

**АНАЛІЗ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
В АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ШАРАХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ**

Мозговий В.В., д.т.н., професор,
Заєць Ю.О., к.т.н.,
Шевчук Л.В., к.т.н.,
Куцман О.М., ст. викладач,
Баран С.А., асистент,
Бондар В.М., аспірант,
Національний транспортний університет
mozgoviy@gmail.com

Гайдайчук В.В., д.т.н.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. Існуюча практика розрахунку конструкцій дорожнього одягу потребує удосконалення методів прогнозування зміни температури у кожному її шарі з урахуванням фактичних теплофізичних характеристик матеріалів, а також удосконалення методів визначення напружено-деформованого стану цих шарів, матеріали яких проявляють термореологічні властивості. Для більш точного аналізу термомеханічних процесів в конструкції дорожнього одягу, в даній роботі виконано комп'ютерне моделювання термопружного деформування шарувато-неоднорідних дорожніх одягів. Поставлена задача про визначення напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу, як шаруватого напівпростору при гармонійному коливанні температури. Побудована скінченно-елементна модель термо-пружної деформації масиву, виконаний комп'ютерний аналіз системи. Показано, що вибором коефіцієнтів теплопровідності і температурного лінійного розширення, а також параметрів пружності можна керувати характером розподілу полів температури і напружень.

Ключові слова: автомобільна дорога, асфальтобетонне покриття, температура покриття, напружено-деформований стан.

**АНАЛИЗ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЯХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Мозговой В.В., д.т.н., профессор,
Заец Ю.А., к.т.н.,
Шевчук Л.В., к.т.н.,
Куцман А.М., ст. преподаватель,
Баран С.А., ассистент,
Бондар В.Н., аспирант,
Национальный транспортный университет
mozgoviy@gmail.com

Гайдайчук В.В., д.т.н.,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Аннотация. Существующая практика расчета конструкций дорожной одежды требует совершенствования методов прогнозирования изменения температуры в каждом ее слое с учетом фактических теплофизических характеристик материалов, а также совершенствование методов определения напряженно-деформированного состояния этих слоев, материалы

которых проявляют терморезологические свойства. Для более точного анализа термомеханических процессов в конструкции дорожной одежды в данной работе выполнено компьютерное моделирование термоупругого деформирования слоисто-неоднородных дорожных одежд. Поставленная задача об определении напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды, как слоистого полупространства при гармоничном колебании температуры. Построена конечно-элементная модель термо-упругой деформации массива, выполненный компьютерный анализ системы. Показано, что выбором коэффициентов теплопроводности и температурного линейного расширения, а также параметров упругости можно управлять характером распределения полей температуры и напряжений.

Ключевые слова: автомобильная дорога асфальтобетонное покрытие, температура покрытия, напряженно-деформированное состояние.

ANALYSIS THERMOMECHANICAL PROCESSES IN ASPHALT ROAD LAYERS

Mozghovyi V.V., Doctor of Engineering, Professor,
Zayets Y.O., Ph.D.,
Shevchuk L.V., Ph.D.,
Kutsman O.M., Assistant Lecturer,
Baran S.A., Assistant,
Bondar V.M., post-graduate student,
National Transport University
mozgoviy@gmail.com

Haydaychuk V.V., Doctor of Engineering,
Kyiv National University of Construction and Architecture

Abstract. The existing practice of design calculation of road pavements demands improvement in methods of temperature change forecasting in each layer considering the actual thermophysical characteristics of materials, and improvement of definition methods of the intense deformed condition of layers build with thermoreologically sensitive materials. For more exact analysis of thermomechanical processes in a pavement structure, in this work it is done computer modeling of thermoreological deformation of thermoelastic layered and non-uniform pavements. The task is set to define the intense deformed condition of a road pavement structure as layered half-space during harmonious fluctuation of temperature. It is build the final element model of thermo-elastic deformation of the massif, and made computer analysis of the system. The problem about thermoelastic deformations of a pavements is solved in linear statement. Temperature condition of the field on borders of each layer of road pavements structure and boards of the soil were defined by the equation of non-stationary heat conductivity. It is shown the results of the numerical analysis of thermomechanical processes in layers of road pavements at harmonious change of temperature of a surface of a covering for a concrete example of a structure design.

Keywords: road, asphalt coating, coating temperature, stress-strain state.

Актуальність та постановка проблеми. Існуючі проблеми якості автомобільних доріг в значній мірі обумовлені недостатнім врахуванням при їх проектуванні і утриманні реальних термомеханічних процесів в дорожньому покритті, що відбуваються при дії температурного і транспортного факторів. Діючі нормативні документи опираються на застарілу наукову базу, що недостатньо враховує терморезологічні властивості матеріалів дорожнього покриття та їх зміну у процесі експлуатації. Це суттєво впливає на вичерпування міцності і довговічності та на рівень необхідних ресурсів для відновлення експлуатаційних характеристик покриття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При вивченні температурного режиму в багатьох роботах дослідники враховували шаруватість дорожнього одягу і гармонійний

режим зміни температури на поверхні при добових і річних коливаннях. Для цього були використані відповідні рішення теорії теплопровідності [1-4], на підставі яких отримували аналітичні залежності, що описують зміну температури i -го шару як функції часу і координат $T=f(t,z)$. Також прийнято, що з метою опису температурного режиму шарів може бути застосоване рішення Фур'є задачі теплопровідності [4] для однорідного напівпростору, що задовольняє гармонійній граничній умові при добових і річних коливаннях температури. На підставі цього були отримані аналітичні залежності [5] для визначення температури $T(t,z)$ у будь-який момент часу t при будь-якій вертикальній координаті z покриття, що має коефіцієнт температуропровідності a .

Однак такий наближений підхід опирається на рішення для напівпростору і для багатошарових систем з відносно тонкими шарами покриття може давати певні неточності. Тому у даному випадку є доцільність орієнтуватись на комп'ютерне моделювання.

Формулювання цілей (постановка завдання). Для повного вирішення проблеми, пов'язаної з більш точним аналізом термомеханічних процесів в конструкції дорожнього покриття, слід вирішити комп'ютерне моделювання термопружного деформування шарувато-неоднорідних дорожніх покриттів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Комп'ютерне моделювання термопружного деформування шарувато-неоднорідних дорожніх покриттів.

Основна особливість задач аналізу термопружного напружено-деформованого стану дорожнього одягу є їх багатопараметричність. Перш за все конструкції дорожніх покриттів є істотно неоднорідними. В механіці суцільних середовищ розрізняють шарувато-неоднорідні середовища, в яких середовище складається з декількох пружних шарів з відмінними термомеханічними характеристиками, і градієнтно-неоднорідні середовища [6, 7], властивості яких змінюються за просторовими змінними неперервним способом. Оскільки в дорожньому будівництві, в основному, застосовуються шарувато-неоднорідні дорожні покриття, то при математичному моделюванні механічних процесів, що протікають при їх експлуатації, доводиться мати справу з властивою їм специфікою розподілу полів деформацій і напружень. Справа в тому, що функції деформацій і напружень (а іноді і переміщень), які виникають в них, як правило, виявляються розривними і їх важко описувати простими аналітичними і чисельними засобами. З цією особливістю пов'язане і істотне ускладнення механічних явищ, що спостерігаються в них. Оскільки при експлуатації покриття дороги піддаються не тільки дії інтенсивних швидко змінних (розривних) за просторовими і часовими змінними навантажень, але також і постійно тепловим збуренням, що еволюціонує, з істотними градієнтами, проектування їхніх конструкцій має проводитися на основі вибору оптимальних (раціональних) характеристик матеріалів, що використовуються, їх термо-механічних властивостей, геометричних параметрів проєктованих шарів і порядку їхнього чергування. Цей вибір може бути зроблений за допомогою комп'ютерного моделювання термо-напруженого стану дорожнього покриття та його еволюції за часом.

Виділений для розрахунку термопружного напружено-деформованого стану поперечний переріз конструкції дороги включає чотири шари дорожнього покриття і масив прилеглої ґрунту. Загальна геометрія системи визначається параметрами $L_1 = 24,5$ м, $L_2 = 23,5$ м, $L_3 = 11,5$ м, $L_4 = 7,5$ м, $H = 0,55$ м, $H_1 = 0,5$ м, $H_2 = 2$ м.

Види матеріалів фрагментів конструкції, їхні товщини h_1, h_2, h_3, h_4 , і значення термо-механічних параметрів, а саме модуля пружності E , коефіцієнта Пуассона ν , густини ρ , коефіцієнта теплового лінійного розширення α_T , коефіцієнта теплопровідності λ , питома об'ємна теплоємність $c_{об}$, наведені у таблиці 1.

Вважалось, що конструкція доріг піддається термічній дії в результаті денної зміни температури повітря. Було прийнято, що при цьому температура на її верхній поверхні змінюється за заданим законом. Розрахунки еволюції поля температури в масиві конструкції проведені методом скінченних елементів.

Таблиця 1 – Види матеріалів фрагментів конструкції, товщини і значення термо-механічних параметрів

Номер i шару	Матеріал	h_i (м)	E_i (Па)	ρ кг/м ³	ν	α_T С ⁻¹	λ Вт/(м·К)	$c_{об}$ Дж/(м ³ ·К)
1	Асфальтобетон дрібнозернистий	0,05	$5 \cdot 10^9$	2400	0,2	$2,46 \cdot 10^{-5}$	1,0	$3,77 \cdot 10^6$
2	Асфальтобетон пористий круглозернистий	0,1	$1,4 \cdot 10^9$	2390	0,25	$1,92 \cdot 10^{-5}$	0,7	$2,63 \cdot 10^6$
3	Щебінь	0,2	$0,4 \cdot 10^9$	2300	0,3	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,5	$1,81 \cdot 10^6$
4	Пісок	0,2	$0,1 \cdot 10^9$	2050	0,3	$1,1 \cdot 10^{-5}$	1,5	$4,83 \cdot 10^6$
5	Грунт	2,5	$0,1 \cdot 10^9$	1960	0,35	$0,31 \cdot 10^{-5}$	1,05	$3,23 \cdot 10^6$

розчину

При цьому було враховано, що уздовж поздовжньої осі Oy дороги деформації $\varepsilon_y = 0$ і весь масив знаходиться в стані плоского деформованого стану. Ця обставина дозволила виділити перетинами $y = 0$ і $y = \Delta y$ поперечний шар масиву товщиною Δy і апроксимувати систему тривимірними скінченними елементами з розміром Δy вздовж координати y .

Скінченноелементна модель системи з виділеним її пошаровим фрагментом і ґрунтовим масивом показана на рис. 1. Загальне число скінченних елементів склало 29868.

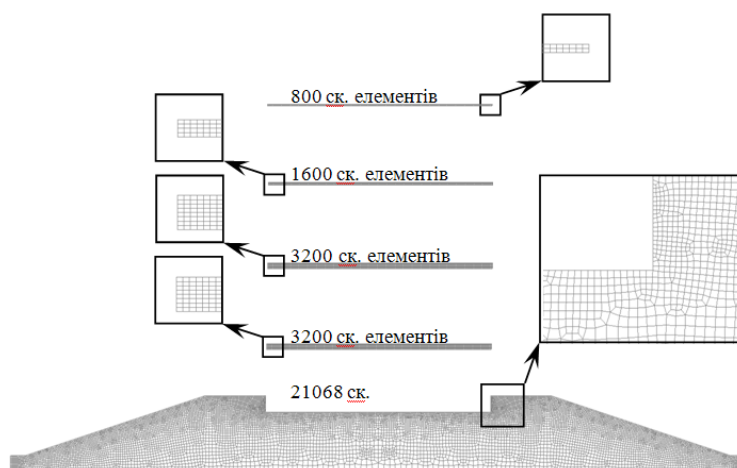


Рис. 1. Скінченно-елементна модель перерізу дороги

Задача про термопружне деформування дорожнього покриття розв'язується в лінійній постановці. Це дозволяє аналізувати тільки прирости деформацій і напружень, викликані приростами температури. Тому будемо вважати, що в початковому стані температура всього масиву (як і T_0), деформації та напруження дорівнюють нулю і будемо аналізувати процес термопружного деформування при зміні температури $T(t)$ на поверхні за законом:

$$T(t) = (T_{\max} - T_0) \sin(\pi / 43200) \quad (1)$$

Прийнята постановка задачі про термопружне деформування виділеного багатошарового масиву дозволила використовувати алгоритм її вирішення, при якому спочатку розв'язується задача нестационарної теплопровідності для рівняння (2) на всьому діапазоні часу t , рівному 12 годин (43200 с). Потім в потрібні для нас моменти часу t_i з використанням побудованих полів температури $T(x, y, z, t_i)$, за допомогою рівнянь (3) визначалися поля переміщень, деформацій і напружень. Розв'язання цих рівнянь

здійснюється шляхом переходу до відповідних скінченно-елементних моделей.

Еволюція поля температури на границях кожного шару покриття і масиву ґрунту визначається рівнянням нестационарної теплопровідності [8]:

$$\nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Тут $a = \lambda_q / c_{об}$ – коефіцієнт температуропровідності; λ_q – коефіцієнт теплопровідності; $c_{об}$ – питома об'ємна теплоємність; доданок $\nabla^2 T$ еквівалентний виразу $\partial T / \partial x^2 + \partial T / \partial y^2 + \partial T / \partial z^2$.

Вважаємо, що при термопружному деформуванні всього масиву силами інерції можна знехтувати і процес буде квазістатичним. Тоді поле пружних переміщень $u(x, y, z)$ описується векторним рівнянням [8-10]:

$$\mu \nabla^2 u + (x + \mu) grad \operatorname{div} u - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T grad(T) = 0 \quad (3)$$

де λ і μ – ізотермічні параметри Ляме.

За розробленою методикою було проведено комп'ютерне моделювання конструкції дорожнього покриття при значеннях параметрів, наведених у таблиці 1, на основі скінченно-елементної моделі, показаної на рис. 1. На рис. 2, а подана схема шарів покриття, що знаходиться у відповідності з координатною віссю Oy , яка напрямлена вертикально. На цій осі побудована функція для моменту часу $t = 6$ год (рис. 2, б). Можна побачити, що поле температури має помітні значення лише на границях першого і половини другу шарів. При цьому наступні (більш низькі) шари і ґрунт виявилися непрогрітими. На рис. 2, б видно також істотний градієнт функції $T(y)$ в приграничній зоні, яка знаходиться у відповідності з теорією сингулярно збурених рівнянь параболічного типу [11, 12]. Рис. 2, в дублює в кольоровій формі рис. 2, б. Він побудований шляхом виділення центрального стовпчика. На рис. 2, г представлена палітра кольорової шкали, яка відповідає кольоровому полю на рис. 2, в.

Генерування температурного поля у вигляді крайового ефекту і шарувата неоднорідність дорожнього покриття обумовлюють формування в ньому полів напружень досить складної структури. Для їх побудови спочатку з використанням знайденої функції температури розв'язується система рівнянь на тій же самій скінченно-елементній решітці і потім обчислюються деформації і напруження в усіх її вузлах.

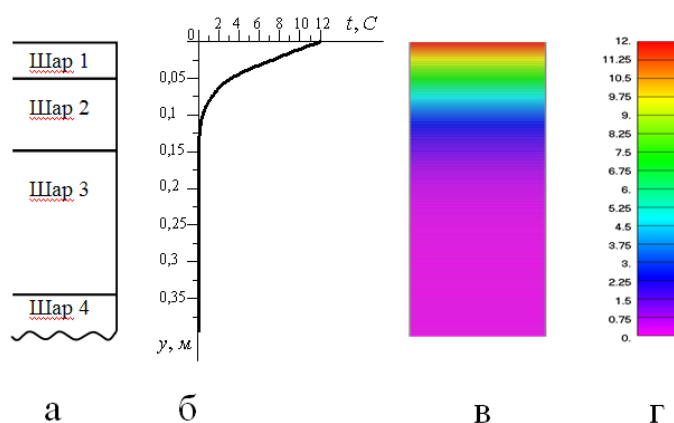


Рис. 2. Схема розподілу температури по глибині у виділеному центральному скінченно-елементному стовпчику:

а – схема шарів покриття, що знаходиться у відповідності з координатною віссю Oy , яка напрямлена вертикально; б – функція для моменту часу $t = 6$ год; в – кольорова форма функція для моменту часу $t = 6$ год; г – палітра кольорової шкали

Висновки. Стискаючі напруження σ_{xx} досягають пікових значень в границях першого шару, де найбільшими є і модуль пружності E (табл. 1), і значення температури T . У границях другого шару напруження σ_{xx} набули істотно менших значень, причому вони виявилися знаковмінними. Цей ефект обумовлений тим, що перший шар, завдяки підвищеній температурі, отримав більш істотні переміщення u_x і захопив за собою другий шар, який при цьому виявився частково розтягнутим. Інші шари покриття виявилися практично ненапруженими.

Напруження σ_{zz} (рис. 4) помітно перевищують напруження σ_{xx} (рис. 3) і їх концентрація в границях першого шару є очевидною. Дотичні напруження σ_{xy} в даній системі формуються завдяки згенерованому градієнту температурного поля в крайовій зоні. У центральному стовпці конструкції вони дорівнюють нулю в силу симетрії системи відносно цього перерізу і досягають найбільших значень приблизно у вертикальному перерізі, який віддалений на чверть ширини покриття від центру (рис. 5).

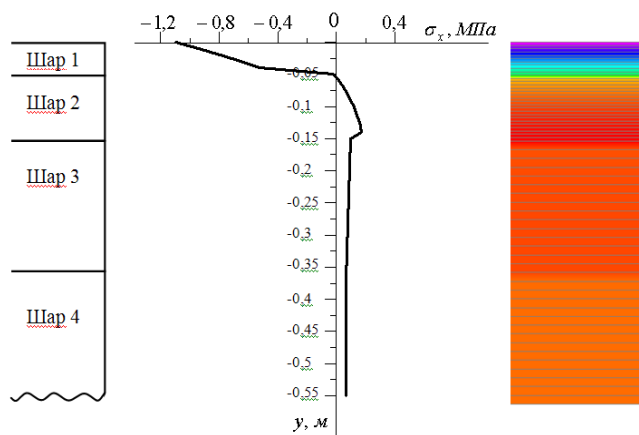


Рис. 3. Схема розподілу термопружних напружень σ_{xx} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

Причому максимальне значення цієї функції досягається на границі першого і другого шарів, де максимальним є градієнт $T(x, y)$.

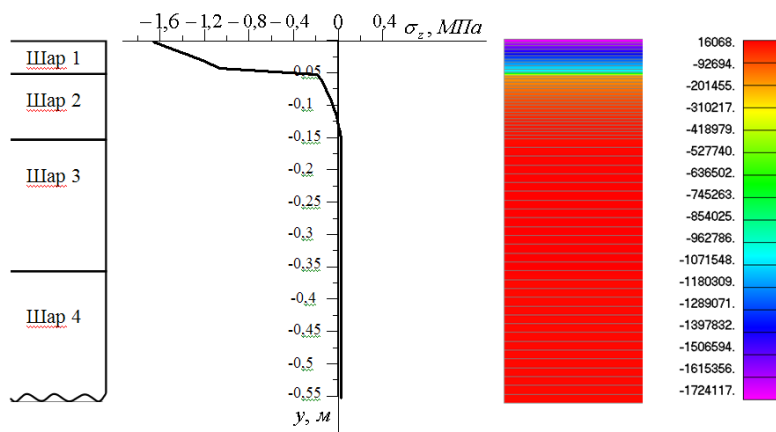


Рис. 4. Схема розподілу термопружних напружень σ_{zz} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

Напруження σ_{xx} і σ_{xy} зростають зі збільшенням ширини дороги L_4 і зменшуються з її зменшенням. Тому якщо ширина дороги велика і є доцільність зменшення термопружних напружень, то вони можуть бути знижені за рахунок роздільного шва, який зроблений уздовж роздільної лінії дороги.

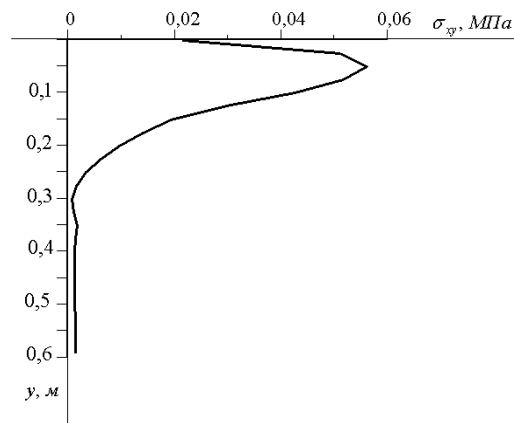


Рис. 5. Схема розподілу термопружних напружень σ_{xy} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

До найпомітнішого явища можна віднести утворення крайового ефекту у функції розподілу температури $T(x, y, z, t)$. У зв'язку з цим суміщення гладкої неоднорідності температурного поля і шаруватої неоднорідності термомеханічних властивостей фрагментів покриття приводить до концентрацій напружень, які є розривними функціями і змінюють свої знаки при еволюції температурного поля. Вони також значною мірою залежать від наявності обмежень, що перешкоджають вільному термопружному розширенню-звуженню окремих фрагментів системи. Тому можна стверджувати, що вибором коефіцієнтів теплопровідності і температурного лінійного розширення, а також параметрів пружності можна керувати характером розподілу полів температури і напружень.

Література

1. Розенгауз Б.А., Комбинированные конструкции дорожных одежд / А.О. Салль, Б.А. Розенгауз // Автомобильные дороги. – 1979. – №12. – С. 19-20.
2. Титарь В.С. О температурной зависимости прочности асфальтобетона при изгибе / И.М. Грушко, В.А. Золотарев, В.С. Титарь // В кн.: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 1980. – вып. 26. – С. 69-72.
3. Губач Л.С. Деформационная устойчивость асфальтобетонного покрытия при низких температурах / Л.С. Губач, С.Г. Пономарева // В кн.: Повышение эффективности применения цементных и асфальтовых бетонов в Сибири. – Новосибирск, 1978. – С. 112-130.
4. Бахрах Г.С. Старение асфальтобетонных покрытий и пути его замедления / Г.С. Бахрах // В кн.: Дорожно-строительные материалы. Труды Гипродорнии. – М., 1974. – вып. 9. – С. 84-96.
5. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: Дис. ... докт. техн. наук: 05.22.11. – Мозговой Владимир Васильевич, К., 1996. – 406 с.
6. Заець Ю.О. Екранування розривних хвиль шаром пружного середовища / Ю.О. Заець // Вісник НТУ. – 2010. – Вип.21. – С.366 – 371.
7. Механика горных выработок при действии гравитационных и динамических нагрузок: монография / [В. И. Гуляев, П. З. Кошель, Ю. А. Заец и др.]. – Ивано-Франковск: Изд-во Прикарпат. нац. ун-та им. В. Стефаника, 2014. – 438 с.
8. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 239 с.
9. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1970. – 256 с.
10. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
11. Shishkin G.I. Method of splitting for singularly perturbed parabolic equations // East-West J.Numer. Math. – 1993. – V.1, № 2. – P. 147 – 163.
12. Шишкин Г.И. Аппроксимация решений сингулярно возмущенных краевых задач с параболическим пограничным слоем / Г.И. Шишкин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1989. – Т.29, № 7. – С.963 – 977.

Стаття надійшла 21.06.2017