

ТРИ МЕХАНІЗМИ ВИНИКНЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНЬ І ТЕРМОРУЙНУВАНЬ У ПРУЖНИХ ТІЛАХ

Гуляєв В.І., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, valery@gulyayev.com.ua, orcid.org/0000-0002-5388-006X

Шлюнь Н.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, nataliyashlyun@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1040-8870

THREE MECHANISMS OF ORIGINATION OF THERMAL STRESSES AND THERMAL DESTRUCTIONS IN ELASTIC BODIES

Gulyayev V.I., Dr. Sci., National Transport University, Kyiv, Ukraine, valery@gulyayev.com.ua, orcid.org/0000-0002-5388-006X

Shlyun N.V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, nataliyashlyun@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1040-8870

Вступ. Відмінною особливістю явищ зародження термонапружень в пружних тілах та спорудах зазвичай зумовлена не тим, що при змінах їх температури вони деформуються, а тим, що їх термодформування обмежені і не являються вільними. Так, якщо тіло однорідне і на його переміщення не накладені зовнішні в'язі, то при постійній або лінійно змінній вздовж просторових змінних температурі термонапруження в ньому дорівнюють нулю [2,10]. У зв'язку з цим можна виділити три механізми генерування термонапружень в тілах: зовнішній, внутрішній і градієнтний. Зовнішній механізм має місце [5,6], коли на переміщення тіла накладені зовнішні обмеження. Внутрішній механізм зустрічається в системах з неоднорідними термомеханічними властивостями, наприклад, в композитах, а також дорожніх і мостових покриттях [2]. Градієнтний механізм реалізується при швидких змінах полів температури у часі та просторі, що іноді називається тепловими ударами [14].

На практиці, як правило, найбільш наочними є наслідки прояву зовнішнього механізму, оскільки при його реалізації в системі виникають яскраво виражені пошкодження. Тому на практиці таким ефектам приділяється підвищена увага й для їх математичного моделювання були розроблені спеціальні скінченноелементні програми, що дозволяють прогнозувати їх з достатньою точністю.

При цьому, звичайно, не залишилась без уваги очевидна особливість зовнішнього механізму, пов'язана з тим, що виникаючі при його прояві термонапруження в першу чергу залежать від коефіцієнта лінійного термічного розширення (КЛТР) матеріалу та зростають з його збільшенням [17]. Тому при розробці нових композитних матеріалів вважалось, що якщо в матрицю композиту додати включення з дуже низьким значенням КЛТР, то зведений (ефективний) КЛТР всього композиту знизиться й термонапруження в ньому зменшаться. В результаті розроблені навіть композити з нульовим ефективним КЛТР, фази якого мають додатні та від'ємні значення цих коефіцієнтів [3,4,13,15]. Проектувальники таких матеріалів, звичайно, знають про прояв додаткових внутрішньоструктурних термонапружень в композиті, що викликані несумісності термомеханічних властивостей його фаз, але, мабуть, інтуїтивно вважали їх несуттєвими і не приділяли їм достатньої уваги. У всякому разі в науковій літературі ці питання не обговорюються, хоча композити з малими ефективними КЛТР продовжують розроблятися [3,4].

В той же час, як показують результати теоретичних моделювань [2,7-9], відмічений спосіб нейтралізації дії зовнішнього механізму в композиті за рахунок мінімізації значення його ефективного КЛТР може супроводжуватися активацією внутрішнього механізму, пов'язаного з необхідністю погодження несумісних внутрішньоструктурних термодформацій фракцій композита. При цьому виявляється, що термонапруження, які викликані зовнішнім механізмом, не зникають. Просто їх заганяють в середину та приховано перерозподіляють на інтерфейсних поверхнях між фракціями композиту. Найчастіше ці внутрішньоструктурні термонапруження призводять не тільки до локальних мікропошкоджень та порушення адгезії між фазами, але в подальшому вони переходять в глобальні тріщини та деструкції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Тут необхідно відмітити принципову відмінність дії силових та термічних навантажень. Справа в тому, що, як показано в роботах Коваленко [1], Elwardany M. зі співавторами [5-6], Hetnarski R.B., Eslami M.R. [10], Nowacki W. [12], якщо під дією силових («мертвих») навантажень в механічній системі виникають тріщини, то рівні напружень в цій зоні продовжують залишатися високими або навіть зростають, однак, якщо в системі виникають термотріщини, то термонапруження, що їх викликають, різко падають. Ця обставина, може бути причиною того, що внутрішньоструктурні термотріщини часто залишаються непоміченими, а внутрішній механізм генерування термонапружень виявляється недооціненим. Приймаючи до уваги, що ці напруження важко піддаються експериментальному моделюванню, можна відмітити зростаючу роль їх теоретичного аналізу.

Розглянуті в роботах авторів [2,7-9] приклади визначення внутрішньоструктурних термонапружень в композитах з несумісними термомеханічними параметрами відносяться до випадків, коли температура в системі постійно однакова в усіх точках всіх фракцій. Проте, на практиці, вельми розповсюдженими є випадки, коли внаслідок зміни в часі температури навколишнього середовища температура матриці композиту змінюється, температура арматури не встигає вирівнятися з нею й температура системи в її різних точках виявляється різною. В загальному випадку задача визначення термонапружень в такій системі виявляється доволі складною, оскільки при цьому можуть включатися в дію всі три механізми генерування термонапружень (Зовнішній, Внутрішній та Градієнтний), поля термонапружень набувають складну структуру й вони можуть бути визначені тільки методом скінченних елементів.

Більш простою виявляється ситуація, коли температури кожної з фракцій є постійними, але відмінними один від одного. Для цього випадку, коли температурні градієнти в межах кожної фази дорівнюють нулю, може бути отриманий аналітичний розв'язок задачі про визначення внутрішньоструктурних термонапружень на базі методів термопружності.

Виведення рівнянь термодформування та побудова їх розв'язків.

Для виведення рівнянь термодформування пружного стрижня в матриці, скористаємось циліндричною системою координат $O r \varphi z$, вісь Oz якої співпадає з віссю стрижня. Нехай властивості стрижня 1 та середовища 2 визначаються, відповідно, параметрами Ламе λ_1, μ_1 і λ_2, μ_2 та коефіцієнтами лінійного термічного розширення α_1 і α_2 . Температура тіла 1 змінилась на величину ΔT_1 , температура середовища 2 – на величину ΔT_2 . Радіус стрижня 1 дорівнює r_1 . Розглянемо випадок, коли система знаходиться в плоскому деформованому стані і відносні деформації $\varepsilon_z^{(i)}(r, \varphi, z) = 0$ ($i = 1, 2$).

Рівняння термопружної рівноваги елементів кожної фракції мають вид [1,11,12,16]:

$$\frac{d\sigma_r^{(i)}}{dr} + \frac{\sigma_r^{(i)} - \sigma_\varphi^{(i)}}{r} = 0, \quad (i = 1, 2). \quad (1)$$

Термонапруження, що сюди входять, визначаються через відносні деформації $\varepsilon_r^{(i)}, \varepsilon_\varphi^{(i)}, \varepsilon_z^{(i)}$ та прирости температур ΔT_i ($i = 1, 2$):

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i)\varepsilon_r^{(i)} + \lambda_i(\varepsilon_\varphi^{(i)} + \varepsilon_z^{(i)}) - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i\Delta T_i, \\ \sigma_\varphi^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i)\varepsilon_\varphi^{(i)} + \lambda_i(\varepsilon_r^{(i)} + \varepsilon_z^{(i)}) - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i\Delta T_i, \\ \sigma_z^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i)\varepsilon_z^{(i)} + \lambda_i(\varepsilon_r^{(i)} + \varepsilon_\varphi^{(i)}) - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i\Delta T_i, \end{aligned} \quad (2)$$

$(i = 1, 2).$

Покладемо, що $\varepsilon_z^{(i)}(r, \varphi, z) = 0$. Тоді рівності (2) зведуться до вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i)\varepsilon_r^{(i)} + \lambda_i\varepsilon_\varphi^{(i)} - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i\Delta T_i, \\ \sigma_\varphi^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i)\varepsilon_\varphi^{(i)} + \lambda_i\varepsilon_r^{(i)} - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i\Delta T_i, \\ \sigma_z^{(i)}(r) &= \lambda_i(\varepsilon_r^{(i)} + \varepsilon_\varphi^{(i)}) - (3\lambda_i + 2\mu_i)\alpha_i\Delta T_i, \end{aligned} \quad (i = 1, 2). \quad (3)$$

Виразимо деформації через радіальні переміщення

$$\varepsilon_r^{(i)}(r) = \frac{\partial u^{(i)}}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi^{(i)}(r) = \frac{u^{(i)}}{r}, \quad (i = 1, 2). \quad (4)$$

За допомогою рівностей (3), (4) рівняння (1) зводимо до форми:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ru^{(i)}) \right] = 0, \quad (i=1,2). \quad (5)$$

Система (5) має загальний розв'язок

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= rC_1 + \frac{1}{r}C_2 \quad (0 \leq r \leq r_1), \\ u^{(2)}(r) &= rC_3 + \frac{1}{r}C_4 \quad (r \geq r_1). \end{aligned} \quad (6)$$

Константи C_k ($k = \overline{1,4}$), що сюди входять, визначаються з початкової умови

$$u^{(0)}(0) = 0, \quad (7)$$

умов контакту на інтерфейсній поверхні $r = r_1$

$$u_r^{(1)}(r_1) = u_r^{(2)}(r_1), \quad \sigma_r^{(1)}(r_1) = \sigma_r^{(2)}(r_1), \quad (8)$$

та умови рівності нулю напруження $\sigma_r^{(2)}$

$$\sigma_r^{(2)}(r) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad r \rightarrow \infty. \quad (9)$$

В наслідок умови (7) маємо

$$C_2 = 0. \quad (10)$$

За допомогою рівнянь (6) виведемо співвідношення

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(1)}(r) &= C_1, \quad \varepsilon_\phi^{(1)}(r) = C_3 + \frac{1}{r^2}C_4, \\ \varepsilon_r^{(2)}(r) &= C_3 - \frac{1}{r^2}C_4, \quad \varepsilon_\phi^{(2)}(r) = C_3 + \frac{1}{r^2}C_4, \\ \sigma_r^{(1)}(r) &= 2(\lambda_1 + \mu_1)C_1 - (3\lambda_1 + 2\mu_1)\alpha_1\Delta T_1, \\ \sigma_r^{(2)}(r) &= 2(\lambda_2 + \mu_2)C_3 - \frac{2\mu_2}{r^2}C_4 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2\Delta T_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Умова (9) і рівняння (11) дозволяють визначити

$$C_3 = \frac{3\lambda_2 + 2\mu_2}{2(\lambda_2 + \mu_2)}\alpha_2\Delta T_2. \quad (12)$$

Для обчислення констант C_1 і C_4 використовуються рівняння (8) і перетворення за допомогою співвідношень (10) – (12)

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{3\lambda_2 + 2\mu_2}{2(\lambda_2 + \mu_2)}\alpha_2\Delta T_2 + \frac{1}{r_1^2}C_4, \\ 2(\lambda_1 + \mu_1)C_1 - (3\lambda_1 + 2\mu_1)\alpha_1\Delta T_1 &= -\frac{2\mu_2}{r_1^2}C_4. \end{aligned} \quad (13)$$

Розв'язок цієї системи дає

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1\Delta T_1 + (3\lambda_2 + 2\mu_2)\mu_2\alpha_2\Delta T_2}{2(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}, \\ C_4 &= \frac{r_1^2 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1\Delta T_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2\Delta T_2]}{2(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Маючи константи C_k ($k = \overline{1,4}$), за допомогою рівностей (6) знаходимо функції радіальних переміщень

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= \frac{r [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1\Delta T_1 + (3\lambda_2 + 2\mu_2)\mu_2\alpha_2\Delta T_2]}{2(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (0 \leq r \leq r_1), \\ u^{(2)}(r) &= r \frac{(3\lambda_1 + 2\mu_2)}{2(\lambda_2 + \mu_2)}\alpha_2\Delta T_2 + \\ &+ \frac{r_1^2 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1\Delta T_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2\Delta T_2]}{2(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (r \geq r_1) \end{aligned} \quad (15)$$

Рівняння (11) дозволяють знайти термонапруження в стрижні

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(1)}(r) &= \sigma_\varphi^{(1)}(r) = -\frac{\mu_2 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1\Delta T_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2\Delta T_2]}{(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}, \\ \sigma_z^{(1)}(r) &= \frac{[-(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\mu_1 + \mu_2)\alpha_1\Delta T + (3\lambda_2 + 2\mu_2)\lambda_1\mu_2\alpha_2\Delta T_2]}{(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)},\end{aligned}\quad (16)$$

(0 ≤ r ≤ r₁)

і в середовищі 2

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(2)}(r) &= -\frac{r_1^2 \mu_2 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1\Delta T_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2\Delta T_2]}{r^2 (\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}, \\ \sigma_\varphi^{(2)}(r) &= \frac{r_1^2 \mu_2 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1\Delta T_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2\Delta T_2]}{r^2 (\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}, \\ \sigma_z^{(2)}(r) &= -\frac{\mu_2 (3\lambda_2 + 2\mu_2)}{(\lambda_2 + \mu_2)} \alpha_2 \Delta T_2, \quad (r \geq r_1)\end{aligned}\quad (17)$$

Як і у випадку, коли прирости температури ΔT у фракціях 1 і 2 однакові, тут напруження (16) в тілі 1 однакові у всіх його точках, причому $\sigma_r^{(1)} = \sigma_\varphi^{(1)}$. Формули (16), (17) свідчать про те, що радіальні термонапруження $\sigma_r(r)$ неперервні у всій області, що виділена для обчислень, колові термонапруження $\sigma_\varphi(r)$ терплять розрив неперервності і змінюють знак на контактній поверхні $r = r_1$. При цьому термонапруження в середовищі 2 максимальні на інтерфейсній поверхні $r = r_1$, $\sigma_r^{(2)}(r_1) = -\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$ і вони спадають пропорційно величині r^{-2} .

Відмітимо, що вказані властивості відображають прояви в даному випадку принципу Сен Венана для плоскої задачі теорії пружності, у відповідності до якого зрівноважена система сил (система з нульовим головним вектором і головним моментом) впливає на напружений стан пружного середовища в малому околі цих сил і цей вплив швидко спадає пропорційно величині r^{-2} при віддаленні від місця локалізації навантаження. Ця обставина дозволяє в обчисленнях не враховувати вплив сусідніх армуючих елементів на виділений для обчислення елемент і досліджувати ізольовано його термонапружений стан.

Числові приклади.

Нехай сталевий армуючий стрижень радіусу $r_1 = 0,004$ м з термомеханічними параметрами $\lambda_1 = 115$ ГПа, $\mu_1 = 76,5$ ГПа, ($E_1 = 210$ ГПа, $\nu_1 = 0,3$), $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹ знаходиться в асфальтобетонному середовищі з параметрами $\lambda_2 = 1,38$ ГПа, $\mu_2 = 0,923$ ГПа, ($E_2 = 2,4$ ГПа, $\nu_2 = 0,3$), $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ °C⁻¹. Прирости температур обох фракцій однакові $\Delta T_1 = \Delta T_2 = -20$ °C. Для цього випадку напруження на інтерфейсній поверхні $r = r_1$ цих фракцій при довільних значеннях r_1 склали $\sigma_r^{(1)}(r_1) = \sigma_\varphi^{(1)}(r_1) = \sigma_r^{(2)}(r_1) = -0,851$ МПа, $\sigma_\varphi^{(2)}(r_1) = 0,851$ МПа. Як видно, ці величини далекі від граничних напружень для обох фракцій, однак, необхідно врахувати, що вони обчислені при порівняно невеликих значеннях приростів $\Delta T_1, \Delta T_2$ і, тим не менш, можуть відігравати роль помітних добавок до напружень, що викликані транспортними навантаженнями.

Змінені значення термонапружень при почергових варіюваннях температур фракцій на ± 3 °C наведені в інших стовпчиках Табл. 1. Їхні прирости більш помітні при варіюванні температури матриці і в цих випадках вони можуть перевищувати 20% від їх вихідних значень.

Висновки

1. Виконано теоретичне дослідження механізму зародження внутрішньоструктурних термонапружень в композитних матеріалах зі стрижневою арматурою, зумовлених структурною неоднорідністю системи, наявністю в ній сталих та змінних полів температури та несумісністю термомеханічних параметрів (модулів пружності, коефіцієнтів Пуассона та коефіцієнтів лінійного термічного розширення).

Таблиця 1 – Значення внутрішньоструктурних термонапружень у фракціях композиту при різних значеннях їх температур

Table 1 – Values of intrastructural thermal stresses in fractions of the composite at different values of their temperatures

$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	-20	-20	-20	-23	-17
$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	-20	-23	-17	-20	-20
$\sigma_r^{(1)}(r_1)$ МПа	-0,851	-1,05	-0,652	-0,779	-0,923
$\sigma_\varphi^{(1)}(r_1)$ МПа	-0,851	-1,05	-0,652	-0,779	-0,923
$\sigma_r^{(2)}(r_1)$ МПа	-0,851	-1,05	-0,652	-0,779	-0,923
$\sigma_\varphi^{(2)}(r_2)$ МПа	0,851	1,05	0,652	0,779	0,923

2. Із застосуванням теорії термопружності методами математичного аналізу сформульовані системи звичайних диференціальних рівнянь для триточкових крайових задач з розривними коефіцієнтами. Виведені додаткові співвідношення для крайових умов і умов спряження шуканих функцій на інтерфейсній поверхні. В замкнених формах побудовані розв'язки поставленої задачі для пружних середовищ в неоднорідних полях температури.

3. Встановлено, додаткові внутрішньоструктурні термонапруження концентруються на поверхні контакту між фазами композиту. Вони представляють собою систему сил з нульовим головним вектором та головним моментом і тому, у відповідності до принципу Сен Венана, їх вплив на термодетформований та напружений стан матриці спадає пропорційно величині r^{-2} , де r – радіальна координата. Розглянуто конкретні приклади.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Коваленко А.Д. Основы термоупругости: Киев: Наукова Думка, 1970. 239 с.
2. Шлюнь Н.В., Заєць Ю.О. Про внутрішній механізм термопошкоджень в армованих композитах з термомеханічною несумісністю їх фаз. Вісник НТУ. Серія «Технічні науки». – К. НТУ, 2022. Вип. 3 (53), с.427-432.
3. Cristian Karch. Micromechanical analysis of thermal expansion coefficient. Modeling and Numerical Simulation of MATERIAL Science. 2014, V.3, pp. 1-15.
4. Chu C.N., Saka N., Shu N.P. Negative thermal expansion: a review. Material Science and Engineering, 1987, V.95, pp. 303-308.
5. Elwardany M., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced damage. *Construction and Building Materials*. 2020. 255, 119331. – P. 1-18.
6. Elwardany M.D., King G., Planche J.P., Rodezno C., Christensen D., Fertig III R.S., Kuhn K.H., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. *Asphalt Paving Technol: J. Assoc. Asphalt Paving Technol*. 2019. 88.
7. Gulyayev V.I., Mozgovyi V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V. Modelling negative thermomechanical effects in reinforced road structures with thermoelastic incompatibility of coating and reinforcement materials. System Research and Information Technologies. 2022. 2. pp.117-127. 403 <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.2.09>
8. Gulyayev V.I., Shlyun N.V. Intrastructural Thermal Stresses in Composites with Homogeneous and Heterogeneous Spherical Inclusions. *Strength of Materials*, 2023, 55(2), pp. 254–264.
9. Gulyayev V.I., Mozgovyi V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V., Bilobrytska O.I. Negative thermomechanical effects in granular composites with incompatible thermomechanical parameters of their components. *International Review of Mechanical Engineering*, 2022, 16(4), pp. 188–197. <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i4.21996>.
10. Hetnarski R.B., Eslomi M.R. Thermalstress – Advanced Theory and Applications Springer Science Business Media B.V., 2009.
11. Noda N., Hetnarski R.B. and Tanigawa Y. Thermal Stresses. 2nd edition, New York: Taylor and Francis. – 2003.
12. Nowacki W. Thermoelasticity, 2 nd ed. Oxford: PWN – Polish Scientific Publishers, Warsaw and Pergamon Press. 1986.

13. Rozen W., Ketler E., Hashin Z. Hollow glass fibre reinforced plastics. General Electric Missile & Space division. Philadelphia, 1962.
14. Setiawan Dian M. The role of temperature differential and subgrade quality stress, curling, and deflection behavior of rigid pavement. *Journal of the mechanical behavior of Materials*. 2011. V.29, Issue 5-6, id.10,12 pp.
15. Takenaka K. Negative Thermal Expansion Materials: Technological Key for Control of Thermal Expansion. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2012. Vol. 13. P.1-11. DOI:10.1088/1468-6996/13/1/013001
16. Trussdell C., Carson D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics, Vol.via.2, Berlin, spring, 1972.
17. Weng G.I. Some elastic properties of reinforced solids with special reference to isotropic ones containing spherical inclusions, *Int. J. Eng. Sci.*, 22, No.7, 845–856 (1984).

REFERENCES

1. Kovalenko A.D. *Osnovy termoupruhosty*: Kyev: Naukova Dumka, 1970. 239 p.
2. Shlyun N.V., Zaiets Yu. O. About the internal mechanism of thermal damage in reinforced composites with thermomechanical incompatibility of their phases. *Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences»*. Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 3 (53).p.427-432.
3. Cristian Karch. Micromechanical analysis of thermal expansion coefficient. *Modeling and Numerical Simulation of MATERIAL Science*. 2014, V.3, pp. 1-15.
4. Chu C.N., Saka N., Shu N.P. Negative thermal expansion: a review. *Material Science and Engineering*, 1987, V.95, pp. 303-308.
5. Elwardany M., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced damage. *Construction and Building Materials*. 2020. 255, 119331. – P. 1-18.
6. Elwardany M.D., King G., Planche J.P., Rodezno C., Christensen D., Fertig Ill R.S., Kuhn K.H., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. *Asphalt Paving Technol: J. Assoc. Asphalt Paving Technol*. 2019. 88.
7. Gulyayev V.I., Mozgovyi V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V. Modelling negative thermomechanical effects in reinforced road structures with thermoelastic incompatibility of coating and reinforcement materials. *System Research and Information Technologies*. 2022. 2. pp.117-127. 403 <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.2.09>
8. Gulyaev V.I., Shlyun N.V. Intrastructural Thermal Stresses in Composites with Homogeneous and Heterogeneous Spherical Inclusions. *Strength of Materials*, 2023, 55(2), pp. 254–264.
9. Gulyayev V.I., Mozgovyi V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V., Bilobrytska O.I. Negative thermomechanical effects in granular composites with incompatible thermomechanical parameters of their components. *International Review of Mechanical Engineering*, 2022, 16(4), pp. 188–197. <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i4.21996>.
10. Hetnarski R.B., Eslomi M.R. *Thermalstress – Advanced Theory and Applications* Springer Science Business Media B.V., 2009.
11. Noda N., Hetnarski R.B. and Tanigawa Y. *Thermal Stresses*. 2nd edition, New York: Taylor and Francis. – 2003.
12. Nowacki W. *Thermoelasticity*, 2 nd ed. Oxford: PWN – Polish Scientific Publishers, Warsaw and Pergamon Press. 1986.
13. Rozen W., Ketler E., Hashin Z. Hollow glass fibre reinforced plastics. General Electric Missile & Space division. Philadelphia, 1962.
14. Setiawan Dian M. The role of temperature differential and subgrade quality stress, curling, and deflection behavior of rigid pavement. *Journal of the mechanical behavior of Materials*. 2011. V.29, Issue 5-6, id.10,12 pp.
15. Takenaka K. Negative Thermal Expansion Materials: Technological Key for Control of Thermal Expansion. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2012. Vol. 13. P.1-11. DOI:10.1088/1468-6996/13/1/013001
16. Trussdell C., Carson D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics, Vol.via.2, Berlin, spring, 1972.
17. Weng G.I. Some elastic properties of reinforced solids with special reference to isotropic ones containing spherical inclusions, *Int. J. Eng. Sci.*, 22, No.7, 845–856 (1984).

РЕФЕРАТ

Гуляев В.І. Три механізми виникнення термонапружень і терморуйнувань у пружних тілах / В.І. Гуляев, Н.В. Шлюнь // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2023. – Вип. 3 (57).

Однією з основних причин, що знижують міцність та довговічність композитних матеріалів, які працюють в температурних полях, що змінюються по просторових змінним і в часі, є їхня структурна неоднорідність і несумісність термомеханічних параметрів їх фаз. Внутрішній механізм, що виникає в таких ситуаціях, неперервного суміщення неоднакових термопереміщень і термодформацій сусідніх елементів пружного середовища призводить до появи в ньому додаткових пружних деформацій та напружень, які впливають на термоміцність системи. До теперішнього часу основні закономірності прояву цього механізму вивчені недостатньо повно.

Актуальність проблеми дослідження цих питань стає особливо гострою у зв'язку з розробкою композитів із заданими термомеханічними параметрами, зокрема, з мінімальними значеннями коефіцієнтів їх лінійного термічного розширення. Як правило, ця ціль досягається за рахунок комбінування фракцій матеріалу з додатними та від'ємними значеннями їх параметрів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОМПОЗИТНИЙ МАТЕРІАЛ, ЗМІННА ТЕМПЕРАТУРА, ТЕРМОНАПРУЖЕННЯ, ТЕРМОРИЙНУВАННЯ, ТЕРМОМІЦНІСТЬ.

ABSTRACT

Gulyayev V.I., Shlyun N.V. Three mechanisms of origination of thermal stresses and thermal destructions in elastic bodies. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2023. – Issue 3 (57).

One of the main reasons that reduce the strength and durability of composite materials that work in temperature fields that vary spatially and over time is their structural heterogeneity and incompatibility of the thermomechanical parameters of their phases. The internal mechanism that arises in such situations, the continuous combination of unequal thermal displacements and thermal deformations of neighboring elements of the elastic medium, leads to the appearance of additional elastic deformations and stresses in it, which affect the thermal strength of the system. Until now, the main regularities of the manifestation of this mechanism have not been fully studied.

The urgency of the problem of researching these issues becomes especially acute in connection with the development of composites with given thermomechanical parameters, in particular, with minimum values of the coefficients of their linear thermal expansion. As a rule, this goal is achieved by combining material fractions with positive and negative values of their parameters.

KEY WORDS: COMPOSITE MATERIAL, VARIABLE TEMPERATURE, THERMAL STRESS, THERMAL DESTRUCTION, THERMAL STRENGTH.

АВТОРИ:

Гуляев Валерій Іванович, доктор технічних наук, Національний транспортний університет, професор, e-mail: valery@gulyayev.com.ua, тел. +38(044) 280-71-09, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, orcid.org/0000-0002-5388-006X.

Шлюнь Наталія Володимирівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент, e-mail: nataliyashlyun@gmail.com, тел. +38(044) 280-71-09, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, orcid.org/0000-0003-1040-8870.

AUTHORS:

Gulyayev V.I., Dr. Sci., National Transport University, tel. +38(044) 280-71-09, Ukraine, 01103, Kyiv, Boichuk str., 42, e-mail: valery@gulyayev.com.ua, orcid.org/0000-0002-5388-006X

Shlyun N.V., Ph.D., National Transport University, tel. +38(044) 280-71-09, Ukraine, 01103, Kyiv, Boichuk str., 42, e-mail: nataliyashlyun@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1040-8870

РЕЦЕНЗЕНТИ:

REVIEWERS: