

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУЖЕНЬ В АСФАЛЬТОБЕТОНІ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Маляр В. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Показана оцінка температурних напружень в асфальтобетоні під час охолодження та запропонований метод визначення температури крижкості асфальтобетону на основі скінченно-елементної моделі. Установлено, що у вільному від обмеження переміщень зразку асфальтобетону виникають внутрішні температурні напруження в процесі охолодження за рахунок різниці коефіцієнтів температурного розширення бітуму й кам'яних матеріалів.

Ключові слова: асфальтобетон, бітум, модуль пружності, метод скінченних елементів, температурні напруження, температура крижкості.

Вступ

Як відомо, основні руйнування асфальтобетонного покриття автомобільних доріг – це колійність, поперечне розтріскування, втомні руйнування, лущення тощо. За умови охолодження покриття низькотемпературні uszkodження можуть виникати з двох причин. По-перше: термічні uszkodження у вигляді поперечного розтріскування, які напряму не пов'язані з транспортним навантаженням, виникають через зовнішнє обмеження переміщення шару покриття в одному напрямку. По-друге: асфальтобетон може бути пошкоджений також без зовнішнього механічного впливу, коли в процесі охолодження створюються локальні розтягувальні напруження через різницю коефіцієнта температурного розширення бітуму та кам'яного матеріалу. Джерела uszkodжень, що призводять до таких відмов, не досить добре вивчені, тому така проблема є актуальною [1].

Аналіз публікацій

В аналітичних розрахунках напружено-деформованого стану асфальтобетону використовуються вихідні дані властивостей компонентів, таких як модуль пружності кам'яного матеріалу, коефіцієнт поперечної деформації, коефіцієнт лінійної температурної деформації, індекс penetрації та температура розм'якшення бітуму [2].

Однак бітум, який потрапляє на мінеральні зерна в асфальтобетоні, змінює структуру й властивості в приграничній зоні. Це так званий орієнтований шар бітуму, який за товщиною умовно поділяють на тверду, структуровану й дифузну зону [3]. Кожна зона характеризується своєю особливою структурою, що відрізняється від структури

об'ємного бітуму. Так, тверда зона здебільшого представлена адсорбційним шаром; структурована – упорядковано розташованими високомолекулярними компонентами бітуму, витягнутими в ланцюжок і орієтованими в напрямку мінеральної підкладки; дифузна, у якій в'язуче частково має упорядковану будову. Різкого переходу між орієтованим шаром і об'ємним бітумом, а також усередині шару між зонами немає. Автори [3] роблять висновок, що залежно від природи, розміру зерна мінерального матеріалу, а також від складу бітуму, товщина орієтованого шару змінюється від часток мікрметра до декількох мікрметрів.

Орієнтований шар бітуму міцніший (більш в'язкий) порівняно з об'ємним бітумом. Зміни в'язкості бітуму в орієтованому шарі можна врахувати відповідно до зміни температури склування, оскільки з підвищенням в'язкості бітуму зростає його температура склування, а також температура крижкості й температура розм'якшення. Температура склування досить чутлива до зміни складу й структури бітуму, зокрема й для бітуму, що міститься в орієтованому шарі. Так, у [4] установлено, що температура склування бітуму збільшується на 6–10° С із наповненням його мінеральним порошком до першої структуроутворювальної концентрації (50–70 % мінерального порошку за об'ємом).

Можна припустити, що температура склування асфальтобетону – це середня температура склування бітуму, що перебувають частково в орієтованому й частково у вільному стані. Для кожного типу асфальтобетону можна розрахувати товщину бітумної плівки на мінеральних зернах в асфальтобе-

тонній суміші з відомою питомою поверхнею та оптимальною й мінімальною кількістю бітуму [3]. Значення цих товщин дасть змогу оцінити стан бітуму в асфальтобетоні; наскільки він близький до орієнтованого або до вільного стану (тобто дає співвідношення частки обсягів об'ємного та структурованого бітуму). Гіпотеза про наявність в асфальтобетоні орієнтованого (структурованого) бітуму має дискусійний характер [5].

Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи було визначення напружено-деформованого стану всередині об'єму асфальтобетону в процесі охолодження на основі двокомпозиційної об'ємної моделі з використанням методу комп'ютерного моделювання та з урахуванням зміни властивостей структурованого бітуму.

Дослідження температурних напружень

Розглядається балка з асфальтобетону як композиційного двофазного пружного матеріалу [6]. Композит складається з кубиків кам'яного матеріалу з ребром 5 мм, відстань між ними – 0,25 мм, і в'язучим – бітумом (модель запропонована проф. Радовським Б.С.).

Спочатку для прийнятої моделі була оцінена гіпотеза про лінійність композиту й застосовність лінійної теорії в'язкопружності для розрахунку температурних напружень. Розглядається тривимірна задача для стрижня, де об'ємні частки двофазної системи: бітуму $C_1 = 0,157$ і кам'яного матеріалу $C_2 = 0,843$. Кінці стрижня кінематично вільні, до них прикладене задане осьове розтягувальне навантаження, що рівномірно розподілене по торцевих перетинах, яке викликає розтягувальні напруження σ . Задані об'ємні частки двофазної системи C_1 і C_2 , модулі E_1 , E_2 і коефіцієнти Пуассона ν_1 , ν_2 бітуму й кам'яного матеріалу, прикладені різні навантаження, значення яких будуть у діапазоні очікуваних у процесі охолодження, тобто до 2 МПа. Для розрахунку прийняті значення для бітуму – $E_1 = 62$ МПа, $\nu_1 = 0,45$; для кам'яного матеріалу – $E_2 = 50000$ МПа, $\nu_2 = 0,15$. Розраховано подовження стрижня (рис. 1).

Результат розрахунку подовження від прикладеного навантаження показав, що модель композиту має лінійні властивості в області розглянутих розтягувальних напружень.

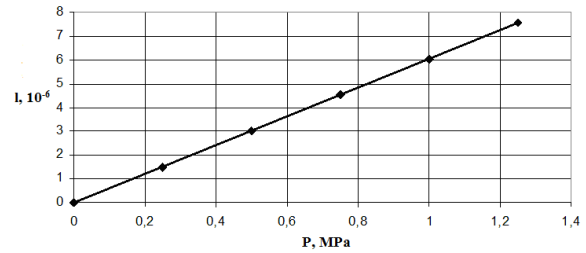
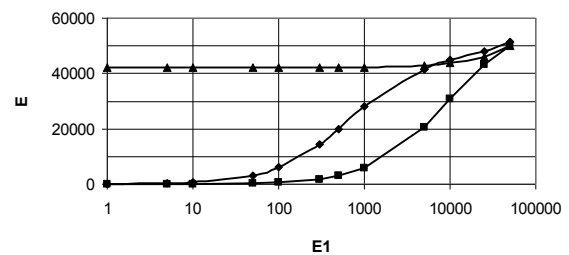


Рис. 1. Подовження стрижня (у м) від прикладеного навантаження (тиску)

Другим етапом розрахунків було визначення значень модуля пружності E для композиту за умови зміни модуля бітуму E_1 . Оцінку значень ефективного модуля пружності проводили за Фойгтом–Рейссом [2]. Нижня межа відповідає модулю композиції E_R , який визначається шляхом усереднення податливості компонентів, верхня – шляхом усереднення модулів пружності з урахуванням об'ємної частки складників:

$$E_R = \frac{1}{c_1 / E_1 + c_2 / E_2}, \quad E_V = c_1 E_1 + c_2 E_2. \quad (1)$$

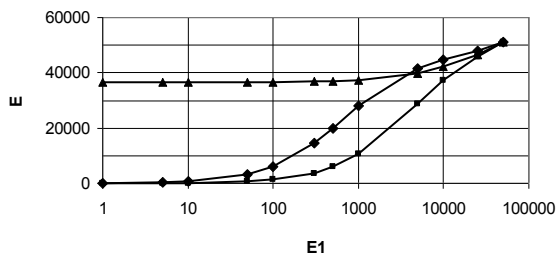
Можливі мінімальні й максимальні значення модуля композита, що визначені за формулами (1), не залежать від геометричних форм складників і від того, яка з компонент є матрицею, а яка – дисперсною фазою. Результати розрахунку показали, що модуль пружності композиту в моделі, що прийнята, перебуває в межах вилки Фойгта–Рейсса (рис. 2).



Нижня E_R (■) і верхня E_V (▲) межа ефективного модуля за Фойгтом–Рейссом (МПа)
Рис. 2. Значення модуля пружності композиту E_c (◆)

Також оцінені ефективні пружні характеристики композиту по верхній і нижній межі Хашина–Штрікмана [7] (рис. 3). Ця оцінка базується на класичних теоремах про мінімуми енергії для пружних тіл. Вилка Хашина–Штрікмана вужча за вилку Фойгта–

Рейсса, але вона також не враховує інформацію про геометрію складників композиту. Модуль пружності композиту в прийнятій моделі також перебуває в межах вилки Хашина–Штрікмана.



Нижня (■) і верхня (▲) межа ефективного модуля за Хашином–Штрікманом (МПа)
Рис. 3. Значення модуля пружності композиту E_c (◆)

Коли модуль пружності включення набагато більший, ніж модуль матриці, модуль композиту наближається до нижньої межі вилки. Якщо модулі пружності компонентів відрізняються не більш ніж у 10 разів, то значення модуля композиту наближаються до верхньої межі вилки. Це стосується як оцінки за Хашином–Штрікманом, так і до оцінки за Фойгтом–Рейссом.

Коефіцієнти Пуассона бітуму та кам'яного матеріалу відрізняються не так сильно, як модулі пружності, не більше ніж утричі, і тому їхня оцінка є не такою актуальною.

Раніше були отримані результати розрахунку температурних напружень методом скінченних елементів у асфальтобетоні під час охолодження [6]. Аналіз отриманих результатів показав, що розрахункові значення середніх напружень менші за експериментальні, що отримані різними авторами для бітуму однієї й тієї самої марки [8, 9]. Розрахункові й експериментальні криві не збігаються за температурою в середньому на 5 °С. Можливо, це пов'язано з тим, що частина бітуму в асфальтобетоні перебуває в структурованому стані, із набагато більшою в'язкістю, ніж у вільному стані, і це потрібно враховувати у введенні вихідних даних для розрахунку напружень.

Для асфальтов'язучих на бітумах різних марок, типів і на різних за своєю природою мінеральних порошках отримана узагальнена залежність (рис. 4), яка показує, що підвищення температури склування будь-якої пари бітум-мінеральний порошок, що взаємодіє, визначається ступенем відхилення фактичної

товщини шару бітуму від товщини його адсорбційно-сольватного шару.

З високим ступенем кореляції, подібно до основної формули в структурній теорії міцності асфальтов'язучого Риб'єва І.А. [10], цю узагальнену залежність можна описати рівнянням:

$$T_g = T_g^{cmp} \left(\frac{\delta_{cmp}^*}{\delta} \right)^{0,03}, \quad (2)$$

де T_g , δ – відповідно температура склування й товщина плівки бітуму в асфальтов'язучому довільного складу; T_g^{cmp} – температура склування асфальтов'язучого за умови товщини адсорбційно-сольватного шару δ_{cmp}^* .

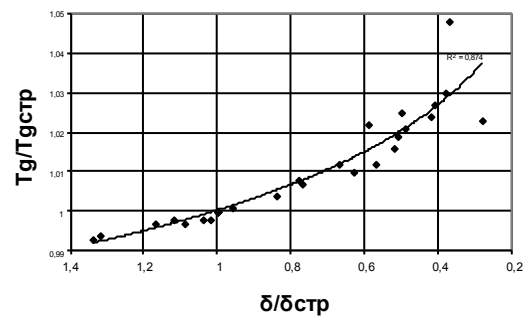


Рис. 4. Узагальнена в наведених координатах залежність температури склування асфальтов'язучого від товщини плівки бітуму

Значення δ_{cmp}^* були отримані на основі залежностей температури склування бітумів різних марок і структурних типів від об'ємної частки кварцового й вапнякового мінерального порошку.

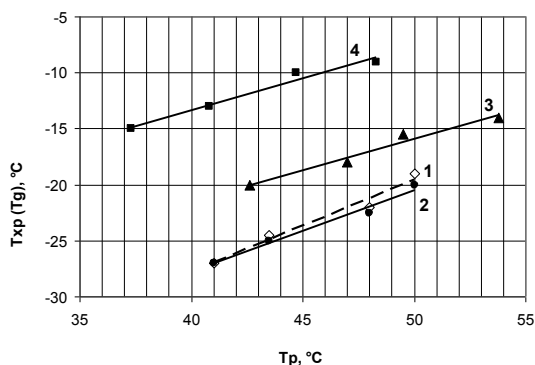
Відповідно до формули (2), рекомендованих ДСТУ 119 зернових складів мінеральної частини асфальтобетонних сумішей і значень вмісту бітуму, розраховані зміни значень температур склування бітуму, який міститься в асфальтобетоні порівняно з його значенням у вільному стані (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення змін температури склування бітуму

Марка бітуму	ΔT_g , °С для асфальтобетону типу				
	А	Б	В	Г	Д
БНД 40/60	7,7	6,2	5,2	7,0	5,9
БНД130/200	7,4	5,9	4,9	6,6	5,6

Така різниця температури склування (температури крихкості) – 5,0 ... 7,5 °С спостерігається в бітумах, які відрізняються за в'язкістю на 3–4 марки. Отже, урахування зміни в'язкості бітуму в контактній зоні асфальтобетону можна проводити на основі даних табл. 1 для кожного конкретного типу асфальтобетону й на основі залежності взаємозв'язку температури розм'якшення й температури крихкості (рис. 5).

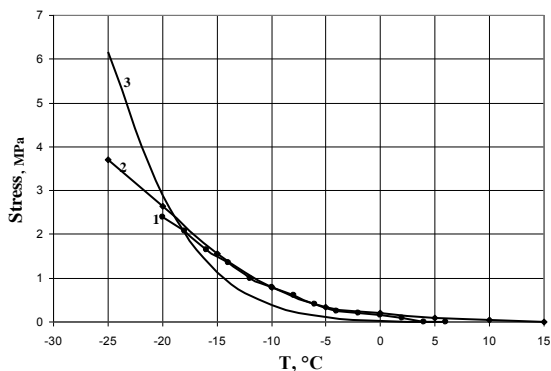
Залежність (рис. 5) показує, що збільшення температури крихкості (склування) на 5 °С призводить до збільшення температури розм'якшення на 6–8 °С.



--- температура крихкості (T_{xp}); --- температура склування (T_g); 1, 2 – окислені бітуми; 3 – бітуми Лисичанського НПЗ; 4 – залишкові бітуми

Рис. 5. Залежність між температурою розм'якшення (T_p) і температурою крихкості (склування)

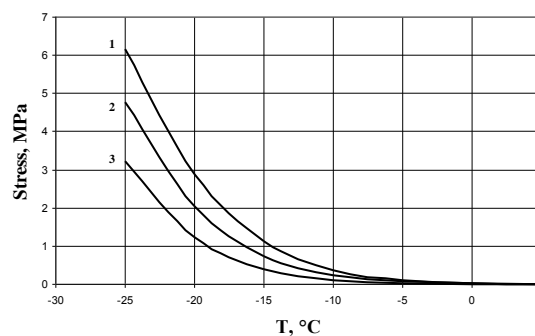
З урахуванням зміни в'язкості (температури розм'якшення) структурованого бітуму були розраховані середні температурні напруження в асфальтобетоні під час охолодження (рис. 6, крива 3). Отримані розрахункові дані близькі до експериментальних результатів.



1 – за даними [8]; 2 – за даними [9], вміст бітуму 5,6 %; 3 – розрахункові значення
Рис. 6 – Середні температурні напруження в асфальтобетоні на бітумі 50/70 у процесі охолодження за методом TSRST

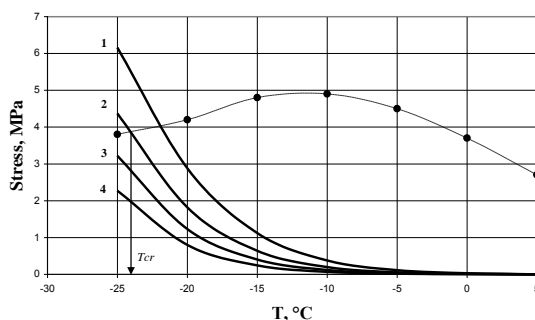
Також з урахуванням зміни в'язкості структурованого бітуму були отримані залежності температурних напружень в асфальтобетоні від швидкості охолодження (рис. 7) і на бітумах різних марок (рис. 8). Аналогічні залежності можна отримати від вмісту бітуму і на бітумах різних структурно-реологічних типах.

На залежності (рис. 8) дана крива міцності асфальтобетону на розтяг під час згинання.



Швидкість охолодження, °/год: 1 – 10; 2 – 5; 3 – 2

Рис. 7. Розрахункові значення середніх температурних напружень в асфальтобетоні на бітумі БНД 40/60



1 – БНД 40/60; 2 – БНД 60/90; 3 – БНД 90/130; 4 – БНД 130/200

Рис. 8. Розрахункові значення середніх температурних напружень в асфальтобетоні за умови швидкості охолодження 10 °/год (—) і міцність асфальтобетону (- -)

Досягнення температурних розтягувальних напружень значень міцності під час згинання може бути температурою утворення тріщини в асфальтобетоні за умови його роботи в покритті в процесі охолодження (T_{cr}). На цій залежності прийнята швидкість охолодження за методом TSRST, що міститься в стандарті [11].

Розподіл розтягувальних температурних напружень під час охолодження всередині об'єму моделі асфальтобетону зображено на рис. 9 і 10. Найбільші розтягувальні напру-

ження від охолодження затиснутого зразка виникають як в кам'яному матеріалі, так і в бітумі. Неоднорідність розподілу напружень у цих різних компонентах композиту становить не більше ніж 20 %. Можливо, це відбувається за рахунок прийнятої геометрії кам'яних матеріалів.

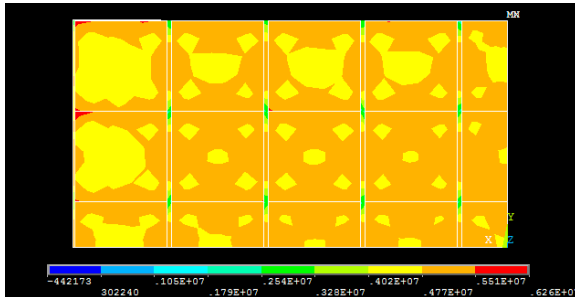


Рис. 9. Розподіл розтягувальних напружень уздовж балки (Па)

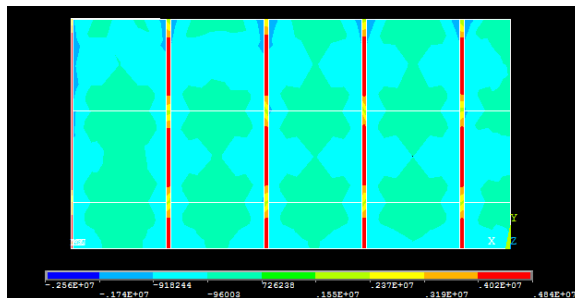


Рис. 10. Розподіл розтягувальних напружень поперек балки (Па)

Поздовжні деформації плівки бітуму, що розташовані поперек стрижня, найбільші порівняно з деформаціями кам'яних матеріалів і поперечних деформацій плівки бітуму, розташованих уздовж стрижня. Отже, за умови приблизно однакових розтягувальних напружень у кам'яних матеріалах і бітумі деформацій більше в бітумі за рахунок його меншого модуля пружності (рис. 9).

Водночас, якщо розглянути поперечні напруження в композиті, то можна побачити, що в кам'яному матеріалі ці напруги мінімальні (до 10 % від поздовжніх). У прошарках бітуму, розташованих поперек стрижня, поперечні напруги становлять до 87 % від поздовжніх (рис. 10). У цьому разі поперечні деформації плівки бітуму мінімальні. Виникнення цих поперечних розтягувальних напружень у бітумі під час охолодження можна пояснити різними коефіцієнтами температурного розширення бітуму та кам'яного матеріалу, значення яких відрізняються між собою впр'ятеро.

У процесі охолодження асфальтобетону, без його защемлення та зовнішнього навантаження, у ньому локально будуть розвиватися розтягувальні напруження. Величина цих напружень може бути порівняна з температурними напруженнями, що виникають від обмеження вільного переміщення. Значення цих напружень також будуть залежати від швидкості охолодження, від вмісту бітуму, його в'язкості та структури.

Висновки

Запропонована проста тривимірна геометрична модель асфальтобетону, що складається з кубиків кам'яного матеріалу і в'язучих прошарків бітуму. Оцінена гіпотези про лінійність такого композиту й застосовності лінійної теорії в'язкопружності для розрахунку температурних напружень.

Методом скінченно-елементного аналізу розраховані середні температурні напруження в асфальтобетоні під час охолодження з урахуванням підвищення в'язкості частки бітуму, який перебуває в структурованому стані в асфальтобетоні. Таке врахування реалізовано на основі зміни низки властивостей бітуму в контактній зоні, зокрема зміни температури склування.

Показано, що температурні напруження, які виникають під час охолодження за рахунок обмеження переміщень асфальтобетону в конструкції, досягають значень міцності за умови від'ємних температур, що може бути використано в оцінюванні температури утворення тріщини в асфальтобетоні за умови його роботи в покритті (T_{cr}). Значення цих напружень залежать від швидкості охолодження, вмісту бітуму, його в'язкості та структури.

У вільному від обмеження переміщень зразку асфальтобетону також виникають внутрішні температурні напруження під час охолодження за рахунок різниці коефіцієнтів температурного розширення бітуму й кам'яних матеріалів. Ці напруження становлять до 87 % від середніх температурних напружень, що виникають у затисненому зразку.

Література

1. Michael Elwardany, Jean-Pascal Planché, Gayle King Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced surface damage *Construction and Building Materials* 255 (2020) 119331. ELSEVIER. P. 1–18.
2. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стан-

- дартным показателям. Алматы: Білім баспасы, 2013. 152 с.
3. Королев И.В., Агеева Е.Н., Головкин В.А., Фоменко Г.Р. Дорожный теплый асфальтобетон. Киев: Вища школа, 1984. 200 с.
 4. Золотарьов В.А., Ясенюк С.В. Температура стеклования как характеристика структурного и физического состояния асфальтовых систем *Технические, реологические и поверхностные свойства битумов*. Избранные труды. Т. 1. Санкт-Петербург: Славутич, 2013. С. 72–75.
 5. Радовский Б.С. Современные требования к каменным материалам для асфальтобетонных смесей в США *Дорожная техника*. 2009. С. 24–35.
 6. Маляр В.В. Метод определения температурных напряжений в асфальтобетоне с помощью метода конечных элементов *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2016. Вып. 72. С. 102–106.
 7. Hashin Z. and Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*. Vol. 11, 1963. P. 127–140.
 8. Pszczoła M., Judycki J. Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers In Comparison with TSRST Test Results *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*. RILEM. 2012. P. 41–49.
 9. Блажеёвский К., Олышакский Я., Печакковский Х. Битумный справочник. Poland: Płock, 2014. 142 с. (www.orlen-asfalt.pl).
 10. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учеб. пособие для строит. спец. вузов. Москва: Высшая школа, 2004. 701 с.
 11. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests; German version EN 12697-46: 2012.
 5. Radovskij B.S. Sovremennye trebovaniya k kamennym materialam dlja asfal'tobetonnyh smesej v SShA *Dorozhnaja tehnika*. 2009. S. 24–35.
 6. Maljar V.V. Metod opredelenija temperaturnyh naprjazhenij v asfal'tobetone s pomoshh'ju metoda konechnyh jelementov *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2016. Vyp. 72. S. 102–106.
 7. Hashin, Z. and S. Shtrikman. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*. Vol. 11, 1963. P. 127–140.
 8. Pszczoła M., Judycki J. Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers In Comparison with TSRST Test Results *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*. RILEM. 2012. P. 41–49.
 9. Blazhejovskij K., Ol'shakovskij Ja., Pechakovskij H. Bitumnyj spravocnik. Poland: Płock, 2014. 142 s. (www.orlen-asfalt.pl).
 10. Ryb'ev I.A. Stroitel'noe materialovedenie: Ucheb. posobie dlja stroit. spec. vuzov. Moskva: Vysshaja shkola, 2004. 701 s.
 11. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests; German version EN 12697-46: 2012.

Маляр Володимир Володимирович, к.т.н., доц. каф. технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, vladimirmayar16@gmail.com, тел. +38 067-718-99-41
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Determining thermal stresses in asphalt concrete by the method of computer simulation

Abstract. Problem. The main destructions of asphalt concrete pavement are rut, transverse cracking, fatigue failures, peeling, etc. When the pavement cools, low-temperature damages can occur for various reasons. The sources of damages that cause such failures are not well studied, so this problem is relevant.

Goal. The aim of this work was to determine the stress-strain state inside the volume of asphalt concrete during cooling on the basis of a two composite three-dimensional model using the method of computer simulation in response to the changing structured bitumen properties. **Methodology.** The method of finite element analysis of the stress-strain state of the composite material was used. The material is represented by a three-dimensional (3D) model proposed by prof. B.S. Radovsky. **Results.** The finite element analysis method was used to calculate the average thermal stresses in asphalt concrete during cooling in accordance with increase of viscosity of bitumen section, which is located in asphalt concrete in a structured state. This consideration is realized on

References

1. Michael Elwardany, Jean-Pascal Planche, Gayle King Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced surface damage *Construction and Building Materials* 255 (2020) 119331. ELSEVIER. P. 1–18.
2. Radovskij B.S., Teltaev B.B. Vjazkouprugie harakteristiki bituma i ih ocnenka po standartnym pokazateljam. Almaty: Bilim baspa-sy, 2013. 152 s.
3. Korolev I.V., Ageeva E.N., Golovko V.A., Fomenko G.R. Dorozhnyj teplyj asfal'tobeton. Kyiv: Vishha shkola, 1984. 200 s.
4. Zolotar'ov V.A., Jasenok S.V. Temperatura steklovanija kak harakteristika strukturnogo i fizicheskogo sostojanija asfal'tovyh sistem *Tehnicheskie, reologicheskie i poverh-nostnye svojstva bitumov*. Izbrannye trudy. T. 1. Sankt-Peterburg: Slavutich, 2013. S. 72–75.

the basis of changes in a number of bitumen properties in the contact zone, in particular, the changes in the glass transition temperature. It is shown that the thermal stresses that occur during cooling by limiting the movement of asphalt concrete in the construction reach the strength values at negative temperatures, which can be used to estimate the temperature of crack formation in asphalt concrete under the condition of its action in pavement (T_{cr}). The values of these stresses depend on the cooling rate, the bitumen content, its viscosity and structure. **Originality.** For the first time, it was found numerically that in the sample of asphalt concrete, which is free from restriction of movements, there are internal thermal stresses during cooling due to the difference of bitumen thermal expansion coefficients and stone materials. These stresses are up to 87 percent of the aver-

age thermal stresses that occur in the compressed sample. **Practical value.** The possibility of rapid estimation of thermal stresses with the possibility of predicting low-temperature cracks in asphalt concrete is shown.

Key words: *asphalt concrete, bitumen, modulus of elasticity, the finite element method, thermal stresses, brittle transition temperature.*

Maliar Volodymyr, Ph.D., Assoc. Prof. Department of technologies of road-building materials and chemistry, vladimirmayar16@gmail.com, тел. +38 067-718-99-41

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
