

UDC 539.375

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE STRESSED - DEFORMED STATE
OF A TUBULAR ELEMENT UNDER THERMAL LOADING****Yu.V. Maksimyuk,**
Doctor of Engineering**I.Yu. Martyniuk,**
Candidate of Technical Science**O.V. Kozak,**
Candidate of Technical Science**O.V. Maksimyuk,**
postgraduate*Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv
Povitroflotsky Ave., 31, Kyiv, 03680*

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.199-206

In this work, using the methodology outlined in the above works, the results of the numerical solution of the problem, which have applied value, were presented. The stress-strain state of a tubular element with a rectangular cutout under conditions of thermo-force loading was studied. As a rule, the solution of similar problems is carried out in a flat setting without taking into account the bending load. This approach greatly simplifies the formulation of the problem, but leads to very significant errors in the results. At zero value of the bending load, a good agreement of the planar and spatial solutions is observed. The presence of a bending load leads to deviation of the curves from their initial position. The maximum discrepancy of the results is almost 50%.

The analysis of this structure from the standpoint of the spatial problem of thermoplasticity, which ensures taking into account the dependence of the physical and mechanical characteristics of the material on temperature and taking into account the bending load on the section of the cutout, made it possible to reveal the real features of its deformation.

Keywords: semi-analytical finite element method (SAFEM), stress-strain state, plastic and thermoplastic deformation, tubular element, planar and spatial formulation, convergence of results, thermo-force loading.

Introduction. Tubular elements are an important structural part of energy installations. Deformation of the tubular element occurs in a stationary thermal field, which causes changes in the physical and mechanical characteristics of the material of the object.

The stressed-deformed state of a tubular element under a thermo-force load

The general view of the tubular element is shown in Fig. 1. The diameter of the hole $D=2R=2,5$ cm, the radius of rounding of the outer contour $R_1=2$ cm, width and height – $B=4$ cm and $H=4,5$ cm respectively. The depth of the cutout is 0,5 cm, its length is 4 cm. The total length of the tubular element is $L=8$ cm.

The working medium, heated to $T=100^{\circ}\text{C}$ under pressure $P=60\text{ MPa}$, is supplied through the internal channel. On the surface of the tubular element, the temperature is 20°C . The law of temperature distribution by wall thickness

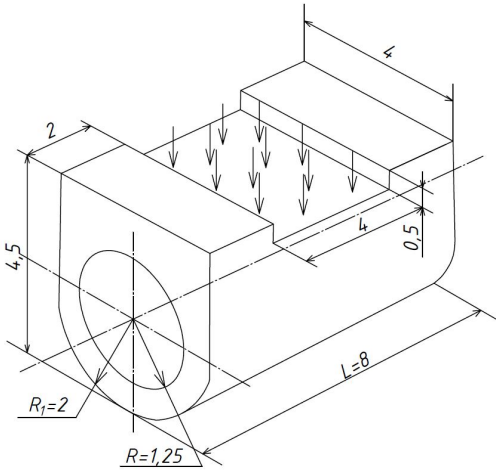


Fig. 1. General view of the tubular element

is shown in Fig. 3. In operating modes, the bending load of the region of the rectangular bend is added to the active thermoforce factors, the intensity of which gradually increases and can reach $Q_{\text{max}} = 20\text{ MPa}$. In the process of increasing the bending load, plastic deformations develop in individual parts of the body, which can cause a loss of the load-bearing capacity of the structure.

At the ends of the body, boundary conditions corresponding to the absence of displacement in all three directions are realized:

At the ends of the body, boundary conditions

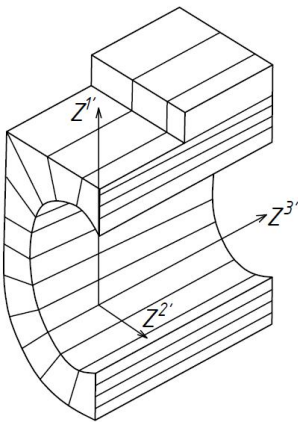


Fig. 2. Calculation scheme of the tubular element

$$\frac{U^1}{Z^3} = \pm\alpha = \frac{U^2}{Z^3} = \pm\alpha = \frac{U^3}{Z^3} = \pm\alpha = 0. \quad (1)$$

The thermomechanical characteristics of the material are adopted in accordance with those given in [10] for EI 395 steel.

Object discretization is carried out by a set of prismatic elements with variable physical and mechanical parameters. The design scheme of the tubular element is shown in Fig. 2. The area of the cutout is modeled by the assignment of the zero value of the modulus of elasticity $E=0$.

The study of the convergence of the results of solving the problem of thermoplasticity was carried out by successive thickening of the grid of finite elements in the cross-section of the body

while simultaneously increasing the number of members that resist decomposition. Calculation schemes with a total number of unknowns $M=2754$, $M=6804$ and $M=14400$ were considered.

The required accuracy of the calculation of the parameters of the stress-strain state is achieved at $M=6804$, which corresponds to the use of 189 nodes

in the plane and 12 decomposition terms. The results of solving with such a grid differ from those obtained with $M=14400$ by no more than 1.5%.

As a rule, similar problems are solved in a flat setting [7-9] without taking into account the bending load. This approach greatly simplifies the formulation of the problem, but leads to very significant errors in the results. This is clearly illustrated by comparing the $\sigma^{2'2'}$ graphs constructed on the vertical axis of symmetry of the tubular element (Fig. 4). At the zero value of the bending load $Q=0$, a good agreement of the planar and spatial solutions is observed. The presence of a bending load leads to deviation of the curves from their initial position. The maximum discrepancy of the results is almost 50%.

However, data from the solution of the spatial problem allow judging not only quantitative changes in the area of maximum stresses, but also qualitative redistribution of their pattern along the inner diameter of the tubular element (Fig. 5). The results of solving the plane problem are shown by a dotted line and indicate that the maximum $\sigma^{2'2'}$ is reached at the value of the angular coordinate $\alpha = \pi/4$, i.e. in the area corresponding to the protrusion on the outer contour. In the lower part of the cross-section of the tubular element in a vertical plane (at $\alpha = \pi$), the stress level is slightly lower. The spatial calculation made it possible to determine that the increase in the bending load leads to the displacement of the maximum values of $\sigma^{2'2'}$ on the inner contour to the area adjacent to the vertical axis of symmetry. For example, for $Q=10$ MPa, there is still a spike in stress at $\alpha = \pi/4$, but a clear maximum is visible in the lower part of the vertical section. At the value of the bending load $Q = 20$ MPa, the maximum $\sigma^{2'2'}$ is achieved as in the case of $Q = 10$ MPa at $\alpha = \pi$. The values of the stresses $\sigma^{2'2'}$ at $\alpha = \pi/4$ become smaller than in the upper part of the cross-section of the object in a vertical plane ($\alpha = 0$) and in the region corresponding to the protrusion, even a local extremum is not observed. On the horizontal axis of symmetry, an increase in the bending load leads to a significant drop in stress. At $Q=20$ MPa, the stress $\sigma^{2'2'}$ in this cross-section is 2 times less than that determined by the results of the planar solution.

Thus, the presence of a bending load leads to the disappearance of the maximum on the $\sigma^{2'2'}$ plot, obtained without taking it into account on the internal contour at $\alpha = \pi/4$. The nature of the stress-strain state along the circle, obtained as a result of spatial resolution, is significantly uneven. The difference in the values of $\sigma_{\max}^{2'2'}$ and $\sigma_{\min}^{2'2'}$ at $Q = 20$ MPa is of the order of 11,5 MPa, while the drop on the $\sigma^{2'2'}$ plot without taking into account the bend does not exceed 3.5 MPa.

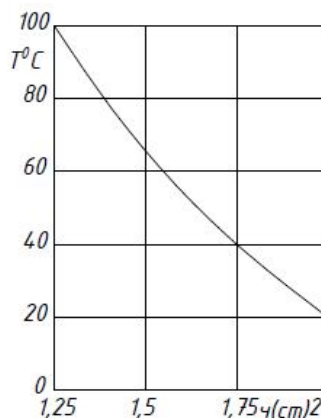


Fig. 3. Law of distribution of temperature by wall thickness

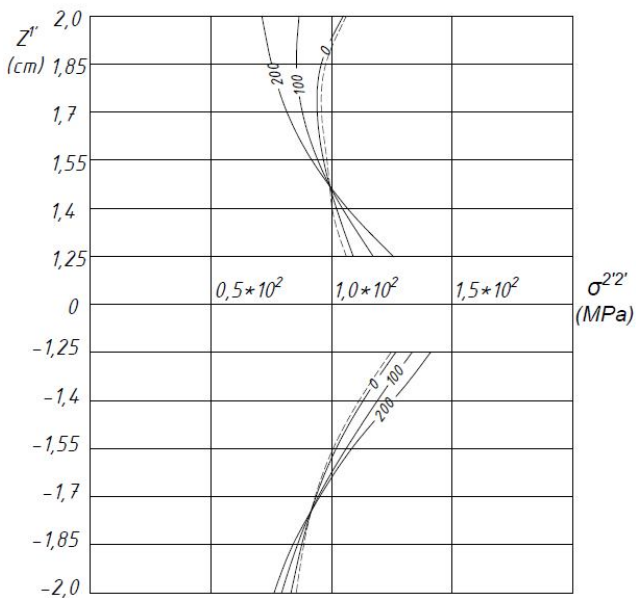


Fig. 4. Comparison of $\sigma^{2'2'}$ graphs constructed on the vertical axis of symmetry of the tubular element

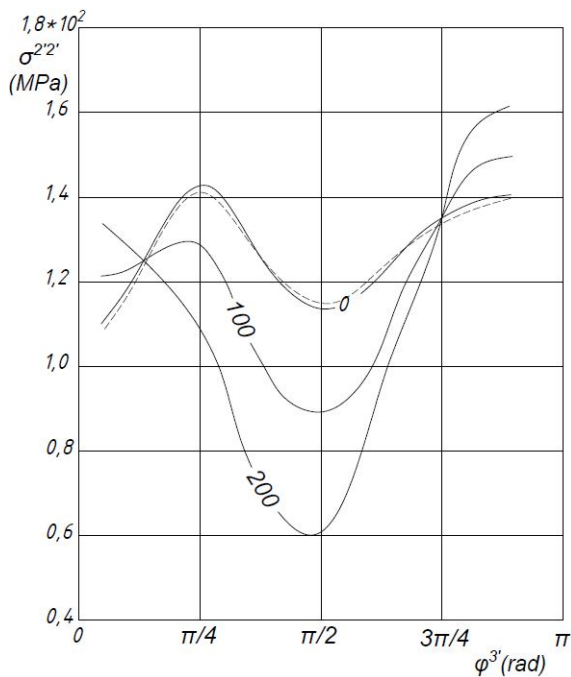


Fig. 5. Stress distribution along the inner diameter of the tubular element

In Fig. 6 isolines of the intensity of plastic deformations on the sweep of the inner surface of the tubular element at the maximum level of bending load. The value z^3 is plotted on the vertical axis, and the angular coordinates α are plotted on the horizontal axis. The analysis of the curves allows us to conclude that the maximum intensity of plastic deformations is reached in the inner contour of the lower part of the vertical cross-section of the tubular sample. The area of plastic deformations adjacent to the vertical axis occupies 65% of the length of the sample, but the intensity of these deformations in most of their zones is small. Around the circle, this plasticity zone is located in the range from $\alpha = 3\pi/4$ to $\alpha = \pi$, at the interval $\pi/6$ their intensity exceeds 1%. Another zone of plastic deformations is located in the area of the hard embedment in a narrow strip, its length is approximately $5\pi/8$, but the depth of penetration of plastic deformations in the section does not exceed 0,1 wall thickness.

Conclusion. The analysis of this structure from the standpoint of the spatial problem of thermoplasticity, which ensures taking into account the dependence of the physical and mechanical characteristics of the material on temperature and taking into account the bending load on the section of the cut, allowed us to reveal the real features of its deformation.

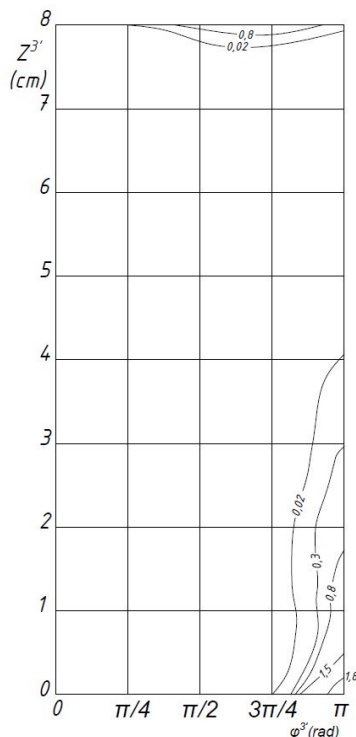


Fig. 6. Isolines of the intensity of plastic deformations on the sweep of the inner surface of the tubular element

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A.* Zbizhnist' metoda skinchenykh elementiv i napivanalitichnoho metodu skinchenykh elementiv dlya pryzmatychnykh til z pereminnymy fizychnymy i heometrychnymy parametramy (Convergence of the finite element method and the semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters) / V.A. Bazhenov, M.V. Horbach, I.Yu. Martyniuk, O.V. Maksymiuk // *Opir materialiv i teoriia sporud*– 2021. – Vyp. 106. – S. 92-104.
2. *Bazhenov V.A.* Napivanalitichnyi metod skinchenykh elementiv u pruzhnii ta pruzhno-plastychnii postanovtsi dlia kryvoliniinykh pryzmatychnykh ob'ektiv (Semi-analytical method of finished elements in elastic and elastic-plastic position for curvilinear prismatic objects) / V.A. Bazhenov, A.A. Shkril', Yu.V. Maksymiuk, I.Yu. Martyniuk, O.V. Maksymiuk // *Opir materialiv i teoriia sporud*– 2020. – Vyp. 105. – S. 24–32.
3. *Huliar O.I.* Universalnyi pryzmatychnyi skinchenyi element zahalnoho typu dlia fizychno i heometrychno neliniinykh zadach deformuvannya pryzmatychnykh til (Universal prismatic finite element of general type for physically and geometrically nonlinear problems of

- deformation of prismatic bodies) / O.I. Huliar, Yu.V. Maksymiuk, A.A. Kozak, O.V. Maksymiuk // *Budivelni konstruktsii teorii i praktyka* – 2020. – Vyp. 6. – S. 72–84.
4. *Maksymyuk Yu.V.* Osnovni spivvidnoshennia dlia fizychno i heometrychno neliniinykh zadach deformuvannya pryzmatychnykh til (Basic relations for physically and geometrically nonlinear problems of deformation of prismatic bodies) / Yu.V. Maksymyuk, S.O. Pyskunov, A.A. Shkril, O.V. Maksymyuk // *Opir materialiv i teorii sporud* – 2020. – Vyp. 104. – S. 255–264.
 5. *Maksymyuk Yu.V.* Alhorytm rozv'iazannia systemy liniinykh ta neliniinykh rivnian napivanalitichnym metodom skinchenykh elementiv dlia kryvoliniinykh neodnorodnykh pryzmatychnykh til (Algorithm for solving a system of linear and nonlinear equations by the semianalytic finite element method for curvilinear inhomogeneous prismatic bodies) / Yu.V. Maksymyuk, M.V. Honcharenko, I.Iu. Martyniuk, O.V. Maksymyuk // *Budivelni konstruktsii teorii i praktyka* – 2020. – Vyp. 7. – S. 101–108.
 6. *Vorona Y.V.* Dostovirnist' rezul'tativ otrymanykh napivanalitichnym metodom skinchenykh elementiv dlia pryzmatychnykh til z pereminnymy fizychnymy i heometrychnymy parametramy (Reliability of results obtained by semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters) / Y.V. Vorona, Yu.V. Maksymyuk, I.Yu. Martyniuk, O.V. Maksymyuk // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2021. – Issue 107. – P. 184-192.
 7. *Guz O.M.* "Mechanics of Composites" edition in 12 volumes: a significant miles to neinth century-long history of the Institute of Mechanics named after S.P. Tymoshenko / O.M. Guz, Ya. Ya. Rushchitsky // *AppliedMechanics -2021.- 57, No. 5.* - P. 3 - 17.
 8. *Maslo O.M.* Assessment of the current state of the material of structural elements by the LM-hardness method / O. M. Maslo, P. O. Bulak, V. P. Shvets, A. A. Kotlyarenko // *Strength problems-2022.* No. 4. P. 81-91.
 9. *Mikhalevich V. M.* Improvement of the method of solving the two-dimensional problem of pressing staffs / Mikhalevich V. M., Kraevsky V. O., Dobranyuk Yu. V. // *Bulletin of NTUU "KPI". Mechanical engineering: a collection of scientific works.* – 2016. – No. 2(77). – pp. 79–88.
 10. Semi-analytical method of finite elements in spatial problems of deformation, destruction and shape change of bodies of complex structure / [Bazhenov V.A., Maksym'yuk Yu.V., Martyniuk I.Yu., Maksym'yuk O.V.] - Kyiv: "Caravela" publishinghouse, 2021. - 280 p.

Стаття надійшла 21.05.2023

Максим'юк Ю.В., Мартинюк І.Ю., Козак О.В., Максим'юк О.В.

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБЧАСТОГО ЕЛЕМЕНТА ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В роботах [2-5] реалізовано розв'язувальні співвідношення та алгоритм методу блочних ітерацій розв'язання лінійних і нелінійних рівнянь напіваналітичним методом скінчених елементів для криволінійних неоднорідних призматичних тіл. У роботі [1] виконано чисельне дослідження збійності розв'язання, розглянуто широке коло тестових задач для тіл з плавно і стрибкоподібно мінливим фізичними та геометричними характеристиками в пружній та пружно-пластичній постановці. В [6] для підтвердження достовірності одержуваних результатів на основі напіваналітичного методу скінчених елементів, показано ефективність застосування даного підходу для розрахунку криволінійних неоднорідних призматичних об'єктів. Розв'язання контрольних задач теорії пружності, термopужності та термопластичності, а також задач формозміни дає можливість зробити висновок про достовірність результатів дослідження виділеного класу об'єктів на базі розробленої методики та реалізує її пакет прикладних програм.

В даній роботі використуючи методику викладену в наведених вище роботах було представлено результати чисельного розв'язання задачі, що мають прикладне значення. Вивчено напружено-деформований стан трубчастого елемента з прямокутним вирізом в умовах термосилового навантаження. Як правило, розв'язання аналогічних задач проводиться в плоскій постановці без урахування згинального навантаження. Такий підхід значно спрощує постановку задачі, проте призводить до дуже суттєвих похибок результатів. При нульовому

значенні згинального навантаження спостерігається гарне узгодження плоского та просторового розв'язання. Наявність згинального навантаження призводить до відхилення кривих від їхнього початкового положення. Максимальна розбіжність результатів становить майже 50%.

Аналіз даної конструкції з позиції просторової задачі термопластичності, що забезпечує урахування залежності фізико-механічних характеристик матеріалу від температури та урахування згинального навантаження на ділянку вирізу, дозволив виявити реальні особливості її деформування.

Ключові слова, напіваналітичний метод скінчених елементів, напружено-деформований стан, пластичне та термопластичне деформування, трубчатий елемент, плоска та просторова постановка, збіжність результатів, термосилове навантаження.

Maksymyuk Yu.V., Martyniuk I.Yu., Kozak O.V., Maksymyuk O.V.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE STRESSED - DEFORMED STATE OF A TUBULAR ELEMENT UNDER THERMAL LOADING

In articles [2-5] solving relations and the block iteration method algorithm for solving linear and nonlinear equations by the semi-analytical finite element method for curvilinear heterogeneous prismatic bodies are implemented. In article [1], a numerical study of the convergence of the solution was performed, a wide range of test problems for bodies with smoothly and abruptly changing physical and geometric characteristics in elastic and elastic-plastic settings were considered. In [6], to confirm the reliability of the results obtained on the basis of the semi-analytical method of finite elements, the effectiveness of the application of this approach for the calculation of curvilinear inhomogeneous prismatic objects is shown. Solving control problems of the theory of elasticity, thermoelasticity, and thermoplasticity, as well as shape change problems, makes it possible to draw a conclusion about the reliability of the results of the research of a selected class of objects based on the developed methodology and implements its application program package.

In this paper, using the methodology outlined in the above works, the results of the numerical solution of the problem, which have an applied value, were presented. The stress-strain state of a tubular element with a rectangular cutout under conditions of thermoforce loading was studied. As a rule, solving similar problems is carried out in a flat setting without taking into account the bending load. This approach greatly simplifies the formulation of the problem, but leads to very significant errors in the results. At zero value of the bending load, a good agreement of the planar and spatial solutions is observed. The presence of a bending load leads to deviation of the curves from their initial position. The maximum discrepancy of the results is almost 50%.

The analysis of this structure from the standpoint of the spatial problem of thermoplasticity, which ensures taking into account the dependence of the physical and mechanical characteristics of the material on temperature and taking into account the bending load on the section of the cut, allowed us to reveal the real features of its deformation

Keywords, semi-analytical finite element method (SAFEM), stress-strain state, plastic and thermoplastic deformation, tubular element, planar and spatial formulation, convergence of results, thermoforce loading.

УДК539.375

Максим'юк Ю.В., Мартинюк І.Ю., Козак О.В., Максим'юк О.В. **Чисельний аналіз напружено-деформованого стану трубчастого елемента при термосиловому навантаженні** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – Київ: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 199-206.

В роботі представлено результати чисельного розв'язання задачі, що має прикладне значення, за використання методики, викладеної в попередніх публікаціях. Вивчено напружено-деформований стан трубчастого елемента з прямокутним вирізом в умовах термосилового навантаження. Аналіз даної конструкції з позиції просторової задачі термопластичності, що забезпечує урахування залежності фізико-механічних характеристик матеріалу від температури та урахування згинального навантаження на ділянку вирізу, дозволив виявити реальні особливості її деформування.

Табл. 0. Лл. 6. Бібліогр. 10 назв.

UDC539.375

Yu.V Maksymyuk, I.Yu. Martyniuk, O.V. Kozak, O.V. Maksymyuk. Numerical analysis of the stressed-deformed state of a tubular element under thermal loading // Strength of Materials and Theory of Structures – Kyiv: KNUBA, 2023. – Issue 110. – С. 199-206.

The paper presents the results of the numerical solution of the problem, which has an applied value, using the methodology outlined in previous publications. The stress-strain state of a tubular element with a rectangular cutout under thermoforce load conditions is studied. The analysis of this structure from the standpoint of the spatial problem of thermoplasticity, which ensures taking into account the dependence of the physical and mechanical characteristics of the material on temperature and taking into account the bending load on the section of the cutout, made it possible to reveal the real features of its deformation.

Tabl 0.Fig 6. Ref. 10.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки КНУБА Максим'юк Юрій Всеволодович.

Author (degree, academic rank, position): Associate Professor, Doctor of Science (Engineering), Professor at the KNUCA Department of Structural Mechanics Maksymiuk Yuriy Vsevolodovych.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

Робочий тел.: +38(044) 241-55-38.

Мобільний тел.: +38(067) 230-94-72.

E-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, докторант кафедри будівельної механіки КНУБА Мартинюк Іван Юрійович.

Author (academic degree, academic rank, position): candidate of technical sciences, doctoral student of the KNUCA department of structural mechanics Martyniuk Ivan Yuriyovych.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

Мобільний тел.: +38(096) 068-00-29

E-mail: ivan.martinyuk@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7957-2068>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій КНУБА Козак Олександр Володимирович.

Author (academic degree, academic rank, position): candidate of technical sciences, Associate Professor at the KNUCA Department of Reinforced Concrete and Stone Structures Kozak Oleksandr Volodymyrovych.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій.

Мобільний тел.: +38(095) 441-24-17

E-mail: oleksandr.kozak@zetis.biz

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0025-6554>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури Максим'юк Олександр Всеволодович.

Author (Academic Degree, Academic Title, Position): Maksymiuk Oleksandr Vsevolodovych, graduate student of Kyiv National University of Construction and Architecture.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

Мобільний тел.: +38(067) 306-17-81

E-mail: sashamaksymiuk@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2367-3086>