

УДК 539.3

¹Мозговий В.В., д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-1032-8048>²Гайдайчук В.В., д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0003-2059-7433>¹Засць Ю.О., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-1836-2010>¹Шевчук Л.В., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>³Густелєв О.О., <https://orcid.org/0000-0001-8257-358X>¹Куцман О.М., <https://orcid.org/0000-0002-4510-4570>¹Національний транспортний університет, м. Київ, Україна²Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна³Комунальна корпорація «Київавтодор», м. Київ, Україна

МЕХАНІЧНІ ЕФЕКТИ І ПАРАДОКСИ ЯВИЩ ТЕРМОПРУЖНОГО НАПРУЖЕННЯ В КОНСТРУКЦІЯХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

Анотація

Вступ. Результати спостережень за процесами руйнування конструкцій доріг в кліматичних умовах України свідчать про те, що, як правило, найбільш інтенсивно вони відбуваються в результаті добових і сезонних змін температури навколишнього середовища, причому на початковому етапі руйнувань найбільш помітними виявляється виникнення на дорогах поперечних тріщин і розшарування конструкції в зоні її вільної поверхні. У даній роботі аналізується можливість ініціювання таких руйнувань під дією змінних за часом температурних збурень з урахуванням викликаних ними змін характеристик жорсткостних властивостей дорожніх матеріалів.

Проблематика. В останні роки в усьому світі на автомобільних дорогах спостерігається тенденція збільшення інтенсивності руху транспортних засобів і зростання частки великовантажних автомобілів і багатовісних автопоїздів з підвищеним тиском в пневматиках. Значний вплив на напружено-деформований стан конструкцій доріг здійснюють кліматичні та теплові впливи, викликані добовими і сезонними змінами температури дорожніх покриттів. Головною особливістю задач аналізу термонапруженого стану дорожньої конструкції є їх багатопараметричність. Перш за все конструкції дорожніх покриттів істотно неоднорідні. У механіці суцільних середовищ розрізняють шарувато-неоднорідні системи, які складаються з декількох пружних шарів з різними термомеханічними характеристиками, і градієнтно неоднорідні середовища, властивості яких змінюються неперервно по просторовим змінним. Оскільки дорожнє покриття можна віднести до шарувато-неоднорідних систем, при математичному моделюванні термомеханічних процесів, що в них протікають, доводиться мати справу з притаманною їм специфікою розподілу полів температури, деформацій і напружень. Справа в тому, що функції деформацій і напружень (а іноді і переміщень), які в них виникають, виявляються розривними і їх важко описувати простими аналітичними і чисельними засобами. З цієї особливості пов'язані і значні ускладнення механічних явищ, що в них виникають.

Мета досліджень. Математичне моделювання явищ термопружного напруження в конструкціях дорожніх одягів.

Методи і результати досліджень. Запропоновано математичні моделі явищ термонапруженого деформування шарувато-неоднорідних дорожніх покриттів з плоскими та викривленими поверхнями в умовах добових та сезонних змін зовнішньої температури та дії транспортних навантажень. Методами скінченно-елементного моделювання показано, що поля температури в конструкції покриття, спричинені еволюцією зовнішнього теплового збурення, мають вигляд високоградієнтних крайових ефектів, утворених в прикордонній зоні системи, тому

зумовлені ними функції напружень є розривними і включають концентратори в різних зонах масиву. Виявлено ділянки максимальних деформацій розтягу та зсуву, що сприяють розшаруванню конструкції. Розглянуто випадки навантажень при різних значеннях геометричних, конструктивних та температурних параметрів. Встановлено деякі несподівані ефекти в механізмах руйнування системи.

Висновки. Поставлена задача про чисельне дослідження термопружного деформування шаруватих дорожніх одягів з урахуванням зміни характеристик жорсткості їх матеріалів при добових і сезонних змінах температури навколишнього середовища. Сформульовані розв'язні рівняння, побудовані їх скінченно-елементні аналоги. Встановлено, що при обраних значеннях геометричних і термомеханічних параметрів дорожньої конструкції задача нестационарної теплопровідності при добових змінах навколишньої температури є сингулярно збуреною, поля температури, що еволюціонують у часі, мають вигляд крайового ефекту, переважно зосередженого в зоні першого або першого і другого асфальтобетонних шарів і володіють високими градієнтами. Показано, що високоградієнтна неоднорідність еволюціонуючих полів температури і шарувата неоднорідність механічних характеристик покриття доріг, які супроводжуються також зміною модуля пружності асфальтобетонних матеріалів при зміні температури, обумовлюють істотну неоднорідність полів напружень, пов'язану з розривами функцій напружень і їх концентрацією в крайовій зоні у вільній поверхні. Встановлено, що пікові значення поздовжніх напружень розтягу у верхньому шарі покриття і зсувних напружень, локалізованих між першим і другим шарами, можуть бути причиною спостережуваних на практиці в зимовий час утворення на дорозі на початковій стадії руйнування поперечних тріщин і її розшарування.

Ключові слова: дорожнє покриття, конструкція дорожнього одягу, термонапружений стан, поле температур, поле напружень.

Вступ

В останні роки в усьому світі на автомобільних дорогах спостерігається тенденція збільшення інтенсивності руху транспортних засобів і зростання частки великовантажних автомобілів і багатовісних автопоїздів з підвищеним тиском в пневматиках. Значний вплив на напружено-деформований стан конструкцій доріг здійснюють кліматичні та теплові впливи, викликані добовими і сезонними змінами температури дорожніх покриттів. Оскільки існуючі мережі автомобільних доріг не розраховані на такі підвищені значення транспортних навантажень, ці чинники є основними причинами зменшення їх експлуатаційної довговічності. Зазначені обставини посилюються також відсутністю ефективних методів теоретичного (комп'ютерного) моделювання напружено-деформованого стану та міцності шарувато-неоднорідних дорожніх покриттів в умовах зміни їх механічних і фізичних властивостей під дією транспортних і термомеханічних навантажень. У зв'язку з цим досить актуальною є проблема розробки більш точних механічних і математичних моделей деформування і міцності дорожніх одягів при їх різних конструктивних схемах, видах матеріалів і діях транспортних і термомеханічних навантажень. Механічні моделі конструкцій доріг є багатошаровими структурами, укладеними на ґрунтову основу. Нижні шари структури сформовані з піску і щебеню, верхні з асфальтобетону, параметри пружності яких змінюються за заданим законом в залежності від добових і сезонних змін їх температури. На заключному етапі комп'ютерного аналізу розроблені математичні моделі у вигляді систем лінійних алгебраїчних рівнянь високих порядків посиляються на використання кінцево-елементних апроксимацій.

Результати спостережень за процесами руйнування конструкцій доріг в кліматичних умовах України свідчать про те, що, як правило, найбільш інтенсивно вони відбуваються в результаті добових і сезонних змін температури навколишнього середовища, причому на початковому етапі руйнувань найбільш помітними виявляється виникнення на дорогах поперечних тріщин і розшарування конструкції в зоні її вільної поверхні. У даній роботі аналізується можливість ініціювання таких руйнувань під дією змінних за часом температурних збурень з урахуванням викликаних ними змін характеристик жорсткостних властивостей дорожніх матеріалів.

Головною особливістю задач аналізу термонапруженого стану дорожньої конструкції є їх багатопараметричність. Перш за все конструкції дорожніх покриттів істотно неоднорідні. У механіці суцільних середовищ розрізняють шарувато-неоднорідні системи, які складаються з декількох пружних шарів з різними термомеханічними характеристиками, і градієнтно неоднорідні середовища [1, 2, 3, 4], властивості яких змінюються неперервно по просторових змінних. Оскільки дорожнє покриття можна віднести до шарувато-неоднорідних систем, при математичному моделюванні термомеханічних процесів, що в них протікають, доводиться мати справу з притаманною їм специфікою розподілу полів температури, деформацій і напружень. Справа в тому, що функції деформацій і напружень (а іноді і переміщень), які в них виникають, виявляються розривними, і їх важко описувати простими аналітичними і чисельними засобами. З цією особливістю пов'язано і значні ускладнення механічних явищ, що в них виникають [5].

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів

Розглянемо чотиришарову конструкцію дорожнього одягу на ґрунтовій основі (рис. 1,а). У поздовжньому напрямку розмір дороги необмежений, тому можна вважати, що переміщення і деформації в напрямку осі Oz дорівнюють нулю, що дає змогу перейти до розв'язку плоскої задачі. У зв'язку з цим для розрахунку термопружного деформування дорожнього покриття можна виділити його плоский поперечний переріз, що включає шари покриття і масив прилеглого ґрунту. Геометрія перетину визначається параметрами: $L_1 = 7,5 \text{ м}$, $L_2 = 11,5 \text{ м}$, $L_3 = 23,5 \text{ м}$, $L_4 = 24,5 \text{ м}$, $H = 2,5 \text{ м}$.

Види матеріалів фрагментів конструкції, товщини шарів h_1 , h_2 , h_3 , h_4 (рис. 1,б) і значення термомеханічних параметрів наведено в таблиці 1, в якій зазначено: E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – густина, α_t – коефіцієнт теплового лінійного розширення; λ – коефіцієнт теплопровідності; c – питома об'ємна теплоємність.

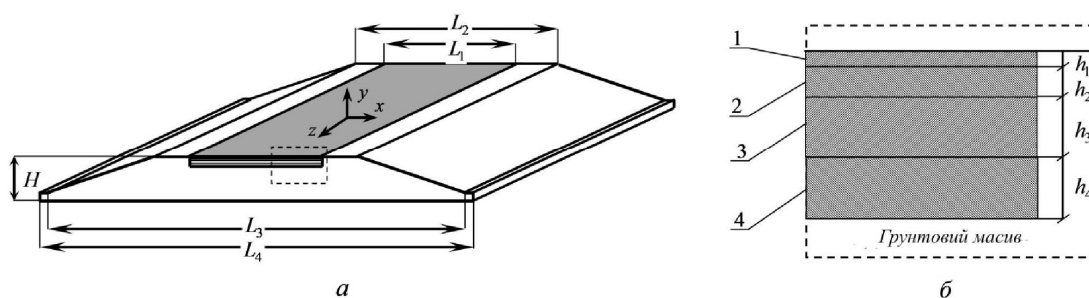


Рисунок 1 – Геометрична схема конструкції дороги

Таблиця №1

Фізичні та термомеханічні значення параметрів матеріалів конструкції дорожнього одягу

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 крупнозернистий	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	$3,23 \cdot 10^6$

Вважалося, що конструкція дорожнього одягу піддається дії термічного збурення в результаті денної і нічної зміни температури в літній і зимовий час року, в зв'язку з чим змінюються також і реологічні характеристики двох верхніх шарів, виконаних з асфальтобетону. В даному випадку враховано, що процеси атмосферної зміни температури і пов'язані з нею процеси зміни полів температури T і напружень σ_{ij} в елементах конструкції дорожнього одягу відбуваються досить повільно. Тому ефекти в'язкості в асфальтобетонних шарах можна не враховувати і вважати, що на кожному етапі їх нагрівання-охолодження матеріали залишаються пружними, хоча в кожному елементі шарів модуль пружності E набуває нового граничного значення $E(T)$, залежного від температури T . Ці значення, знайдені експериментальними методами для розглянутих асфальтобетонів, наведено в таблиці 2.

Аналіз термонапруженого стану конструкції дорожнього одягу реалізувався з припущення, що температура навколишнього середовища змінюється за заданим законом, у зв'язку з чим еволюціонують також і поля температури в конструкції дорожнього одягу. Тому для моделювання цих полів використовується рівняння нестационарної теплопровідності [6, 7]

Таблиця №2

Інтерпольовані значення модуля пружності E

№ п/п	Температура ($^{\circ}C$)	Дрібнозернистий асфальтобетон $E(МПа)$	Крупнозернистий асфальтобетон $E(МПа)$
1	25	2740	966
2	20	3574	1260
3	15	6522	2300
4	10	8114	2861
5	5	11936	4209
6	0	12233	4314
7	-5	14815	5224
8	-10	16106	5679
9	-15	19937	7030
10	-20	24542	8654
11	-25	27137	9569

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

де $T(x, y, z, t)$ – функція температури;
 $a = \lambda_q / c_{об}$ – коефіцієнт теплопровідності;
 λ_q – коефіцієнт теплопровідності;
 $c_{об}$ – питома об'ємна теплоємність.

При розглянутих швидкостях зміни полів температури в конструкції дорожнього одягу можна вважати, що процеси термопружного деформування системи є квазістатичними, і для їх опису доречно використати векторне рівняння стаціонарної термопружності [6, 7]

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

де $u(x, y, z)$ – вектор пружних переміщень пружного середовища;
 λ і μ – ізотермічні параметри Ляме;
 α_T – коефіцієнт теплового лінійного розширення.

Функція температури з рівняння (2) задавалася, виходячи з розв'язку рівняння (1) в обрані моменти часу.

Моделювання теплового збурення найпростіше здійснювати, задаючи температуру $T(x, 0, z, t)$ елементів першого шару на його вільній поверхні $y = 0$. Таке формулювання граничної умови на краю $y = 0$ є найбільш зручним при постановці крайової задачі для рівняння (1) і найбільш простим для його задання, виходячи з натурних і експериментальних вимірювань. Для встановлення загальних закономірностей термопружного деформування конструкції дорожнього покриття приймемо, що в початковому стані при $t = 0$ температура у всіх елементах системи однакова: $T(x, y, z, 0) = 0$. Влітку протягом дня $0 \leq t \leq 12 \text{ год}$ (або $0 \leq t \leq 43200 \text{ с}$) температура на краю $y = 0$ змінюється за законом (рис. 2, а).

$$T(x, 0, z, t) = T_{\max} \sin(\pi t / 43200), \quad (3)$$

де $T_{\max} > 0$ – максимальне значення вимірюваної температури.

Взимку в нічний час $0 \leq t \leq 43200 \text{ с}$ її значення становить (рис. 2, б)

$$T(x, 0, z, t) = T_{\min} \sin(\pi t / 43200), \quad (4)$$

де $T_{\min} < 0$ – мінімальне значення $T(t)$.

Для функції переміщень u на верхній вільній поверхні задавалися умови рівності нулю нормальних і дотичних напружень, на нижній площині $y = -2,5 \text{ м}$ – умови рівності нулю переміщень u_y і дотичних напружень τ_{xy} .

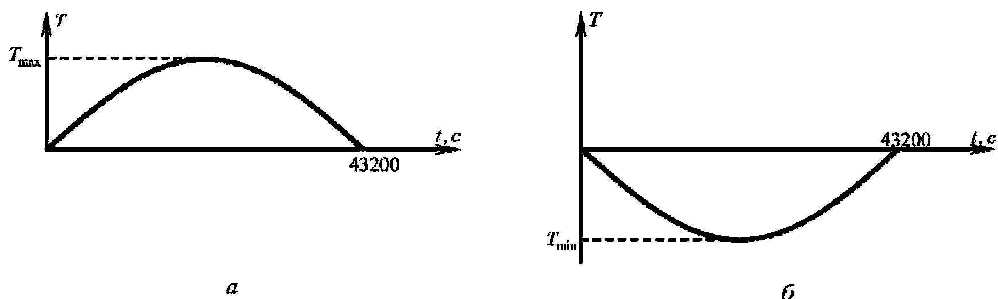


Рисунок 2 – Графіки денної та нічної зміни температури $T(t)$ на поверхні покриття в літній (а) та зимовий (б) періоди

Поставлені задачі нестационарної теплопровідності та стаціонарного термопружного деформування в обрані моменти часу розв'язувалися в постановці плоскої деформації методом скінченних елементів. Для цього здійснюється перехід від рівнянь (1), (2) до їх скінченно-елементних моделей

$$[K_T]\{T\} - [A]\{T\} = \{T_f(t)\}, \quad (5)$$

$$[K_u]\{u\} = [L]\{T(t_i)\}. \quad (6)$$

де $[K_T]$ – матриця коефіцієнтів скінченно-елементної моделі рівняння теплопровідності;
 $[A]$ – матриця коефіцієнтів моделі похідної від T за часом t , побудованої на основі неявної скінченно-різницевої схеми інтегрування рівняння (1) за часом;
 $\{T_f(t)\}$ – вектор заданих в вузлах значень температури T на поверхні покриття;
 $[K_u]$ – матриця жорсткості для скінченно-елементної моделі конструкції;
 $[L]$ – матриця, що відображає вплив обчисленої температури на переміщення вузлів системи.

В результаті покрокового за часом розв'язку системи (5) обчислюються поля дискретних значень температури $T(t_k)$ в моменти часу $0 \leq t \leq 43200c$ його покрокової зміни. Після цього за знайденим $T(t_i)$ за допомогою рівнянь (6) обчислюються значення компонентів вектора $u(t_i)$ вузлових переміщень в потрібний момент часу t_i . При цьому матриця жорсткості $[K_u]$ будується з урахуванням значень модуля пружності E в кожному елементі першого і другого шарів, що відповідають новим обчисленим значенням температури. Вони знаходяться шляхом інтерполяції значень E , наведених у таблиці 2. При цьому для забезпечення необхідної точності перший шар розбивався на 10 елементів по товщині, другий - на 20 елементів, третій і четвертий на 40 елементів. При цьому загальне число елементів всієї задачі склало 195028, число вузлів – 294777.

Після обчислення значень температури $T(t_i)$ і переміщень $u_x(t_i)$, $u_y(t_i)$ у вузлах моделі здійснюється обробка результатів обчислень. Для цього будуються поля компонентів тензорів деформацій ε_{jk} і напружень σ_{jk} . Вони знаходяться за допомогою рівностей [6, 7]

$$\begin{aligned} \varepsilon_{jk} &= (u_{j,k} + u_{k,j})/2 \\ \delta_{jk} &= 2\mu\varepsilon_{jk} + [\lambda\varepsilon_{ii} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T]\delta_{jk} \end{aligned} \quad (7)$$

перетворених методом скінченно-елементної дискретизації. При цьому параметрам Ляме λ і μ надаються значення, відповідні зміненим значенням модуля пружності E в таблиці 2. В рівностях (7) індекси i, j, k набувають значень 1, 2, 3; при цьому напрямки x_1, x_2, x_3 відповідають напрямкам x, y, z ; $u_{j,k} = \partial u_j / \partial x_k$; $\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$; δ_{jk} – символ Кронекера.

Характерна особливість явища розподілу полів температури в конструкції дорожнього одягу полягає в тому, що, незважаючи на порівняно прості їх геометричні схеми і форми, функції теплового збурення, що супроводжують їх термопружні явища, зазнають суттєвих ускладнень. Є два чинники, які роблять розглянуті явища нетривіальними, а проблему їх моделювання – трудомісткою. По-перше, середовище, в якому температурне поле еволюціонує, є шарувато-неоднорідним і, по-друге, проблема його моделювання при обраних значеннях термомеханічних характеристик і розмірах виділеної для розгляду області відноситься до класу сингулярно збурених [8-11]. Відзначимо, що задача теплопровідності є сингулярно збуреною, якщо коефіцієнт $1/a$ перед похідною $\partial T / \partial t$ в рівнянні (1) малий, а розмір області інтегрування в напрямку поширення теплового потоку досить великий. Тоді при такому зовнішньому

тепловому збуренні тепловий потік не встигає проникнути від граничної поверхні вглиб тіла, і поле температури встигає отримати помітну зміну лише у вузькій приграничній зоні, набуваючи зони крайового ефекту. У цьому випадку функція температури $T(x, y, z, t)$ не тільки набуває помітного приросту в крайовій зоні, але і набуває високих значень її градієнтів, тобто похідних по просторових змінних. Відомо, що тільки в разі однорідного вільного від зв'язків пружного тіла термопружні напруження дорівнюють нулю, якщо поле температур $T(x, y, z)$ постійне або лінійно змінюється по змінним x, y, z . У всіх інших випадках у ньому формуються ненульові напруження, що збільшуються з ускладненням температурних полів. Оскільки в сингулярно збурених випадках поле температур істотно неоднорідне, тепловий вплив супроводжується генеруванням інтенсивних полів напружень.

Другий фактор, який ускладнює задачу дослідження розподілу температури в дорожніх покриттях, обумовлений його шаруватою структурою, яка обмежує можливості застосування аналітичних методів.

Сформульовані особливості явищ розподілу температури в шаруватих структурах підтверджено моделюванням їх перебігу в конструкції дорожнього покриття. Методом скінченних елементів було побудовано поля температур на відрізках часу $0 \leq t \leq 12 \text{ год}$ з кроком інтегрування $\Delta t = 10 \text{ с}$ при значеннях термомеханічних параметрів, представлених в табл.1, і законах зміни температури на вільній поверхні описаних рівностями (3) і (4) (рис. 2). Було прийнято $T_{\max} = 25^\circ \text{C}$, $T_{\min} = -25^\circ \text{C}$.

Тому на рис. 3,а в кольоровому зображенні показано поле розподілу температури у вузькій вертикальній смужці шириною Δx , виділеної в околі осі симетрії Oy . Поруч (рис. 3, б) подано кольорову палітру шкали значень температури, що відповідає кожному кольоровому відтінку. Для наочності на рис. 3в наведено графік змінювання функції $T(y)$. Можна бачити, що максимальні значення температури локалізуються в крайовій зоні, прилеглої до верхньої поверхні покриття, а її відмінні від нуля значення помітні лише в межах першого і половини другого шару. При цьому наступні, більш низькі, шари дорожнього одягу, і ґрунт залишилися практично непрогрітими, що відповідає теорії сингулярно збурених рівнянь параболічного типу.

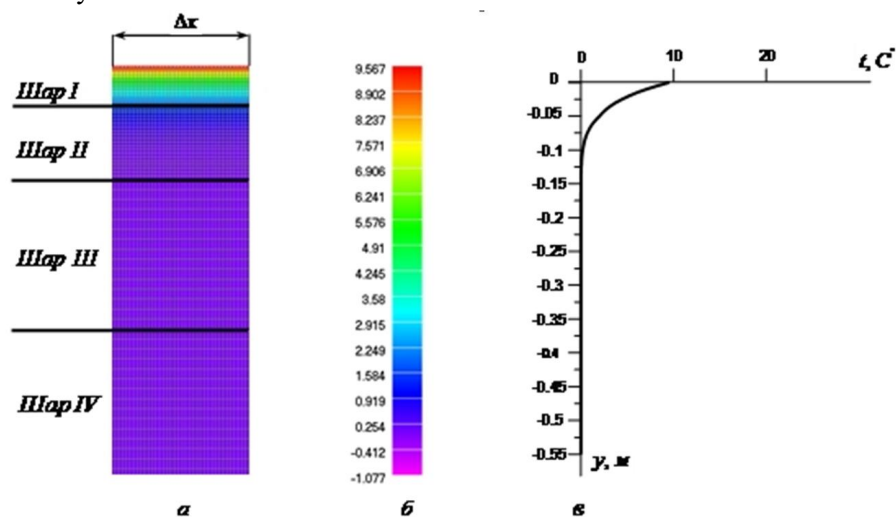


Рисунок 3 – Схеми розподілу температури в глиб дорожньої конструкції в момент часу $t = 3 \text{ год}$

В результаті подальшого збільшення температури T на вільній поверхні до її значення $T_{\max} = 25^{\circ}\text{C}$ при $t = 12 \text{ год}$ процес прогрівання шарів триває, хоча загальна тенденція утворення крайових ефектів у розв'язувальній функції зберігається (рис. 4).

Оскільки розглянута задача теплопровідності – лінійна, то явище охолодження дорожньої конструкції в зимовий час від нуля до $T_{\min} = -25^{\circ}\text{C}$ повністю аналогічно явищу його нагрівання від нуля до $T = T_{\max} = 25^{\circ}\text{C}$. Тому для аналізу полів температури фрагментів покриття в зимовий час досить на графіках, наведених на рис. 3 і 4, лише змінити додатні знаки температури на від'ємні.

Шарувата неоднорідність дорожніх конструкцій, генерування температурних полів у вигляді крайових ефектів і зміна пружних характеристик асфальтобетонних матеріалів зі зміною їх температури обумовлюють формування в них полів напружень складної структури. Для їх побудови спочатку в кожен момент часу з використанням знайденої функції температури розв'язується система алгебраїчних рівнянь (6) на тій же самій скінченно-елементній решітці, і потім за допомогою формул (8) обчислюються компоненти тензорів деформацій і напружень у всіх елементах системи. При цьому і для рівняння (6), і рівності (8) в кожному елементі системи використовуються значення параметрів Ляме λ і μ , перераховані з урахуванням нових значень модуля пружності $E(T)$, отриманих відповідною інтерполяцією наведених в табл. 2 величин.

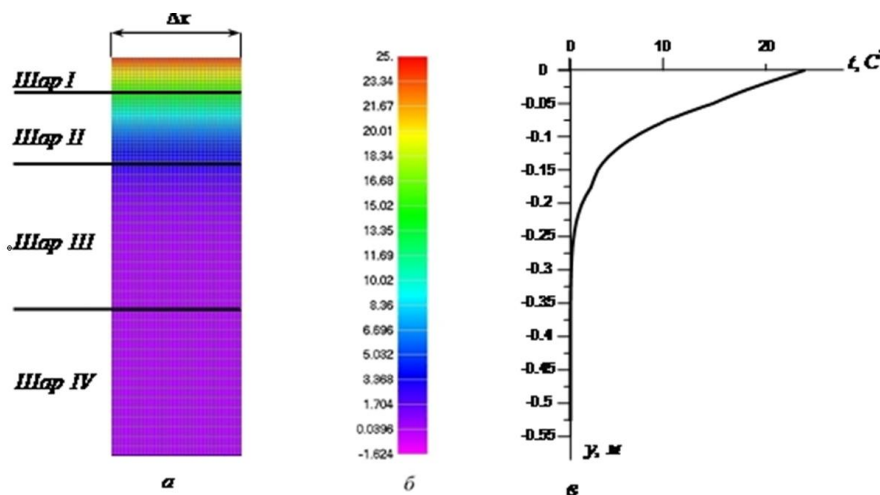


Рисунок 4 – Схеми розподілу температури в глиб дорожньої конструкції в момент часу $t = 6 \text{ год}$

Розглянемо і проаналізуємо спочатку поля напружень, які відповідають розподілу додатної температури при $t = 3 \text{ год}$ (див. рис. 3). Графіки напружень $\sigma_x(y)$, $\sigma_y(y)$, $\sigma_z(y)$, $\tau_{xy}(y)$ представлено на рис. 5-8, відповідно. Причому, так як найбільші значення функцій $\sigma_x(y)$, $\sigma_y(y)$, $\sigma_z(y)$ переважають в центральній зоні дороги, то їх графіки дано в зоні осі Oy . Водночас функція $\tau_{xy}(y)$ дорівнює нулю на цій осі і має максимальні значення в зоні, прилеглої до краю дороги, тому її графіки побудовано в околі цієї зони.

Проведемо якісний і кількісний аналіз наведених результатів розрахунку. По-перше, можна помітити, що нормальні напруження $\sigma_y(y)$ дуже малі. Для якісного аналізу прийнемо, що

$$\sigma_y(y) \approx 0. \quad (8)$$

По-друге, оскільки модуль пружності ґрунту помітно менше модулів пружності кожного з шарів дорожнього одягу, можна вважати, що ґрунтове середовище на узбіччях автомобільних доріг покриття слабо протидіє вільному тепловому розширенню шарів в бічному напрямку, і шари можуть майже вільно розширюватися.

Тоді можна вважати, що при додатній температурі T деформація ε_{xx} також додатна і, як випливає з рівності для напруження σ_{xx} , вона досягає порівняно невеликих, за модулем, -стискальних (від'ємних) значень за рахунок другого доданка.

Таким чином, за допомогою рівності $\sigma_{zz} = \sigma_{xx} - 2\mu\varepsilon_{xx}$ можна встановити характерну особливість полів розподілу термопружних напружень в даній структурі. Так як в правій частині цієї рівності величина σ_{xx} порівняно мала та від'ємна і від неї віднімається чимала величина (другий член з додатним ε_{xx}), то σ_{zz} набуває від'ємного і найбільшого за модулем значення $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}$.

Наведені на рис. 5-8 дані розрахунків узгоджуються з наведеними положеннями якісного аналізу особливостей розподілу напружень σ_{xx} і σ_{zz} . Перш за все, відзначимо, що напруження стиску досягають максимальних значень в межах першого шару, де і значення температури і модуль пружності досягають пікових величин. Між першим і другим шарами ці напруження зазнають розриву, оскільки розривною є функція модуля пружності (див. табл. 2). У межах другого шару напруження σ_{xx} набули менших значень, які до того ж виявилися ще й знакозмінними.

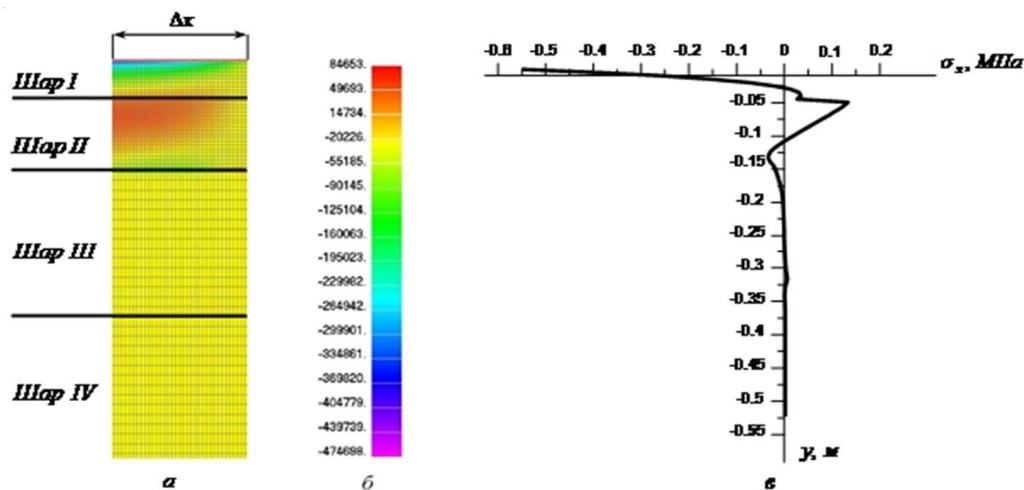


Рисунок 5 – Графіки функцій $\sigma_x(y)$ в смужці Δx центральної зони перерізу $z = 0$ дорожнього одягу (а, б) та вздовж осі Oy (в) в момент $t = 3200$

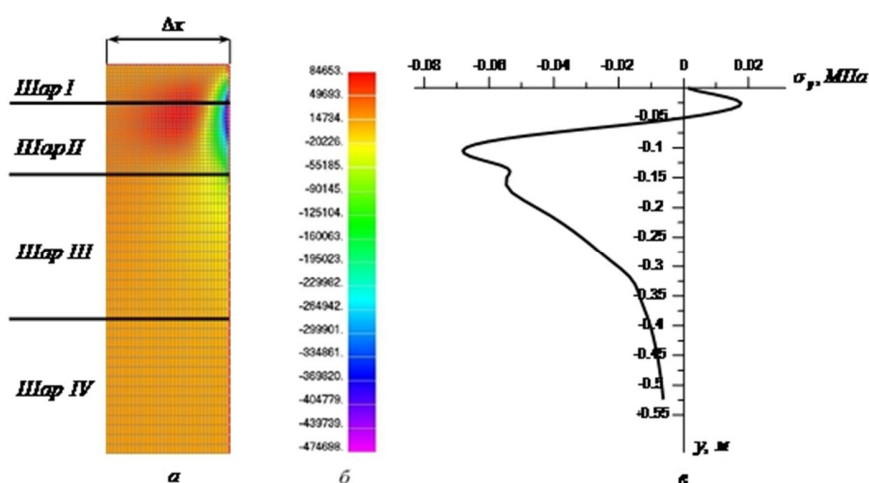


Рисунок 6 – Графіки функцій $\sigma_y(y)$ в смужці Δx центральної зони перерізу $z=0$ дорожнього одягу (а, б) та вздовж осі Oy (в) в момент $t=3\text{ год}$

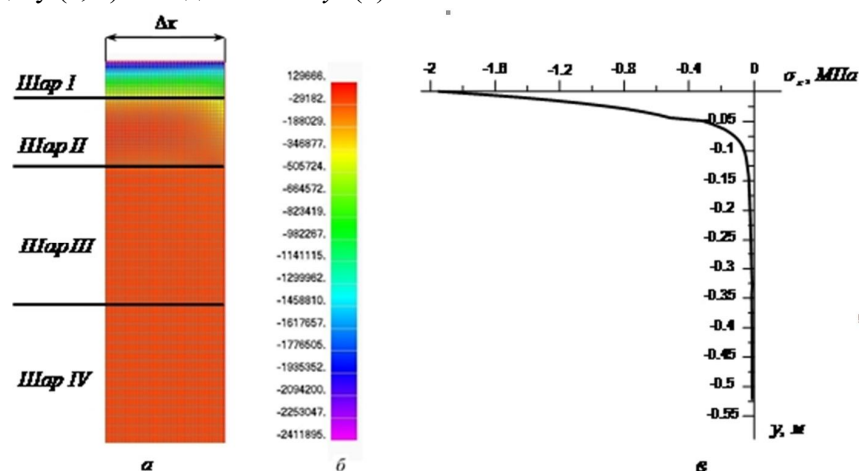


Рисунок 7 – Графіки функцій $\sigma_z(y)$ в смужці Δx центральної зони перерізу $z=0$ дорожнього одягу (а, б) та вздовж осі Oy (в) в момент $t=3\text{ год}$

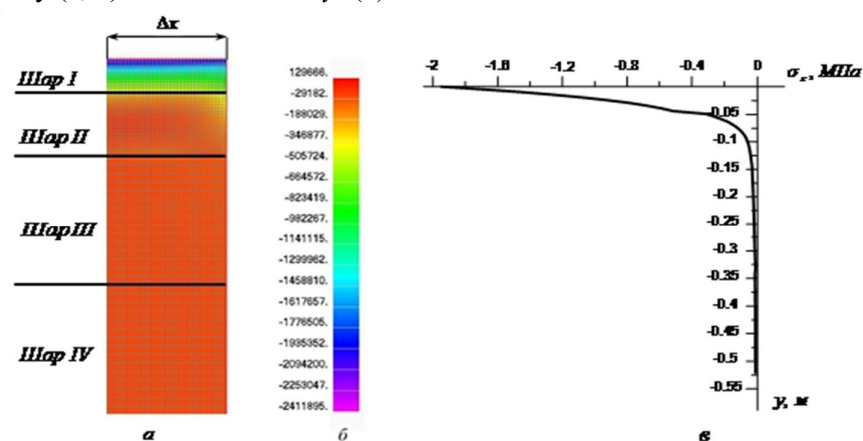


Рисунок 8 – Графіки функцій $\tau_{xy}(y)$ в смужці Δx , дотичній до краю дорожнього одягу в момент часу $t=3\text{ год}$

Маючи в своєму розпорядженні графіки функції σ_{xx} (рис. 5), можна легко оцінити вид функції σ_{zz} . Вони істотно перевищують напруження σ_{xx} , і є очевидною їх концентрація в межах першого шару (що буде менш помітним зі збільшенням температури T).

Дотичні напруження в цій зоні утворюються відповідно до відомої в теорії шаруватих композитних матеріалів властивості формування дотичних напружень між двома шарами. Нехай, наприклад, композитний брус довжиною l складається з двох склеєних стрижнів з різними коефіцієнтами теплового лінійного розширення α_1 і α_2 . При його нагріванні на температуру T перший і другий стрижні подовжується на однакову величину Δl_T . Якщо ж ці стрижні роз'єднати і нагріти окремо, то різниця між їх довжинами складатиме $\Delta l = T(\alpha_1 - \alpha_2)$.

Для того, щоб ці стрижні з'єднати в нагрітому стані необхідно до першого і другого стрижня прикласти розподілені дотичні сили τ_{xy} різних знаків за схемою, наведеною на рис. 9,б. тому можна зробити висновок, що в складеному нагрітому стрижні (рис. 9,а) між стрижнями 1 і 2 розподілено діють дотичні сили, які стискають перший стрижень і розтягують другий з їх максимальними значеннями в центральних перерізах кожної з половинок.

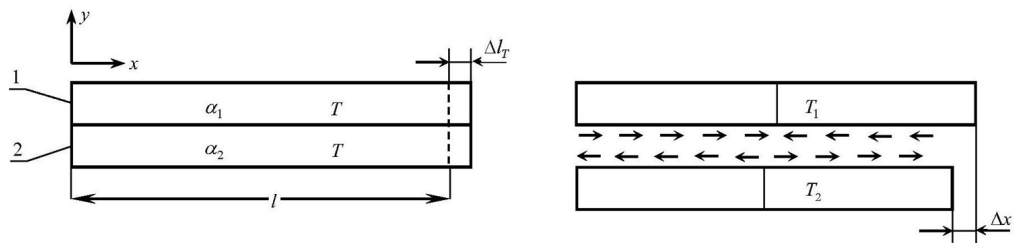


Рисунок 9 – Формування дотичних напружень у двошаровому брусі

Аналогічна ситуація має місце і в реальній конструкції дорожнього одягу, яка, до того ж ускладнюється тим, що всі шари мають різні змінні модулі пружності $E(y)$ і нагріті на різні температури $T(y)$. Тут в центральному $x = 0$ перерізі конструкції дотичні сили τ_{xy} дорівнюють нулю в силу симетрії системи, і вони мають найбільші значення у вертикальному перерізі, віддаленому від краю покриття приблизно на чверть його ширини (рис. 8). Пікового значення ця функція досягає на площині з'єднання першого і другого шарів, що взагалі кажучи, сприяє розшаруванню конструкції в цьому місці.

Відзначимо, що з подальшим збільшенням температури на поверхні покриття аж до $T = T_{\max} = 25^{\circ}$ при $t = 6 \text{ год}$ ефект прогрівання поширюється вглиб покриття і нагрітими виявляються також другий і, частково, третій шари, хоча при цьому функція $T(y)$ зберігає вид крайового ефекту з високими значеннями градієнтів.

В цьому випадку властивості полів напружень, зазначені вище для моменту часу $t = 3 \text{ год}$, зберігаються, проте більш яскраво вираженими стають розриви функцій напружень $\sigma_x(y)$, $\sigma_z(y)$, $\tau_{xy}(y)$ обумовлені розривами функцій модулів пружності на поверхнях зчленування відмінних шарів (рис. 10). Слід зазначити їх важливу відмінність, викликану зменшенням модулів пружності матеріалів двох верхніх шарів зі збільшенням температури. Вона призводить до того, що максимальні значення напружень $\sigma_x(y)$ і $\sigma_z(y)$ зміщуються углиб зони першого шару з більшими значеннями $E_1(t)$.

Однак найбільш радикальні зміни відбуваються в характері розподілу полів модельованих напружень в зимовий час при нічному охолодженні вільної поверхні її верхнього шару від нуля до $T_{\min} = -25^{\circ}\text{C}$ (рис. 2,б).

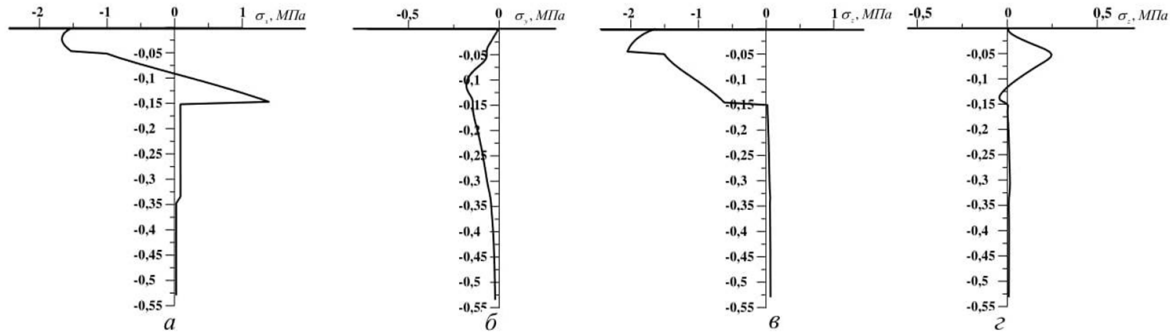


Рисунок 10 – Графіки функцій $\sigma_x(y)$ (а), $\sigma_y(y)$ (б), $\sigma_z(y)$ (в), τ_{xy} (г) при $t = 6 \text{ год}$ і $T = 25^{\circ}\text{C}$

Задача теплопровідності для цього випадку спеціально не розв'язувалась завдяки тому що вона абсолютно аналогічна задачі про нагрівання конструкції до $T = T_{\max} = 25^{\circ}$ і поля температур для цих постановок відрізняються тільки знаками. Водночас задача термопружності у випадку охолодження середовища має принципову відмінність, так як зі зниженням температури модуль пружності асфальтобетону підвищується (див. Табл. 2).

Аналіз графіків розподілу $\sigma_x(y)$, $\sigma_y(y)$, $\sigma_z(y)$, $\tau_{xy}(y)$, наведених на рис. 11, свідчать про те, що значення всіх цих функцій істотно зросли в порівнянні з випадком нагрівання дорожнього масиву. Крім того, найбільші нормальні напруження $\sigma_x(y)$, $\sigma_y(y)$, $\sigma_z(y)$ стали додатними, що значно погіршує міцність конструкції, в зв'язку з тим, що міцність асфальтобетону при розтягуванні набагато нижче його міцності при стисненні. Якщо взяти до уваги, що напруження $\sigma_z(y)$ (рис. 11в) набагато перевищує напруження $\sigma_x(y)$ і $\sigma_y(y)$, то можна зрозуміти, чому при кліматичних умовах України найбільш помітне руйнування доріг відбувається в зимовий час і на початковій стадії воно, як правило, реалізується у вигляді появи на дорозі переважно поперечних тріщин.

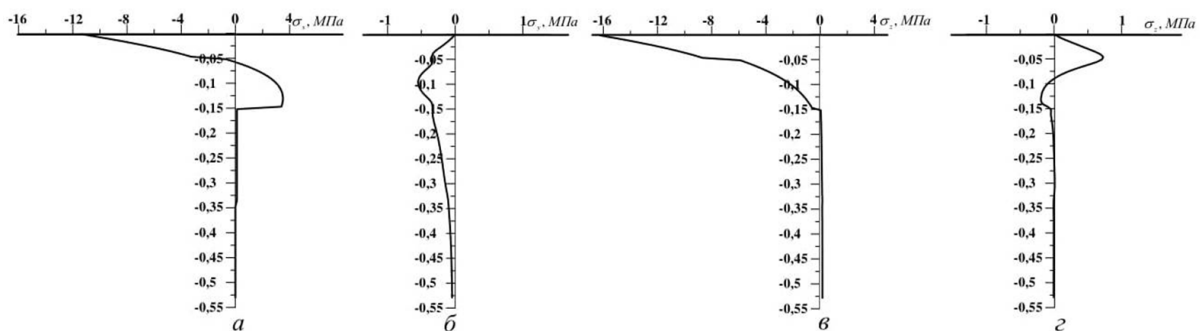


Рисунок 11 – Графіки функцій $\sigma_x(y)$ (а), $\sigma_y(y)$ (б), $\sigma_z(y)$ (в), τ_{xy} (г) при $t = 6 \text{ год}$ і $T = -25^{\circ}\text{C}$

Слід звернути також увагу на графік функції зсувних напружень $\tau_{xy}(y)$ на рис. 11,г. Як видно, її пікове значення розташоване в площині з'єднання першого і другого шарів. І хоча його найбільше значення $\tau_{xy}(y) = 3,2 \text{ кПа}$ набагато менше напруження $\sigma_z = 1,8 \text{ кПа}$ на рис. 11в, можливо, що воно також є деструктивним, оскільки може викликати розшарування конструкції, викликаючи зрушення першого шару щодо другого. Дійсно, асфальтобетонні матеріали абсолютно по-різному чинять опір напруженням стиснення, розтягу і зсуву. Причому граничні значення цих напружень залежать не тільки від консистенції матеріалів і температур, а й від загального напружено-деформівного стану виділеного елемента. Наприклад, в [5] відзначено, що межа міцності асфальтобетонного матеріалу при розтягненні може досягати $[\sigma] = 6 \text{ МПа}$, в той час як при зсуві максимальне напруження може бути лише трохи більшим нуля. Тому в кожному конкретному випадку питання про визначення найбільш небезпечних термонапружених зон в конструкції дорожнього покриття і вибір теорії міцності повинні розглядатися окремо.

У загальному випадку в проблемах руйнування асфальтобетонних дорожніх покриттів можна виділити наступні механізми зародження і розвитку тріщин [5]:

- утворення тріщин в нижніх зонах асфальтобетонних покриттів на етапі їх ущільнення при укладанні, викликане недотриманням будівельних технологій;
- високі термопружні напруження, обумовлені великими градієнтами полів температури і наявністю додаткових конструктивних обмежень (зв'язків), що перешкоджають вільному температурному деформуванню фрагментів дорожнього масиву;
- замерзання в зимовий час частинок води в мікротріщинах, що призводить до їх розклинення, розширення і збільшення;
- виникнення в верхніх шарах покриття напружень розтягу від дії транспортних навантажень, пов'язаних з властивістю асфальтобетонів слабо чинити опір цим напруженням;
- виникнення у верхніх шарах зсувних напружень, що також пов'язане з їх слабким опором і цим напруженням.

В науково-технічній літературі практично не приділяється увага ще одному механічному аспекту, що дозволяє дати більш повне пояснення явищ інтенсивного руйнування доріг в зимовий час під дією транспортних навантажень. Для його інтерпретації звернемося, на перший погляд, до парадоксального ефекту. У 1933 р. І.М. Рабинович [8] сформулював твердження, відповідно до якого, якщо в статично невизначуваній фермі збільшити модуль пружності одного зі стрижнів, то при незмінному зовнішньому навантаженні поздовжня сила (і напруження) в цьому стрижні збільшиться. Таким чином, виходить, що при цьому інші, більш податливі стрижні поступаються зовнішньому впливу, знімають з себе навантаження і перерозподіляють їх на більш жорсткий стрижень. Пізніше А.В. Перельмутер [12], застосовуючи метод теорії чутливості, узагальнив це твердження на статичні невизначувані пружні системи більш загального вигляду.

Безпосереднє відношення до розглянутого ефекту має розв'язок задачі про напружений стан нескінченної балки на пружній основі під дією зосередженої вертикальної сили P . Ця система також є статично невизначуваною, і її розв'язок визначається за рахунок додаткового врахування спільності переміщень балки і підстави. Нехай E – модуль пружності матеріалу балки, I – момент інерції її перетину і k – коефіцієнт ліжка підстави. Тоді згинальний момент в балці в перерізі, що містить силу P , дорівнює $M = P^4 \sqrt{4EI/k} / 4$.

З цієї формули випливає, що момент M і напруження в балці під силою зростають зі збільшенням її модуля пружності E при інших незмінних умовах.

Деяка схожість з балкою на пружній основі має також модель деформування шаруватого дорожнього покриття під дією транспортних навантажень. Дійсно, конструкція дорожнього

одягу являє собою чотиришарову структуру, що лежить на ґрунтовому масиві. Якщо врахувати, що модулі пружності шарів покриття на два порядки вище модуля пружності ґрунту, то конструкцію покриття можна уявити як шарувату плиту, що лежить на пружній основі, і припустити, що обговорювані ефекти мають місце і в цій системі.

Для підтвердження цього припущення розглянуто тривимірну модель дорожнього одягу [1] шириною 7,5 м, що містить чотири шари. Два верхніх шари виконано з дрібнозернистого і крупнозернистого асфальтобетону товщиною 0,05 м і 0,1 м, що мають модулі пружності $E_1 = 5 \cdot 10^9 \text{ Па}$ і $E_2 = 1,4 \cdot 10^9 \text{ Па}$ при температурі $T = 20^\circ \text{C}$ в літній час. У нижчих шарах, утворених з щебеню і піску, товщиною 0,2 м значення цих параметрів становлять $E_3 = 0,4 \cdot 10^9 \text{ Па}$ і $E_4 = 0,1 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Модуль пружності ґрунту також дорівнює $E_5 = 0,1 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Під дією транспортного навантаження в дорожньому масиві сформувалося поле напружень. Воно визначено методом скінченних елементів. Результати розрахунків показали, що під дією обраного навантаження два верхніх асфальтобетонних шари працюють як плита, що вигинається, і в другому шарі сформувалася зона додатних (розтягу) напружень σ_x з максимальним значенням $\sigma_x^{\max} = 813 \text{ кПа}$.

Потім було прийнято, що внаслідок сезонних змін температури T в зимовий час в двох верхніх шарах відбулися термореологічні зміни, і їх модулі пружності досягли значень $E_1 = 25 \cdot 10^9 \text{ Па}$ і $E_2 = 8 \cdot 10^9 \text{ Па}$ при $T = -20^\circ \text{C}$, в той час як в щебеневому, піщаному і ґрунтовому шарах вони залишилися без зміни. Розрахунки, виконані зі збереженням вихідних умов для всіх інших параметрів моделі, показали, що при цьому напруження розтягу збереглися в тих же зонах, але досягли значень $\sigma_x^{\max} = 3027 \text{ кПа}$. Проведений аналіз дозволяє обґрунтувати ще один парадоксальний механізм більш інтенсивного руйнування асфальтобетонних покриттів в зимовий час, при збільшенні модуля пружності матеріалів верхніх шарів.

Висновки

Поставлено задачу про чисельне дослідження термопружного деформування шаруватих дорожніх одягів з урахуванням зміни характеристик жорсткості їх матеріалів при добових і сезонних змінах температури навколишнього середовища. Сформульовано розв'язні рівняння, побудовано їх скінченно-елементні аналоги.

Методом комп'ютерного аналізу розв'язків рівнянь нестационарної теплопровідності встановлено, що при обраних значеннях геометричних і термомеханічних параметрів дорожньої конструкції задача нестационарної теплопровідності при добових змінах навколишньої температури є сингулярно збуреною. Внаслідок цього, як підтвердили результати комп'ютерного моделювання, поля температури, що еволюціонують у часі, мають вигляд крайового ефекту, переважно зосередженого в зоні першого або першого і другого асфальтобетонних шарів і володіють високими градієнтами.

Чисельним дослідженням показано, що високоградієнтна неоднорідність еволюційувальних полів температури і шарувата неоднорідність механічних характеристик покриття доріг, які супроводжуються також зміною модуля пружності асфальтобетонних матеріалів при змінюванні температури, обумовлюють істотну неоднорідність полів напружень, пов'язану з розривами функцій напружень і їх концентрацією в крайовій зоні у вільній поверхні.

Встановлено, що пікові значення поздовжніх напружень розтягу у верхньому шарі покриття і зсувних напружень, локалізованих між першим і другим шарами, можуть бути причиною спостережуваних на практиці в зимовий час утворень на дорозі на початковій стадії руйнування поперечних тріщин і її розшарування.

Список літератури

1. Гуляєв В.І., Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Засць Ю.О., Шевчук Л.В. Дослідження термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. Київ, 2017. N 1. С. 6–12.
2. Засць Ю.О. Екранування розривних хвиль шаром пружного середовища. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2010. Вип. 21. С.366–371.
3. Гуляев В.И., Кошель П.З., Заец Ю.А. и др. Механика горных выработок при действии гравитационных и динамических нагрузок: монография. Ивано-Франковск, 2014. 438 с.
4. Новацкий В. Теория упругости. Москва, 1975. 872 с.
5. Litton R.L., Tsai F.L., Lee S.I., Luo R., Hu S., Zhou F. Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays: Research Report 669. Texas, 2010. P.61.
6. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. Киев, 1970. 239 с.
7. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. Москва, 1970. 256 с.
8. Рабинович И.М. К теории статически неопределимых ферм. Москва, 1933 120 с.
9. Чанг Н., Хауэс Ф. Нелинейные сингулярно возмущенные краевые задачи. Москва, 1988. 247 с.
10. Шишкин Г.И. Аппроксимация решений сингулярно возмущенных краевых задач с параболическим пограничным слоем. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. Москва, 1989. Том 29:7. С. 963–977.
11. Shishkin G.I. Method of splitting for singularly perturbed parabolic equations. *Ast - West Journal Of Mathematics*. 1993. Volume 1. N 2. P. 147–163. URL: <http://eastwestmath.org>
12. Перельмутер А.В. О влиянии изменения жесткостей на перераспределение усилий в статически неопределимой системе. *Строительная механика и расчет сооружений*. Москва, 1974. N 5. С. 64–67.

REFERENCES

1. Huliaiev, V.I., Haidaichuk, V.V., Mozghovyi, V.V., Zaiets, Yu.O., Shevchuk, L.V. (2017). Doslidzhennia termonapruzhenooho stanu konstruktzii dorozhnoho odiahu. *Promislove budivnictvo ta inzhenerni sporudni*. Kyiv, 2017. N 1. P. 6–12. [in Ukrainian].
2. Zaiets Yu.O. Ekranuvannia rozryvnykh khvyly sharom pruzhnoho seredovyshcha. *Visnik (Nacional'niy transportnij universitet)*. Kiev, 2010. N 21. P. 366–371. [in Ukrainian].
3. Huliaiev V.Y., Koshel P.Z., Zaets Yu.A. y dr. Mekhanyka hornnykh vyrobotok pry deistvyi hravytatsyonnykh y dynamycheskykh nahruzok: monograph. Ivano-Frankivsk, 2014. 438 p. [in Ukrainian].
4. Novatskyi V. Teoryia uprughosti (The elasticity theory). Moscow, 1975. 872 с. [in Russian].
5. Litton R.L., Tsai F.L., Lee S.I., Luo R., Hu S., Zhou F. Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays: Research Report 669. Texas, 2010. P.61. [in the USA].
6. Kovalenko A.D. Osnovy tiermoupruhosti (Thermoelasticity fundamentals). Kyiv, 1970. 239 p. [in Ukrainian].
7. Novatskyi V. Dynamycheskye zadachy termoupruhosti (Dynamical problems of thermoelasticity). Moscow, 1970. 256 с. [in Russian].
8. Rabinovich, I.M. K teorii sialicheski neopredelimykh ferm. Moscow, 1933 120 с. [in Russian].
9. Chang N., Haues F. Nelineynyie singulyarno vozmuschennyye kraevyye zadachi. Moscow, 1988. [in Russian].

10. Shishkin G.I. Approksimatsiya resheniy singulyarno vozmuschennyih kraevyih zadach s parabolicheskim pogranichnym sloem. *Žurnal vyčislitel'noj matematiki i matematičeskoj fiziki*. Moscow, 1989. N 29:7. P. 963–977. [in Russian]
 11. Shishkin G.I. Method of splitting for singularly perturbed parabolic equations. *Ast - West Journal Of Mathematics*. 1993. Volume 1. N 2. P. 147–163. URL: <http://eastwestmath.org>
 12. Perelmuter, A.V. O vliianii izmeneniia zhestokosti na pereraspredelenie usilii v staticheski neopredelimoj. *Stroitel'naâ mehanika i rasčet sooruzhenij*. Moscow, 1974. N 5. P. 64–67 [in Russian].
-

¹**Volodymyr Mozghovyi**, D.Sc., Profesor, <https://orcid.org/0000-0002-1032-8048>

²**Viktor Gaidaichuk**, D.Sc., Profesor, <https://orcid.org/0000-0003-2059-7433>

¹**Yurii Zaiets**, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-1836-2010>

¹**Liudmyla Shevchuk**, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>

³**Oleksandr Gustieliev**, <https://orcid.org/0000-0001-8257-358X>

¹**Oleksandr Kutsman**, <https://orcid.org/0000-0002-4510-4570>

¹National Transport University, Kyiv, Ukraine

²Kyiv National University of Structures and Architecture, Kyiv, Ukraine

³Municipal Corporation «Kyivavtodor», Kyiv, Ukraine

MECHANICAL EFFECTS AND PARADOXICAL PHENOMENA IN THE THERMO ELASTIC LOADING OF THE ROAD COATING STRUCTURES

Abstract

Introduction. The results of surveillance of the processes of roads structures under climatic conditions of Ukraine testify that, as a rule, their largest intensity occurs as a consequence of daily and seasons changes of the environmental temperature. As this takes place, at the initial stage, the most noticeable delaminations and destructions are realized in form of transversal cracks in the zones of its free surface. In this publication, the possibility of these destructions initiation under change in time of the temperature perturbations is analyzed taking into account the variation of the stiffness characteristics of the road materials/

Problems. In the last time, throughout the world motorways, the tendency of enlargement of heavy trucks traffic intensity and increase of heavy load multi-axes automobiles and motor trains is realized. Essential influence on the road structures stress-strain states is rendered by the temperature and climate actions stipulated by daily and seasonal changes of the road coverings temperatures. The main property of the thermo-loaded states analysis of the road structures is associated their multi-parametericity. First of all, the road overlay is essentially non-homogeneous. In the mechanics of deformable media, the multi-layer heterogeneous systems are separated, which consist of elastic layers with different thermo-mechanical characteristics, and gradiently heterogeneous media are considered with properties continuously changing along spatial variables. Inasmuch as the road overlay can be related as multi-layered heterogeneous systems in mathematic modelling thermo-mechanic processes, it is necessary to take into consideration the specificity of distribution of the fields of temperature, strains and stresses (and sometimes, displacements) are discontinuous and it is difficult to describe them by simple analytic or numerical methods. These peculiarities are the reasons of essential complication of mechanical phenomena occurring in these structures.

Purpose. The mathematic modeling of thermo-elastic loading of the road coating structures

The research object. The research object is mathematic modelling of thermo-elastic loading phenomena in the road overlay structures. The mathematic models of the phenomena of thermo elastic

deforming the layered road coatings with planar and curvilinear surfaces under conditions of daily and seasonally changing temperatures and transport loads are proposed. It is shown through the use of finite element method that the temperature fields caused by the external thermal perturbations have the modes of high gradient boundary effects formed in the boundary zones of the system. For this reason, the generated stress functions are discontinuous and include the concentration zones in different regions of the body. The spots with maximal values of tensile and shear forces, initiating the structure, delamination, are established. The loading situations for different values of geometric, structural and thermal parameters are considered. Some paradoxical effects in the mechanisms of the system destruction are detected.

Conclusions. The problem of the numerical investigation of the layered is stated with allowance made for change and seasonal variations of the environmental temperatures. The constitutive differential equations are formulated, their finite element analogs are constructed. It is established that the stated problem is singularly perturbed at the selected values of the geometric and thermo-mechanic parameters of the road structure and the temperature fields (evolving in time) have the forms of boundary effects in the vicinity of the first and second layers of the road. It is shown that the maximal values of longitudinal tensile stresses in the top layer of the overlay and of shear stresses are localized between the first and so they can be the main cause of the lateral crack initiation and road destruction in the winter and spring seasons.

Key words: road pavement, road pavement structure, thermoelastic stress, temperature field, stress field.

¹Мозговой В.В., д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-1032-8048>

²Гайдайчук В.В., д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-2059-7433>

¹Заец Ю.О., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-1836-2010>

¹Шевчук Л.В., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>

³Густелев А.А., <https://orcid.org/0000-0001-8257-358X>

¹Куцман А.М., <https://orcid.org/0000-0002-4510-4570>

¹Национальный транспортный университет, г. Киев, Украина

²Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина

³Коммунальная корпорация «Киевавтодор», г. Киев, Украина

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ПАРАДОКСЫ ЯВЛЕНИЙ ТЕРМОУПРУГОГО НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация

Введение. Результаты наблюдений за процессами разрушения конструкций дорог в климатических условиях Украины свидетельствуют о том, что, как правило, наиболее интенсивно они происходят в результате суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды, причем на начальном этапе разрушений наиболее заметными оказывается появление на дорогах поперечных трещин и расслоения конструкции в зоне ее свободной поверхности. В данной работе анализируется возможность инициирования таких разрушений под воздействием переменных по времени температурных возмущений с учетом вызванных ими изменений характеристик жесткостных свойств дорожных материалов.

Проблематика. За последние годы во всем мире на автомобильных дорогах наблюдается тенденция увеличения интенсивности движения транспортных средств и рост доли грузовых автомобилей и многоосных автопоездов с повышенным давлением в пневматиках. Значительное влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций дорог осуществляют

климатические и тепловые воздействия, вызванные суточными и сезонными изменениями температуры дорожных покрытий. Главной особенностью задач анализа термонапряженного состояния дорожной конструкции является их многопараметричность. Прежде всего, конструкции дорожных покрытий существенно неоднородны. В механике сплошных сред различают слоисто-неоднородные системы, состоящие из нескольких упругих слоев с различными термомеханическими характеристиками, и градиентно неоднородные среды, свойства которых изменяются непрерывно по пространственным переменным. Поскольку дорожное покрытие можно отнести к слоисто-неоднородным системам, при математическом моделировании термомеханических процессов, которые в них протекают, приходится иметь дело с присущей им спецификой распределения полей температуры, деформаций и напряжений. Дело в том, что функции деформаций и напряжений (а иногда и перемещений), которые у них возникают, оказываются разрывными и их трудно описывать простыми аналитическими и численными средствами. С этой особенностью связаны и значительные осложнения механических явлений, которые в них возникают.

Цель исследований. Математическое моделирование явлений термоупругого напряжения в конструкциях дорожных одежд.

Методы и результаты исследований. Предложены математические модели явлений термонапряженного деформирования слоисто-неоднородных дорожных покрытий с плоскими и искривленными поверхностями в условиях суточных и сезонных изменений внешней температуры и действия транспортных нагрузок. Методами конечно-элементного моделирования показано, что поля температуры в конструкции покрытия, вызванные эволюцией внешнего теплового возмущения, имеют вид высокоградиентных краевых эффектов, образованных в прикраевой зоне системы, поэтому обусловленные ими функции напряжений являются разрывными и включают концентраторы в различных зонах массива. Обнаружены участки максимальных деформаций растяжения и сдвига, которые способствуют расслоению конструкции. Рассмотрены случаи нагрузок при различных значениях геометрических, конструктивных и температурных параметров. Установлены некоторые неожиданные эффекты в механизмах разрушения системы.

Выводы. Поставленная задача о численном исследовании термоупругого деформирования слоистых дорожных одежд с учетом изменения характеристик жесткости их материалов при суточных и сезонных изменениях температуры окружающей среды. Сформулированы разрешимые уравнения, построены их конечно-элементные аналоги. Установлено, что при выбранных значениях геометрических и термомеханических параметров дорожной конструкции задача нестационарной теплопроводности при суточных изменениях окружающей температуры является сингулярно возмущенной, поля температуры, которые эволюционируют во времени, имеют вид краевого эффекта, преимущественно сосредоточенного в зоне первого или первого и второго асфальтобетонных слоев и обладают высокими градиентами. Показано, что высокоградиентная неоднородность эволюционирующих полей температуры и слоистая неоднородность механических характеристик покрытия дорог, которые сопровождаются также изменением модуля упругости асфальтобетонных материалов при изменении температуры, обуславливают существенную неоднородность полей напряжений, связанную с разрывами функций напряжений и их концентрацией в краевой зоне в свободной поверхности. Установлено, что пиковые значения продольных напряжений растяжения в верхнем слое покрытия и сдвиговых напряжений, локализованных между первым и вторым слоями, могут быть причиной наблюдаемых на практике в зимнее время образований на дороге на начальной стадии разрушения поперечных трещин и ее расслоение.

Ключевые слова: дорожное покрытие, конструкция дорожной одежды, термонапряженное состояние, поле температур, поле напряжений.