

## ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 625.85

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. Маляр, доц., к.т.н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Предложен метод определения температурных напряжений в асфальтобетоне на основе конечноэлементной модели. Показана возможность быстрой оценки температурных напряжений в асфальтобетоне с возможностью прогнозирования низкотемпературных трещин.

*Ключевые слова:* асфальтобетон, битум, модуль упругости, модуль релаксации, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУЖЕНЬ  
В АСФАЛЬТОБЕТОНІ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В.В. Маляр, доц., к.т.н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Запропоновано метод визначення температурних напружень в асфальтобетоні на основі скінченноелементної моделі. Показано можливість швидкої оцінки температурних напружень в асфальтобетоні з можливістю прогнозування низькотемпературних тріщин.

*Ключові слова:* асфальтобетон, бітум, модуль пружності, модуль релаксації, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.

METHOD FOR DETERMINATION OF THERMAL STRESS IN ASPHALT  
CONCRETE BY FINITE ELEMENT METHOD

V. Maliar, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),

Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* A method for determination of thermal stress in asphalt concrete which is based on finite-element model is offered. The possibilities of quick estimating the thermal stress in asphalt concrete and prediction of low-temperature cracks are shown.

*Key words:* asphalt concrete, bitumen, modulus of elasticity, relaxation modulus, the finite element method, strain stressed state.

## Введение

В асфальтобетонном дорожном покрытии при охлаждении возникают температурные напряжения вследствие трения слоя асфальтобетона с нижележащим основанием, которое противодействует сжатию. Если температурные напряжения достигают значений

прочности асфальтобетона на растяжение, то образуются трещины, перпендикулярные оси дороги, с примерно одинаковым интервалом (4–100 м). Эти трещины служат очагами миграции влаги и противогололедных реагентов в основании с образованием ледяных линз и впоследствии с локализацией разрушений.

Образование температурных трещин – это один из основных видов разрушения дорожного покрытия, поэтому прогнозирование трещинообразования, правильный расчет конструкций дорожных одежд и выбор материалов по критерию трещиностойкости остается актуальной задачей.

### Анализ публикаций

Подходы, связанные с прогнозированием образования температурных трещин в асфальтобетонных покрытиях, можно разделить на три группы: 1 – уравнения регрессий; 2 – механические модели; 3 – лабораторные испытания. Примером первой группы может служить уравнение, связывающее расстояния между поперечными температурными трещинами со свойствами материала, толщиной асфальтобетонного покрытия, минимальной температурой охлаждения [1]. Ко второй группе можно отнести математические модели, описывающие механическое поведение асфальтобетона с предысторией, например [2, 3]. Для третьей группы, из всего многообразия приборов и методов, определяющих температурные напряжения и температуру трещинообразования асфальтобетона, можно представить пример методики определения коэффициента температурной трещиностойкости асфальтобетона [4].

### Цель и постановка задачи

Целью данной работы было определение напряженно-деформированного состояния внутри объема асфальтобетона при его охлаждении на основе двухкомпозиционной объемной модели с использованием метода конечных элементов.

Для упругого материала температурные напряжения определяются нереализованной деформацией при изменении температуры  $\Delta T$

$$\sigma_x = E\alpha\Delta T, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейной температурной деформации.

Особенности решения для вязкоупругого материала следующие. Изменение температуры на  $dT$  в промежутке времени  $d\tau$  приводит к изменению деформации

$$d\varepsilon_x(\tau) = \alpha dT. \quad (2)$$

Температурная деформация не реализована и поэтому возникает напряжение

$$d\sigma_x(\tau) = E(\tau)d\varepsilon_x(\tau), \quad (3)$$

где  $E(\tau)$  – модуль релаксации вязкоупругого материала.

Чтобы найти напряжение в стержне в момент времени  $t$ , суммируют его приращения за все предшествующие моменты времени [2]

$$\sigma_x = \int_{t_0}^t E(\tau)\alpha\left[\frac{d}{d\tau}T(\tau)\right]dt, \quad (4)$$

где  $\tau = t_2 - t_1$  – разница между текущим и предшествующим временем;  $\frac{d}{d\tau}T(\tau)$  – скорость изменения температуры  $v$ .

Коэффициент  $\alpha$  принимается как постоянная величина. В случае, когда коэффициент линейной температурной деформации – не постоянная величина при изменении температуры от  $T_0$  до  $T$ , можно принять его среднее значение по формуле

$$\alpha = \frac{\int_{T_0}^T \alpha(T)dT}{T - T_0}. \quad (5)$$

Такой подход принят исходя из того, что при изменении температуры (от начальной к конечной) материал может переходить из одного физического состояния в другое, каждое из которых характеризуется некими физическими показателями.

Если скорость изменения температуры постоянная, то напряжения в стержне определяются по более простой формуле

$$\sigma_x = \alpha v \int_{t_0}^t E(\tau)dt, \quad (6)$$

где  $\int_{t_0}^t E(\tau)dt$  – сумма модулей релаксации за время  $t$ .

Существуют формулы определения модуля релаксации битума как вязкоупругого мате-

риала, в зависимости от его вязкости и времени действия нагрузки [5].

### Методика проведения исследования

Рассматривается балка из асфальтобетона как композиционного материала. Композит состоит из кубиков каменного материала и связующего битума (модель предложена проф. Радовским Б.С.). Предлагается осесимметричная задача (рис. 1). Балка имеет ограничения перемещений по торцам, температура постоянная по толщине и изменяется во времени. Требуется определить среднее напряжение в балке во времени  $\sigma_x(t)$ , а также концентрации напряжений в самом материале от неоднородности структуры при постоянной скорости охлаждения  $v$ .

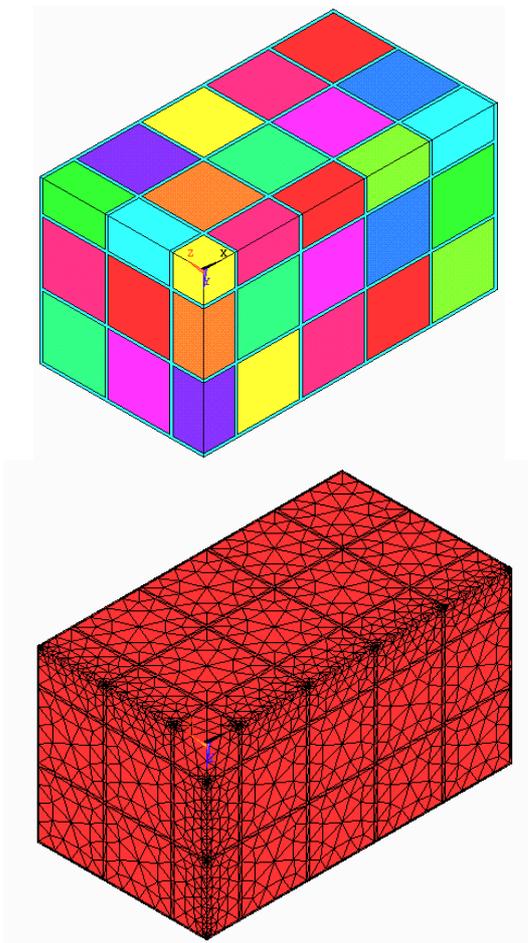


Рис. 1. Геометрическая и КЭ модель асфальтобетона

Рассматривается начальное (при температуре  $T_0$  в момент времени  $t_0$ ) и конечное состояние асфальтобетона (при температуре  $T$  в момент времени  $t$ ).

Предлагаемая модель асфальтобетона как композита, состоящего из упругих каменных (минеральных) материалов и вязкоупругого битумного связующего, характеризуется разным набором физических показателей. Для каменных материалов – это модуль упругости  $E$ , коэффициент поперечной деформации  $\mu$  и коэффициент линейной температурной деформации  $\alpha$ . Для битума – это средний модуль релаксации  $E_a$ , определяемый по формуле (7), коэффициент поперечной деформации  $\mu$  и коэффициент линейной температурной деформации  $\alpha$ , определяемый по формуле (5).

Средний модуль релаксации битума рассчитывался как

$$E_a = \frac{v \int_{t_0}^t E(\tau) dt}{\Delta T}, \quad (7)$$

тогда формула (6) принимала вид, подобный формуле (1) для упругого материала

$$\sigma_x = E_a \alpha \Delta T. \quad (8)$$

Физические показатели компонентов асфальтобетона  $E$ ,  $E_a$ ,  $\mu$  и  $\alpha$  вводились как исходные данные для расчета в программный комплекс ANSYS. Расчет температурных напряжений в асфальтобетоне проводили как для конструкции, где ее элементы имели разные свойства материалов. Результатами расчета были внутренние напряжения в объеме образца асфальтобетона.

### Результаты

Получены результаты расчета температурных напряжений по следующим исходным данным. Геометрическая модель (рис.1) имеет размеры: кубики с ребром 5 мм, расстояние между ними – 0,25 мм. Объемные доли двухфазной системы: битума –  $C_1 = 0,157$  и каменного материала –  $C_2 = 0,843$ .

Рассмотрим свойства материалов, принятых для расчета. Битум марки 50/70 (по нормам EN середина интервала пенетрации – 60 1/10 мм и середина интервала температуры размягчения – 50 °C), индекс пенетрации – минус 0,8. Коэффициент линейной темпера-

турной деформации  $\alpha$  для битума –  $2 \cdot 10^{-4}$ ; для каменного материала –  $1 \cdot 10^{-5}$ ; коэффициент поперечной деформации  $\mu$  для битума – 0,45, для каменного материала – 0,15. Модуль упругости каменного материала – 50000 МПа. Модуль релаксации битума определялся по формулам [5]. Согласно методу TSRST, включенному в стандарт [6], температура снижалась с постоянной скоростью 10 град в час.

На рис. 2 представлены рассчитанные средние температурные напряжения в асфальтобетоне при охлаждении (кривая 3) и напряжения, полученные разными авторами в ходе

лабораторных испытаний по методу TSRST (кривая 1 и 2).

Анализ полученных данных показывает, что расчетные значения средних напряжений меньше экспериментальных, полученных разными авторами для битума одной и той же марки. Расчетные и экспериментальные кривые не совпадают по температуре в среднем на 5 °С. Возможно это связано с тем, что часть битума в асфальтобетоне находится в структурированном состоянии, с гораздо большей вязкостью, чем в свободном состоянии, и это нужно учитывать при вводе исходных данных.

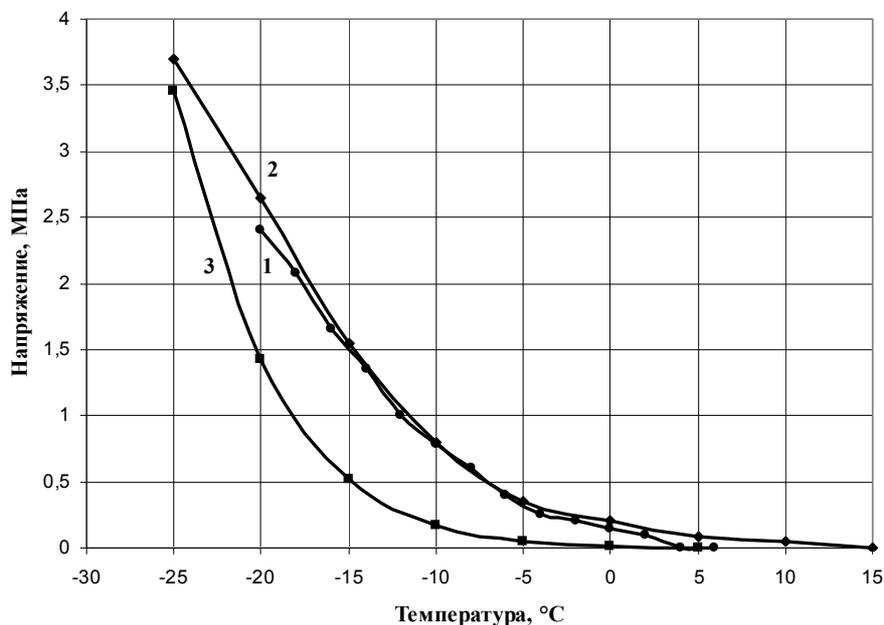


Рис. 2. Средние температурные напряжения в асфальтобетоне на битуме 50/70 при охлаждении по методу TSRST: 1 – по данным [7]; 2 – по данным [8], содержание битума 5,6 %; 3 – расчетные значения

Распределение растягивающих температурных напряжений внутри объема модели асфальтобетона представлено на рис. 3.

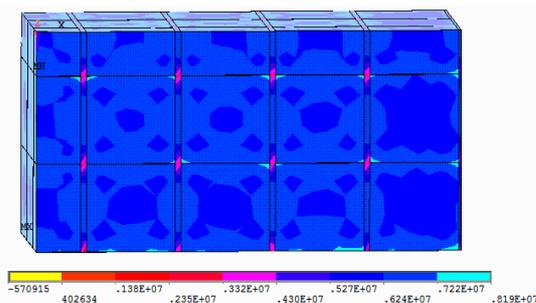


Рис. 3. Распределение растягивающих напряжений вдоль балки

Для принятой геометрии каменных материалов коэффициент концентрации напряжений в зонах резких изменений формы включений достигает значения 2.

### Выводы

Предложен метод определения температурных напряжений в асфальтобетоне с учетом предыстории для его реализации в программном комплексе ANSYS с возможностью определения температурных напряжений внутри объема асфальтобетона.

Показано расхождение между расчетными и экспериментальными данными, что, возмож-

но, связано с отсутствием учета повышения вязкости части битума, находящегося в структурированном состоянии в асфальтобетоне. Такой учет может быть реализован на основе новых экспериментов по определению вязкости структурированного битума.

На основе конечноэлементного анализа напряженно-деформированного состояния асфальтобетона с использованием предложенного метода можно определять концентрации напряжений внутри вязкоупругого материала при охлаждении. Так, для принятой геометрической модели асфальтобетона концентрации напряжений достигали значения 2.

Предложенный метод можно рассматривать как несложный инструмент для быстрой оценки температурных напряжений и может быть использован в качестве прогнозирования низкотемпературных трещин в асфальтобетонном покрытии автомобильных дорог.

#### Литература

1. Haas R.A Comprehensive Study of Cold Climate Airfield Pavement Cracking / R. Haas, F. Meyer, G. Assaf, H. Lee // Association of Asphalt Paving Technologists. – 1987. – Vol. 56 – P. 198–245.
2. Monismith C.L. Rheological behavior of asphalt concrete / C.L. Monismith, R.L. Alexander, K.E. Secor // Association of Asphalt Paving Technologies. – 1966. – Vol. 556. – P. 401–449.
3. Radovskiy B. Ways to reduce low temperature cracking in asphalt pavements / B. Radovskiy, V. Mozgovoy // 4th Eurobitume Symposium. – Madrid. – 1989. – Vol. 1. – P. 571–575.
4. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний: ДСТУ Б В.2.7-119:2011 – Чинний від 2011.11.30. – К.: ДерждорНДІ 2011. – 61 с. – (Державний стандарт України).
5. Радовский Б.С. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям / Б.С. Радовский, Б.Б. Телтаев. – Алматы: Білім баспасы, 2013. – 152 с.
6. 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
7. Pszczoła M. Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers In Comparison with TSRST Test Results / M. Pszczoła, J. Judycki // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. RILEM. – 2012. – P. 41–49.
8. Блажеёвский К. Битумный справочник / К. Блажеёвский, Я. Ольшацкий, Х. Печачковский. – Poland : Płock. – 2014. – 142 с.

Рецензент: В.К. Жданюк, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2016 г.