

ПРО ВНУТРІШНІЙ МЕХАНІЗМ ТЕРМОПОШКОДЖЕНЬ В АРМОВАНИХ КОМПОЗИТАХ З ТЕРМОМЕХАНІЧНОЮ НЕСУМІСНІСТЮ ЇХ ФАЗ

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

Заєць Ю.О., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, yzaets@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1836-2010

ABOUT THE INTERNAL MECHANISM OF THERMAL DAMAGE IN REINFORCED COMPOSITES WITH THERMOMECHANICAL INCOMPATIBILITY OF THEIR PHASES

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

Zaiets Yu.O., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, yzaets@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1836-2010

Вступ. При створенні сучасних композитів зазвичай використовуються два шляхи. Перший шлях пов'язаний із введенням у неорганічну металеву або органічну полімерну матрицю високоміцних волокон зі скла, вуглеводню, берилію, сталі або ниткоподібних монокристалів. В результаті такого комбінування максимальні значення міцності поєднуються з високим модулем пружності і невеликою щільністю. При другому варіанті створення композиту матриця наповнюється диспергованими твердими частинками. Властивості міцності волокнистих композитів визначаються властивостями волокон, водночас як матриця, в основному, перерозподіляє напруження між армуючими елементами. Тому міцність і модуль пружності волокон повинні бути значно більшими, ніж міцність і модуль пружності матриці. Крім високої міцності композитні матеріали на металевій основі мають високу жароміцність. До того ж волокна в композитах перешкоджають поширенню тріщин, що зароджуються в матриці і практично повністю запобігають раптовій крихкій руйнації.

Проте для композитів, що працюють при підвищеній і зниженій температурі та в умовах її частоті зміни, потрібно приділяти особливу увагу їх термоміцності. Помічено, що вона залежить від багатьох факторів, зокрема від: 1) коефіцієнта термічного розширення матеріалу; 2) коефіцієнта теплопровідності матеріалу; 3) пружних властивостей матеріалу; 4) неоднорідності розподілу цих властивостей у досліджуваних матеріалах; 5) високих градієнтів полів температури, що призводять до неоднакових температурних розширень і скорочень елементів середовища та інтенсивних термонапружень. Сюди можна додати наявність чи відсутність додаткових обмежень на переміщення елементів системи, що перешкоджають її вільному деформуванню.

Тут важливо підкреслити, що якщо тіло (або середовище) є термомеханічно однорідним і вільне від зовнішніх обмежень (зв'язків) то температурні поля постійної інтенсивності або лінійно змінні вздовж будь-якого напрямку (лінійні градієнти), не збуджують у тілі термонапруження.

При таких полях температури термонапруження, що спричиняють термопошкодження в матеріалі, можуть виникати тільки за наявності зовнішніх обмежень на переміщення або внутрішніх неоднорідностях. У зв'язку з цим у роботах [2, 10] запропоновано розрізняти два механізми ініціювання термоушкоджень – зовнішній і внутрішній. Можливість зародження в тілі термопошкоджень, спричинених зовнішнім механізмом, встановлюється на базі постановки та вирішення крайових завдань теплопровідності та термопружності в області, яку займає тіло [2]. Такий підхід широко використовується в інженерії. Внутрішньому механізму утворення термонапружень в середовищах і тілах (особливо в композитах з мікро- і макроволокнами та включеннями у вигляді частинок) практично не надають уваги, хоча значна кількість робіт присвячена визначенню їх усереднених (приведених) термохарактеристик [8, 9]. Водночас, як показали попередні дослідження авторів, у випадку термомеханічної несумісності властивостей матриці та волокна (стрижневої арматури), навіть при помірних значеннях постійної температури зумовлені нею її термонапруження в матриці можуть досягати її граничної міцності і бути причиною локальних терморуйнувань. В зв'язку з цим на базі методів термопружності поставлено і вирішено задачу про термонапружений стан пружного середовища з пружним стрижневим включенням при постійній температурі. Побудовано розв'язок задачі у замкнутій формі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У практиці створення композитів, що складаються з матриці, армованої волокнами або стрижнями, основна увага приділялася, як правило, аналізу приведених властивостей матеріалу, що характеризують його загальну жорсткість, міцність і термopружні властивості. Теоретичні основи таких проблем викладені в монографіях [5, 9]. Пізніше на більш детальному рівні стали вивчатися питання пружного деформування різних фаз композита з урахуванням їх термopружної взаємодії [6, 8]. У роботі [10] було звернено увагу на два можливі механізми пошкодження армованих композитів, зумовлених зовнішніми та внутрішніми зв'язками, що обмежують вільні термомеханічні переміщення елементів системи. При цьому залишався повністю не вивченим механізм термопошкодження, спровокований внутрішніми обмеженнями, пов'язаними з неоднорідністю композитного матеріалу. У статті [1] і монографії [2] на прикладі неоднорідних дорожніх матеріалів були виконані розрахунки неоднорідних термopружних систем з несумісними термомеханічними характеристиками їх фаз. На базі методів теорії термopружності [3, 4, 7, 11] було показано, що термopружна несумісність різних шарів покриття та його арматури може призводити до додаткових внутрішніх термонапружень, що викликають локальні пошкодження і деструкції навіть при помірних значеннях температури. Враховуючи все більш широке застосування композитів в техніці в умовах підвищених і знижених температур і недостатню вивченість внутрішнього механізму їх пошкодження, можна відзначити, що розглянута нижче задача про математичне моделювання додаткових внутрішніх термонапружень в композитах з волокнистою арматурою є актуальною.

Математична постановка задачі. Розглянемо задачу зародження додаткових внутрішніх термонапружень в системі матриця композиту-волокно (армуючий стрижень), збурених несумісністю їх термoeформації, зумовленої різними значеннями термомеханічних характеристик фаз матеріалу. Будемо вважати, що система вільна від зовнішніх обмежень (зв'язків), волокно є пружним циліндричним тілом 1 радіуса r_1 нескінченної довжини, матриця – пружне середовище з необмеженими розмірами (рис.1).

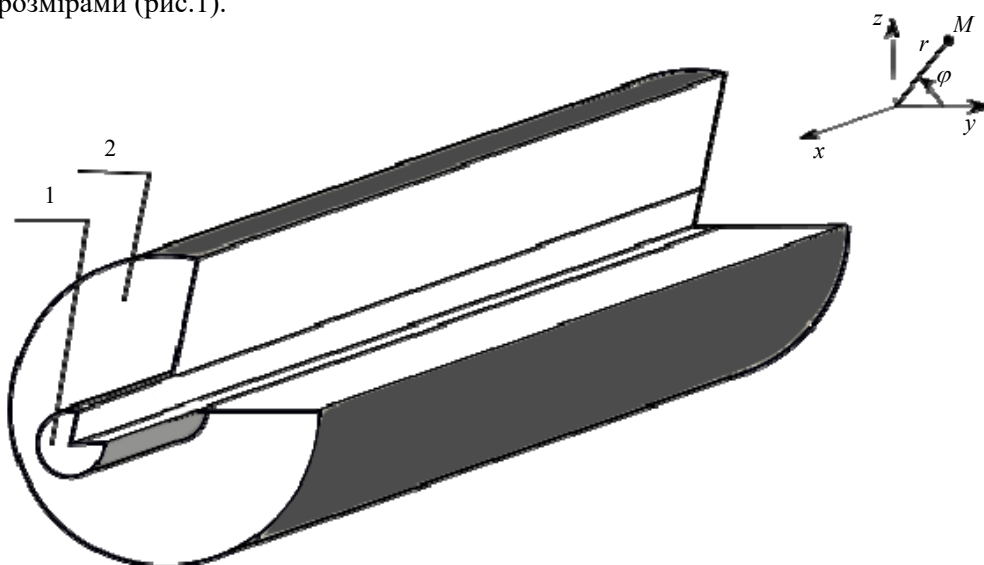


Рисунок 1 – Геометрична схема армуючого волокна 1 в пружному середовищі 2 матриці композиту
Figure 1 – Geometrical scheme of reinforcing fiber 1 in the elastic medium 2 of the composite matrix

Радіус циліндричної поверхні волокна дорівнює R , радіус r зовнішньої поверхні середовища 2 прямує до нескінченності. Термомеханічні характеристики волокна 1 визначається її параметрами Ламе λ_1, μ_1 та коефіцієнтом лінійного температурного розширення α_1 , для середовища 2 вони рівні $\lambda_2, \mu_2, \alpha_2$. Температура системи змінилася від нульового значення до величини T . Розглянемо випадок осісиметричного напруженого стану системи, коли напруження $\sigma_z = 0$. Рівняння термopружної рівноваги елементів системи мають вигляд [3, 4, 11]:

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

Тут r радіальна координата циліндричної системи координат, $u^{(i)}$ – радіальне переміщення, значення $i = 1$ відповідає елементу тіла 1, значення $i = 2$ – елементу середовища 2.

Система рівнянь (1) має розв'язки

$$u^{(1)}(r) = rC_1 + \frac{1}{r}C_2, \quad u^{(2)}(r) = rC_3 + \frac{1}{r}C_4. \quad (2)$$

Константи C_1, C_2, C_3, C_4 – можна визначити з умови нерухомості точки $r = 0$ тіла 1

$$u^{(1)}(0) = 0,$$

умов рівності радіальних переміщень $u^{(1)}(R), u^{(2)}(R)$ і радіальних напружень $\sigma_r^{(1)}(R), \sigma_r^{(2)}(R)$ середовища 1 і тіла 2 на поверхні дотику $r = R$

$$\begin{aligned} u^{(1)}(R) &= u^{(2)}(R) \\ \sigma_r^{(1)}(R) &= \sigma_r^{(2)}(R) \end{aligned} \quad (3)$$

та умови, що

$$\sigma_r^{(1)}(r) \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Щоб використати рівняння (3), (4), запишемо вирази для радіальних $\sigma_r^{(i)}(r) \rightarrow 0$ і колових $(\sigma_\phi^{(i)}(r))$ напружень [3, 4, 11]:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i) \frac{du^{(i)}}{dr} + \lambda_i \frac{u^{(i)}}{r} - (3\lambda_i + 2\mu_i) \alpha_i T, \\ \sigma_\phi^{(i)}(r) &= (\lambda_i + 2\mu_i) \frac{u^{(i)}}{r} + \lambda_i \frac{du^{(i)}}{dr} - (3\lambda_i + 2\mu_i) \alpha_i T. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставимо вирази (2), (5) в рівності (2), (3), (4). Отримаємо значення констант

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(3\lambda_1 + 2\mu_1) \alpha_1 T}{2(\lambda_1 + \mu_1)}, \\ C_2 &= \frac{R^2 [-(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2) \alpha_1 + (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1) \alpha_2] T}{2(\lambda_1 + \mu_1)(\mu_1 + \lambda_2 + \mu_2)}, \\ C_3 &= \frac{[\mu_1(3\lambda_1 + 2\mu_1) \alpha_1 + (\lambda_1 + \mu_1)(3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2] T}{2(\lambda_1 + \mu_1)(\mu_1 + \lambda_2 + \mu_2)}, \\ C_4 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

За допомогою цих значень і формул (5) знайдемо функції напружень в середовищі 1

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)}(r) &= \frac{R^2}{r^2} \frac{\mu_1 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2) \alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1) \alpha_2] T}{(\lambda_1 + \mu_1)(\mu_1 + \lambda_2 + \mu_2)}, \\ \sigma_\phi^{(1)}(r) &= -\frac{R^2}{r^2} \frac{\mu_1 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2) \alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1) \alpha_2] T}{(\lambda_1 + \mu_1)(\mu_1 + \lambda_2 + \mu_2)}, \quad (r \geq R) \end{aligned} \quad (7)$$

і в тілі 2

$$\sigma_r^{(2)}(r) = \sigma_\varphi^{(2)}(r) = \frac{\mu_1 [(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_1] T}{(\lambda_1 + \mu_1)(\mu_1 + \lambda_2 + \mu_2)}, \quad (0 \leq r \leq R). \quad (8)$$

Можемо бачити, що напруження $\sigma_r^{(1)}(r)$ і $\sigma_\varphi^{(1)}(r)$ рівні за модулем, але мають протилежні знаки. Вони локалізуються на поверхні $r = R$ і спадають обернено пропорційно квадрату радіальної координати r . Як свідчить формула (8) напруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ і $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$ в тілі волокна 2 рівні один одному та однакові у всіх точках тіла.

Результати розрахунків. Наведемо результати розрахунків для випадків, коли в якості матриць композиту обрані алюміній і титан, які широко використовуються в матеріалознавстві, а армуючими волокнами є алмаз або вольфрам. Значення їх термомеханічних характеристик подані в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення термомеханічних параметрів компонент композитів
Table 1 – Values of thermomechanical parameters of composite components

Термомеханічні параметри	C	W	Al	Ti
λ , ГПа	306	208	55,5	74,1
μ , ГПа	478	151	25,5	41,4
α , $10^{-6} K^{-1}$	1,2	4,3	22,6	8,6

Для таких комбінацій матеріалів в рамках прийнятої моделі армуючих волокон за формулами (7), (8) були підраховані значення термонапружень $\sigma_r^{(2)}(R)$, $\sigma_\varphi^{(2)}(R)$ в матриці (1) на поверхні $r = R$ і термонапружень $\sigma_r^{(2)}(r) = \sigma_\varphi^{(2)}(r)$ ($0 \leq r \leq R$) у тілі волокна 2 при значенні температури $T = 100^0$. Значення цих напружень наведено у Таблиці 2.

Таблиця 2 – Розрахункові значення термонапружень в матрицях 1 і волокнах 2 композитів
Table 2 – Calculated values of thermal stresses in matrices 1 and fibers 2 of composites

Комбінація матеріалів	$\sigma_r^{(1)}$, max, ГПа	$\sigma_\varphi^{(1)}$, max, ГПа	$\sigma_r^{(2)} = \sigma_\varphi^{(2)}$, ГПа
C-Al	-0,578437	0,578437	-0,578437
W-Al	-0,209890	0,209890	-0,209890
C Ti	-0,185485	0,185485	-0,185485
W Ti	-0,076084	0,076084	-0,076084

З цих даних випливає, що навіть при порівняно невисокій зміні температури $T = 100^0$ додаткові внутрішні локалізовані термонапруження в алюмінієвій матриці, зумовлені несумісністю її термомеханічних властивостей із властивостями включень, мають високе значення. Вони співмірні з граничними значеннями міцності алюмінієвих сплавів, які знаходяться в діапазоні $0,16 \div 0,5$ ГПа, що спричинено великим значенням $\alpha_2 = 22,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Для титанової матриці ситуація більш сприятливіша, оскільки у титану $\alpha_2 = 8,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, однак і в цьому випадку напружений стан матриці близький до критичного, так як для сплавів титану границі міцності лежать в діапазоні $0,7 \div 1,05$ ГПа.

Для розглянутих випадків слід враховувати ще одну особливість, пов'язану з тим, що пораховані напруження зменшується пропорційно квадрату радіальної координати і мають локальний характер. Тому можна припустити, що в матеріалі металевій матриці в околі волокон виникають пластичні деформації та дефекти, а в матрицях з крихких керамічних або полімерних матеріалів відбуваються локальні розтріскування. У загальному випадку вони можуть мати прихований характер і не піддаватися спостереженню.

Висновки.

1. На базі методів теорії термопружності поставлена задача про термонапружений стан композиту, що складається з матриці, армованої волокнами. Сформульовані розв'язувальні рівняння, побудовані їх рішення у замкнутій формі.

2. Показано, що в системі реалізується внутрішній механізм виникнення додаткових термонапружень, які концентруються на поверхнях контакту фаз композиту і спадають обернено пропорційно квадрату радіальної координати.

3. Встановлено, що для алюмінієвих і титанових матриць, армованих вуглецевими або вольфрамовими волокнами, додаткові внутрішні термонапруження можуть досягати граничних значень міцності навіть при помірних значеннях приростів температури.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гуляєв В.І., Гайдайчук В.В., Густелєв О.О., Шевчук Л.В. Термонапружений стан шарувато-неднорідних дорожніх покриттів. Прикладна механіка 2021. – 57, №1 –С. 100-114.
2. Гуляєв В.І., Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Густелєв О.О., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багат шарових дорожніх покриттів. НТУ. Київ, 2019
3. Коваленко А.Д. Термоупругість. Вища школа. Киев. 1975
4. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. – М.: Мир, 1970
5. Сендецки Дж. Механика композитных материалов. Т.2. – М.: Мир, 1978
6. Beilecheva, T.G., Ziling, K.K. Thermoelastic axisymmetric problem for a two-layer cylinder. J Appl Mech Tech Phys 19, 108–113 (1978).
7. Carlson D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics. V. Via/2 (ed. Trudell C.), Springer, Berlin, 1972.
8. Christian Karch. Micromechanical analysis of thermal expansion coefficients. Modeling and Numerical Simulation of Material Science. – 2014, V.4, №3, – Pp. 1-15.
9. Christiansen R.M. Mechanics of Composite Materials; Wiley: New York, NY USA, 1979.
10. Elwardany M.D. King G., Planche J.P., Rodezno C., Christiansen D., Fertig III R.S., Kuhn K.H., Bhulyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. Asphalt Paving Technology: Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2019. – 88.
11. Hetnarski R.B. Ignaczak J. Mathematical Theory of Elasticity, Taylor and Francis, New York, 2004.

REFERENCES

1. Huliaiev V.I., Haidachuk V.V., Hustieliev O.O., Shevchuk L.V. Termonapruzhenyi stan sharuvato-nednoridnykh dorozhnikh pokryttiv. Prykladna mekhanika 2021. – 57, №1 – 100-114 s.
2. Huliaiev V.I., Haidachuk V.V., Mozghovyi V.V., ZaietsYu.O., Shevchuk L.V., Shliun N.V. Termopruzhenyi stan bahatosharovykh dorozhnikh pokryttiv // Monohrafiia – K. : NTU, 2018. – 272 s
3. Kovalenko A.D. Termouprugost. Vyshcha shkola. Kyev – 1975
4. Novatskyi V. Dynamicheskiye zadachy termouprugosti. – М.: Myr, 1970
5. Sendetsky Dzh. Mekhanyka kompozytnukh materyalov. T.2. – М.: Myr, 1978
6. Beilecheva, T.G., Ziling, K.K. Thermoelastic axisymmetric problem for a two-layer cylinder. J Appl Mech Tech Phys 19, 108–113 (1978).
7. Carlson D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics. V. Via/2 (ed. Trudell C.), Springer, Berlin, 1972.
8. Christian Karch. Micromechanical analysis of thermal expansion coefficients. Modeling and Numerical Simulation of Material Science. – 2014, V.4, №3, – Pp. 1-15.
9. Christiansen R.M. Mechanics of Composite Materials; Wiley: New York, NY USA, 1979.
10. Elwardany M.D. King G., Planche J.P., Rodezno C., Christiansen D., Fertig III R.S., Kuhn K.H., Bhulyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. Asphalt Paving Technology: Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2019. – 88.
11. Hetnarski R.B. Ignaczak J. Mathematical Theory of Elasticity, Taylor and Francis, New York, 2004.

РЕФЕРАТ

Шлюнь Н.В. Про внутрішній механізм термопошкоджень в армованих композитах з термомеханічною несумісністю їх фаз /Н.В. Шлюнь, Ю.О. Заєць // Вісник Національного

транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУ, 2022. – Вип. 3 (53).

Відомо, що в однорідному пружному середовищі, вільному від зовнішніх обмежень її переміщень, поля температури, які змінюються за лінійним законом вздовж просторових змінних, не викликають термопружних напружень. Ці напруження можуть виникати тільки у випадку, коли на границі системи накладені зовнішні (зовнішній механізм створення термонапружень) або система неоднорідна (внутрішній механізм створення термонапружень).

У роботі розглянутий внутрішній механізм створення термонапружень в пружних матрицях, армованих волокнами або стрижнями. На основі методів теорії термопружності побудовані розв'язки звичайного диференціального рівняння. Побудована їх рішення у замкнутій формі. Показано, що додаткові термонапруження концентруються на поверхні дотику фаз композиту і можуть досягати граничних значень навіть при помірних значеннях температури системи.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОМПОЗИТНИЙ МАТЕРІАЛ, ТЕРМОПОШКОДЖЕННЯ, ПОЛЕ НАПРУЖЕНЬ, ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН, МАТРИЦЯ АРМОВАНА ВОЛОКНАМИ.

ABSTRACT

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).

It is known that in a homogeneous elastic medium, free from external restrictions of its displacements, temperature fields varying linearly along spatial variables do not cause thermoelastic stresses. These stresses can arise only in cases where external restrictions are imposed on the boundary of the system (an external mechanism for creating thermal stresses) or the system is inhomogeneous (an internal mechanism for creating thermal stresses).

The paper considers the internal mechanism for creating thermal stresses in elastic matrices reinforced with fibers or rods. Based on the methods of the theory of thermoelasticity, the resolving ordinary differential equations are formulated, their solutions are constructed in a closed form.

It is shown that additional thermal stresses are concentrated on the interface of the composite phases and can reach limiting values even at moderate values of the system temperature.

KEY WORDS: COMPOSITE MATERIAL, THERMAL DAMAGE, STRESS FIELD, THERMAL STRESSED STATE, FIBER REINFORCED MATRIX.

АВТОРИ:

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.

Засць Юлія Олександрівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет доцент кафедри вищої математики, e-mail: yzaets@gmail.com, тел. +380979712351, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, orcid.org/0000-0002-5748-9527

AUTHORS:

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

Zaiets Yu. O., Ph. D., National Transport University, e-mail: yzaets@gmail.com, tel. +380979712351, Ukraine, 01103, Kyiv, Boichuk str., 42, orcid.org/0000-0002-5748-9527

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

Мозговий В. В., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Gaidaichuk V.V., Dr. Sc. (Engineering), Professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Mozgovyy V.V., Dr. Sci., (Engineering), Professor, National Transport University, Head of Department of Road Construction Materials and Chemistry, Kyiv, Ukraine.