. 4. Investigated structure layer

Необходимое для расчетов значение растягивающих напряжений σ при расчетной температуре 0°C , равно $0,99\text{ МПа}$, принято на основании проведенных расчетов методом конечных элементов, где было выявлено распределение напряжений по толщине конструкции 20 см от нагрузки A_2 . Характер деформирования модели показан на рис. 5, эпюра распределения растягивающих напряжений – на рис. 6.

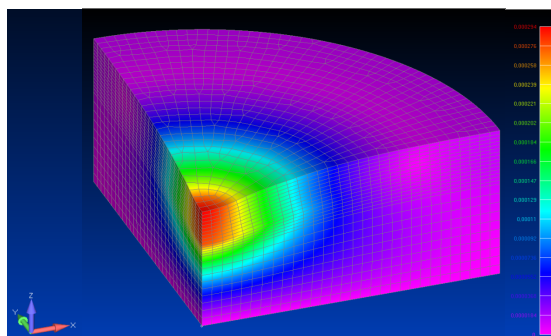


Рис. 5. Характер деформирования модели

Fig. 5. Nature of model deformation

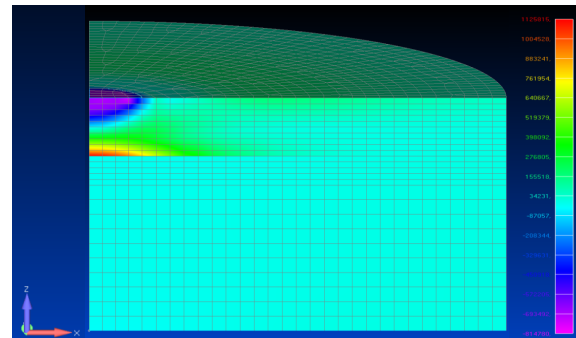


Рис. 6. Эпюра распределения растягивающих напряжений

Fig. 6. Diagram of tensile stresses distribution

Результаты расчетов

Результаты определения частных (P_1-P_4) и общих ($P_{общ}$) уровней надежности, расчетных сроков службы ($T_{сл}$) исследуемого слоя для всех расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения коэффициентов запаса прочности и частных уровней надежности

Results of determination for safety factors and partial reliability levels

| № п/п | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | $P_{общ}$ | $T_{сл}$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|----------|
| 1 | 0,10 | 0,76 | 0,98 | 0,98 | 0,52 | 1 |
| 2 | 0,10 | 0,76 | 0,98 | 0,98 | 0,52 | 1 |
| 3 | 0,10 | 0,76 | 0,99 | 0,98 | 0,52 | 1 |
| 4 | 0,44 | 0,56 | 0,87 | 0,98 | 0,68 | 3 |
| 5 | 0,44 | 0,63 | 0,97 | 0,98 | 0,72 | 4 |
| 6 | 0,44 | 0,69 | 0,99 | 0,98 | 0,74 | 5 |
| 7 | 0,78 | 0,40 | 0,71 | 0,97 | 0,68 | 3 |
| 8 | 0,78 | 0,53 | 0,97 | 0,98 | 0,79 | 7 |
| 9 | 0,78 | 0,63 | 0,99 | 0,98 | 0,83 | 9 |
| 10 | 0,94 | 0,30 | 0,64 | 0,97 | 0,65 | 2 |
| 11 | 0,94 | 0,43 | 0,97 | 0,97 | 0,79 | 7 |
| 12 | 0,94 | 0,59 | 0,99 | 0,98 | 0,86 | 10 |

Расчетные значения сроков службы указывают на появление усталостных деформаций в рамках данного уровня надежности.

Проведенное исследование позволило выявить связь между физико-механическими свойствами асфальтобетона ($I_{пл}$, R_c , n_y) и его сроком службы до появления деформаций усталостного характера. Результаты, вычисленные на основании обработки данных расчетов № 1–12 (табл. 1, 2), сведены в табл. 3, а полученные зависимости отображены на рис. 7.

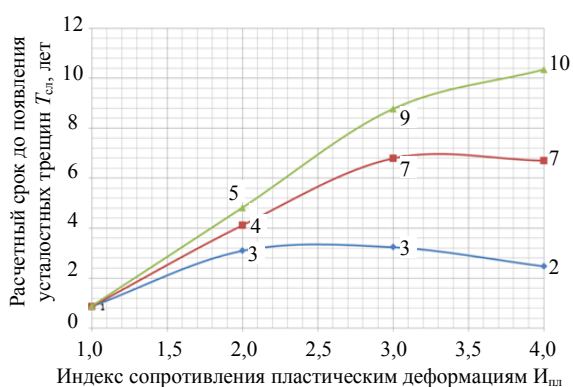


Рис. 7. Изменение сроков службы покрытия:
 — асфальтобетон на обычном битуме;
 — асфальтобетон на модифицирующей добавке (термопласт); — асфальтобетон на модифицированном битуме (термоэластопласт)

Fig. 7. Change in service life of pavement: — asphalt concrete on normal bitumen; — asphalt concrete with modifying additive (thermoplast); — asphalt concrete with modified bitumen (thermoplastic elastomer)

Интересным является наличие экстремума повышения срока службы от показателя устойчивости к пластическим деформациям (рис. 7),

что заметно как для традиционных асфальтобетонов, так и для модифицированных. Связано это с тем, что с ростом устойчивости к пластическим деформациям может снижаться температурная трещиностойкость и, как доказано нашими исследованиями, усталостная долговечность.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Повышение индекса сопротивления пластическим деформациям для асфальтобетонов на обычном битуме позволит улучшить характеристики покрытия только по устойчивости к сдвиговым деформациям, однако условия работы по остальным критериям ухудшатся, и после определенного значения параметра $I_{пл}$ (в исследовании равно 3,0) долговечность уменьшится.

2. Модификация асфальтобетона добавками различного типа целесообразна только при достижении высоких значений физико-механических свойств. С технической точки зрения, исходя из значений расчетных сроков службы, она рациональна модифицирующими добавками группы «термопласты», полимерными – при достижении следующих показателей физико-механических свойств: $I_{пл} \geq 2,7-3,0$; $R_c \geq 5,3$ МПа; $n_y \leq 0,46$. При применении модифицированных битумов с добавками группы «термоэластопласты» свойства должны соответствовать следующим требованиям: $I_{пл} \geq 2,7-3,0$; $R_c \geq 5,5$ МПа; $n_y \leq 0,41$.

Таблица 3

Сопоставление расчетных характеристик и сроков службы
 Comparison of calculated characteristics and service life

| Индекс сопротивления пластическим деформациям $I_{пл}$ | Максимальная структурная прочность R_c , МПа, для материала № | | | Параметр n_y для материала № | | | Срок службы $T_{ср}$, лет, для материала № | | |
|--|---|-------------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------|---|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1,0 | 4,61 | 4,76 | 4,87 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 1 | 1 | 1 |
| 2,0 | 4,77 | 4,99 | 5,10 | 0,42 | 0,40 | 0,38 | 3 | 4 | 5 |
| 3,0 | 5,01 | 5,31 | 5,52 | 0,47 | 0,43 | 0,40 | 3 | 7 | 9 |
| 4,0 | 5,32 | 5,74 | 6,14 | 0,51 | 0,46 | 0,41 | 2 | 7 | 10 |

Обозначения: 1 – асфальтобетон на обычном битуме; 2 – то же на модифицирующей добавке (термопласт); 3 – то же на модифицированном битуме (термоэластопласт).

ВЫВОДЫ

1. Срок службы (с момента открытия движения до появления усталостных дефектов в виде трещин) нижнего конструктивного слоя покрытия дорожной одежды при использовании асфальтобетона на обычном вяжущем составил три года. В случае применения для приготовления смеси модифицирующих полимерных добавок и модифицированных битумов расчетный срок службы может увеличиться до восьми лет. Полученные результаты объективны при достижении характеристик асфальтобетона, которые являются наиболее характерными при модификации асфальтобетонных компонентами различных типов (характеристики приведены выше).

2. Если одинаковые физико-механические свойства асфальтобетонов ($I_{пл}$) достигнуты на обычном битуме с применением добавок и на модифицированном битуме, то расчетные сроки службы будут больше на модифицированных асфальтобетонах на три-пять лет. Причем данный эффект достигается при индексах сопротивления пластическим деформациям 2,0 и более.

3. Устойчивость конструкции к пластическим деформациям выше при модификации асфальтобетонов многокомпонентными полимерными добавками (частный уровень надежности P_1), однако общий уровень надежности и циклическая долговечность материала по всем критериям прочности, как правило, могут быть выше в случае применения модифицированных битумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веренько, В. А. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько. Минск: АртДизайн, 2015. 291 с.
2. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115–2013. Введ. 07.01.2014. Минск: БелдорНИИ: Госстандарт Беларуси, 2014. 39 с.
3. Веренько, В. А. Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства / В. А. Веренько. Минск: Навука і тэхніка, 1993. 246 с.
4. Печеный, Б. Г. Битумы и битумные композиции / Б. Г. Печеный. М.: Химия, 1990. 256 с.

5. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия: СТБ 1033–2016. Минск: Минстройархитектуры, 2016. 26 с.
6. Веренько, В. А. Новые материалы в дорожном строительстве / В. А. Веренько. Минск: Технопринт, 2004. 170 с.
7. Веренько, В. А. Надежность дорожных одежд / В. А. Веренько. Минск: БГПА, 2002. 120 с.
8. Золотарев, В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. Харьков: Изд-во ХГУ, 1978. 112 с.
9. Веренько, В. А. Деформации и разрушения дорожных покрытий: причины и пути устранения / В. А. Веренько. Минск: Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2008. 304 с.
10. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов: ТКП 45-3.03-3–2004 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2006. 27 с.

Поступила 04.05.2018

Подписана в печать 11.07.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

REFERENCES

1. Verenko V. A. (2015) *Durable Asphalt-Concrete Pavements of Automotive Roads, Bridges and Streets*. Minsk, ArtDizayn Publ. 291 (in Russian).
2. *STB 1115–2013. Road, Airdrome Bitumen-Concrete Mixtures and Asphalt Concrete. Test Methods*. Minsk, Publishing House of Belarusian Road Scientific-Research Institute, State Standard of Belarus, 2014. 39 (in Russian).
3. Verenko V. A. (1993) *Road Composite Materials. Structure and Mechanical Properties*. Minsk, Navuka i Tekhnika. 246 (in Russian).
4. Pecheny B. G. (1990) *Bitumen and Bitumen Compositions*. Moscow, Khimiya Publ. 256 (in Russian).
5. *STB 1033–2016. Road, Airdrome Bitumen-Concrete Mixtures and Asphalt Concrete. Technical Specifications*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2016. 26 (in Russian).
6. Verenko V. A. (2004) *New Materials in Road Construction*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 170 (in Russian).
7. Verenko V. A. (2002) *Reliability of Road Dressings*. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy. 120 (in Russian).
8. Zolotarev V. A. (1978) *Durability of Road Asphalt-Concrete*. Kharkov, Publishing House of Kharkov State University. 112 (in Russian).
9. Verenko V. A. (2008) *Deformation and Destruction of Road Pavements: Causes and How to Remove Them*. Minsk, Publishing House Belaruskaya Entsyklopedyya imya P. Broyki. 304 (in Russian).
10. *TKP [Technology Code of Practice] 45-3.03-3–2004 (02250). Designing of Road Dressings for Streets and Roads at Populated Areas*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2006. 27 (in Russian).

Received: 04.05.2018

Accepted: 11.07.2018

Published online: 30.11.2018