

УДК 539.3

А. О. Сосонна

## ВПЛИВ ВЗАЄМНОГО РОЗТАШУВАННЯ ОТВОРІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

Проведено числовий розрахунок напружено-деформованого стану прямокутної пластини і циліндричної оболонки з двома еліптичними отворами. Досліджено вплив розташування отворів на зміну коефіцієнта концентрації напружень, знайдено найбільш небезпечні конфігурації їх взаємного розташування.

*Ключові слова:* пластина з отвором, циліндрична оболонка з отвором, напружено-деформований стан, коефіцієнт концентрації напружень, метод скінченних елементів.

**Вступ.** Пластини і оболонки знаходять широке застосування в ракетній, авіаційній, суднобудівній та інших областях техніки та будівництва. Це можна пояснити тим, що завдяки високій міцності у поєднанні з легкістю економія матеріалу значно збільшується. При виготовленні складних тонкостінних конструкцій, складовими яких є пластинчато-оболонкові елементи, часто виникає необхідність у наявності отворів, що призводить до локальної концентрації напружень в їх околі. Проблемі концентрації напружень в пластинах і оболонках з отворами присвячено велика кількість досліджень, у тому числі [3–20].

Знаходження точного розв'язку крайових задач для пластинчато-оболонкових елементів конструкцій в аналітичному вигляді можливе лише для вузького класу практично важливих задач, при конкретних граничних умовах та способах прикладення навантаження. Для розв'язання таких задач найбільш розповсюдженими є числові методи, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ) [2].

У даній роботі досліджується вплив взаємного розташування еліптичних отворів в пластині і оболонці на їх напружено-деформований стан (НДС) в околі отворів.

**Постановка задачі.** Досліджується НДС прямокутної пластини і циліндричної оболонки, ослаблених двома симетрично розташованими отворами, а також залежність коефіцієнта концентрації напружень (ККН)  $k$  навколо отворів від їх взаємного розташування.

а) *Пластина з двома еліптичними отворами.* Розглядається однорідна ізотропна пружна прямокутна пластина довжиною  $l_1$  та шириною  $l_2$  з двома еліптичними отворами з півосями  $a$  та  $b$ , відстань між центрами отворів становить  $l$  (рис. 1).

б) *Оболонка з двома еліптичними отворами.* Розглядається однорідна ізотропна пружна циліндрична оболонка довжини  $H$ , радіусу  $R$  з

двома однаковими еліптичними отворами з півосями  $a$  та  $b$ , відстань між центрами яких становить  $l$  (рис. 2). Товщина оболонки  $h$ .

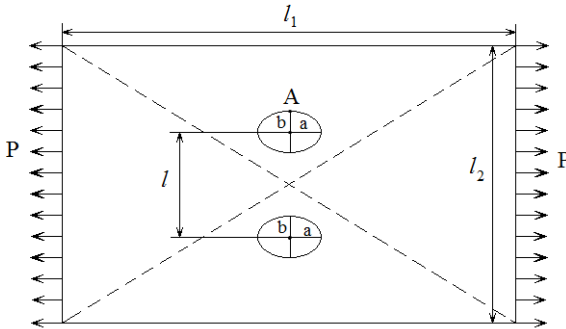


Рис. 1 – Пластина з двома еліптичними отворами

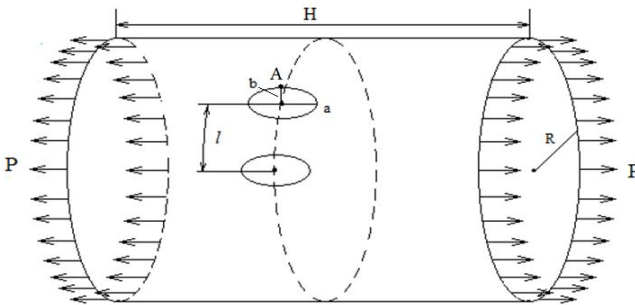


Рис. 2 – Оболонка з двома еліптичними отворами

Пластина і оболонка виготовлені з алюмінію, модуль Юнга  $E=70$  ГПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu=0,36$ , та знаходяться під дією одновісного рівномірно розподіленого по її торцях навантаження величини  $P=10$  МПа.

**Математична модель.** У випадку плоского напруженого стану пластини з отвором поставлена задача зводиться до задачі мінімізації функціонала енергії [1]

$$I[u, v] = \int_{\Omega} \frac{2G\nu}{1-\nu} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2G \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \int_{\gamma} [p_x u + p_y v] d\gamma, \quad (1)$$

де  $u, v$  – проєкції вектора переміщень на вісі  $Ox$  та  $Oy$  відповідно;  $G$  – модуль зсуву;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\Omega$  – область визначення змінних  $x$  та  $y$ ;  $\gamma$  – границя області  $\Omega$ , на якій діє навантаження  $P$ .

Для оболонки з отвором задача зводиться до мінімізації функціонала енергії [1, 5]

$$I[u, v, w] = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + S \varepsilon_{xy} + M_x \kappa_x + M_y \kappa_y + 2M_{xy} \kappa_{xy}) d\Omega - \int_{\gamma} (p_x u + p_y v + p_z w) d\gamma, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + K_1 w$  – відносна деформація серединної поверхні вздовж

вісі  $OX$ ;  $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + K_2 w$  – відносна деформація серединної поверхні

вздовж вісі  $OY$ ;  $\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + 2K_{12} w$  – деформація зсуву серединної

поверхні;  $\kappa_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ ,  $\kappa_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  і  $\kappa_{xy} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$  – деформації кривини вздовж

осей  $OX$ ,  $OY$  та в площині  $XOY$ . Тут  $K_1 = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$ ,  $K_2 = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$  і  $K_{12} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$  –

кривини оболонки, що характеризують її геометрію;

$N_x = \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y)$ ,  $N_y = \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x)$  і  $S = \frac{Eh}{2(1+\nu)} \varepsilon_{xy}$  – погонні на-

пруження вздовж осей  $OX$ ,  $OY$  та зсуву відповідно;

$M_x = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} (\kappa_x + \nu \kappa_y)$ ,  $M_y = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} (\kappa_y + \nu \kappa_x)$  і  $M_{xy} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \kappa_{xy}$

– погонні моменти відносно осей  $OX$ ,  $OY$  та погонні крутні моменти відповідно;  $h$  – товщина оболонки;  $E$  – модуль повздовжньої пружності;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

**Розрахунки та аналіз результатів.** Розрахунки проведено на персональному комп'ютері Intel® Pentium® CPU2117U@ 1,8GHz з 4Gb оперативної пам'яті.

Спочатку проведено дослідження пластини з двома еліптичними отворами. При розрахунках використано такі параметри: довжина пластини  $l_1=300$  мм, ширина –  $l_2=200$  мм, півосі еліптичних отворів  $a=15$  мм та  $b=10$  мм.

При дослідженні НДС пластини також проводився розрахунок аналогічної пластини з одним еліптичним отвором з півосями  $a$  та  $b$ , в результаті якого отримано ККН  $k = 2,36$ , що на 1% відрізняється від теоретично отриманого [9].

На рис. 3 наведено залежність розподілу відносної інтенсивності напружень  $\sigma_i/p$  по контуру одного з отворів пластини від співвідношення

$l/b$ . Тут по вісі абсцис відкладається безрозмірна параметрична відстань: відношення криволінійної координати  $s$  по контуру отвору (від точки  $A$  (рис. 1)) до довжини контуру.

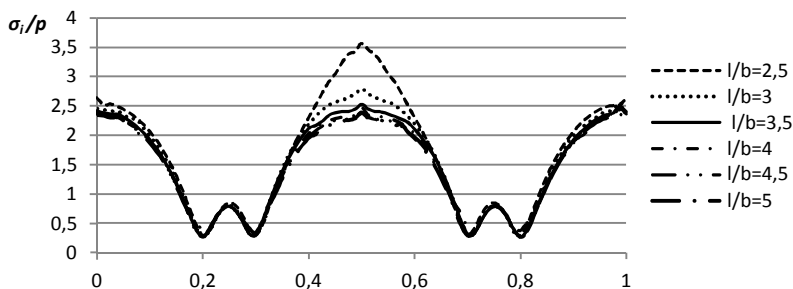


Рис. 3 – Розподіл відносної інтенсивності напружень по контуру отвору пластини в залежності від співвідношення  $l/b$

У табл. 1 наведена залежність ККН від співвідношення  $l/b$  взаємного розташування отворів пластини.

Таблиця 1 – Залежність ККН  $k$  від величини  $l/b$  в пластині

№ п/п	1	2	3	4	5	6
$l/b$	2,5	3	3,5	4	4,5	5
ККН	3,57	2,79	2,53	2,47	2,39	2,38

При  $l/b=2,5$  величина ККН більше, ніж при  $l/b=3$  на  $\sim 28\%$ , а при  $l/b=4,5$  і  $l/b=5$  результати відрізняються лише на  $\sim 0,4\%$ . Отже, найбільша концентрація напружень спостерігається при найменшій із розглянутих відстаней між центрами еліптичних отворів пластини, а при їх взаємному віддаленні один від одного вона зменшується.

Розглянемо результати досліджень оболонки з двома еліптичними отворами. При розрахунках використано такі параметри: довжина оболонки  $H=400$  мм, радіус  $R=112$  мм, півосі еліптичних отворів  $a=15$  мм та  $b=10$  мм. Товщина оболонки визначається таким чином, щоб  $(a+b)/(2\sqrt{Rh})=0,5$  задля розрахунку оболонки з одним еліптичним отвором із заданими параметрами і подальшого порівняння отриманих результатів з відомим аналітичним розв'язком [5]. Так, при розрахунку оболонки з одним еліптичним отвором на основі МСЕ отримано ККН=2,47, що на  $\sim 1,2\%$  відрізняється від наведеного у [5].

На рис. 4 подано розподіл відносної інтенсивності напружень  $\sigma_i/p$  по контуру отвору оболонки при різній відстані між центрами отворів.

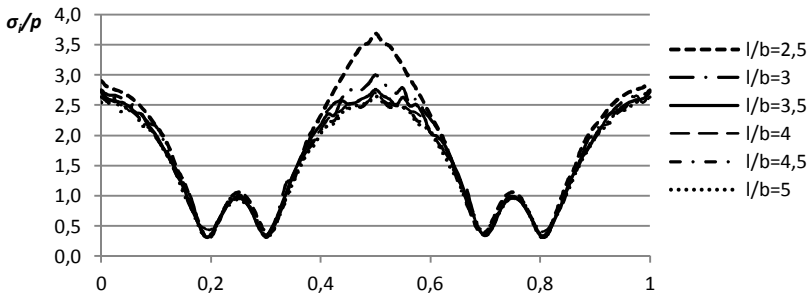


Рис. 4 – Розподіл відносної інтенсивності напружень по контуру отвору оболонки в залежності від співвідношення  $l/b$

У табл. 2 наведена залежність ККН від співвідношення  $l/b$  взаємного розташування отворів оболонки.

Таблиця 2 – Залежність ККН  $k$  від величини  $l/b$  в оболонці

№ п/п	1	2	3	4	5	6
$l/b$	2,5	3	3,5	4	4,5	5
ККН	3,69	3,00	2,76	2,71	2,70	2,55

Зростання концентрації напружень спостерігається при зменшенні відстані між центрами еліптичних отворів оболонки, а при їх взаємному віддаленні один від одного вона зменшується. Так, при  $l/b=2,5$  величина ККН більше, ніж при  $l/b=3$  на  $\sim 18\%$ , а при  $l/b=4,5$  і  $l/b=5$  результати відрізняються лише на  $\sim 0,4\%$ .

На рис. 5 наведено залежність ККН в пластині та оболонці від співвідношення  $l/b$ .

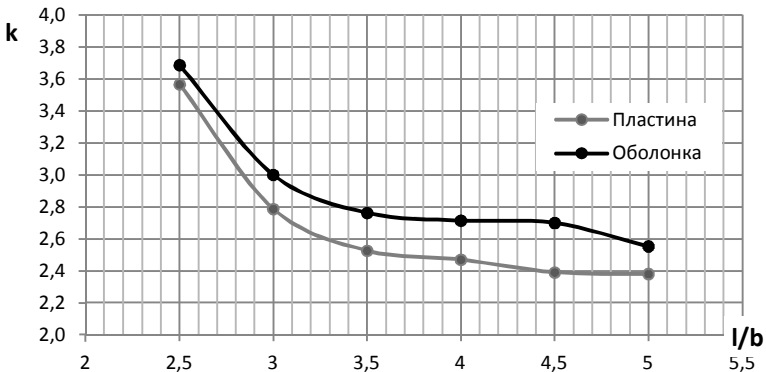


Рис. 5 – Залежність ККН в пластині та оболонці від співвідношення  $l/b$

При  $l/b=2,5$  величина ККН в оболонці на  $\sim 3\%$  більше, ніж у пластині. При збільшенні відстані між центрами отворів відмінність ККН пластини та оболонки зростає, наприклад, за заданих параметрів при  $l/b=4,5$  ККН в оболонці більше ККН в пластині на  $\sim 7\%$ . Тобто в прямокутній пластині та циліндричній оболонці з однаковими отворами при збільшенні відстані між їх центрами до певного значення спостерігається збільшення відсотка відмінності ККН.

**Висновки.** Проведено комп'ютерне моделювання поведінки пластини і оболонки з двома еліптичними отворами при їх деформуванні. Досліджено взаємовплив отворів в залежності від відстані між їх центрами. Встановлено, що за заданих параметрів при зближенні центрів отворів відбувається збільшення концентрації напружень як в пластині, так і в оболонці.

## БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Васидзу К.** Вариационные методы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 544 с.
2. **Галлагер Р.** Метод конечных элементов / Р. Галлагер; пер. с англ. – М.: Мир. – 428 с.
3. **Гарт Е. Л.** Проекційно-ітераційні схеми реалізації методу скінченних елементів в задачах деформування пластин з отворами та включеннями / Е. Л. Гарт, В. С. Гудрамович // Математичні методи і фізико-механічні поля. – 2013. – Т. 56, № 2. – С. 48–59.
4. **Гудрамович В. С.** Взаимное влияние вырезов на прочность оболочечных конструкций при пластическом деформировании / В. С. Гудрамович, Э. Л. Гарт, Д. В. Клименко, С. А. Рябоконт // Проблемы прочности. – 2013. – № 1. – С. 5–16.
5. **Гузь А. Н.** Методы расчета оболочек. В 5 т. Т. 1. Теория оболочек, ослабленных отверстиями / А. Н. Гузь. – К. : Наукова думка, 1980. – 636 с.
6. **Мавлютов Р. Р.** Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций / Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1981. – 141 с.
7. **Підстригач Я. С.** Вибрані праці / Я. С. Підстригач. – К. : Наукова думка, 1995. – 460 с.
8. **Пискунов В. Г.** Расчёт неоднородных пологих оболочек и пластин методом конечных элементов / В. Г. Пискунов, В. Е. Верижченко, В. К. Присяжнюк [и др.] – К. : Вища школа, 1987. – 200 с.
9. **Савин Г. Н.** Распределение напряжений около отверстий / Г. Н. Савин. – К. : Наукова думка, 1968. – 888 с.
10. **Чехов В. Н.** Концентрация напряжений в сферической оболочке с двумя близко расположенными круговыми отверстиями / В. Н. Чехов, С. В. Закора // Математичні методи і фізико-механічні поля. – 2010. – Т. 53, No 3. – С. 93–98.
11. **Gudramovich V. S.** Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions / V. S. Gudramovich, É. L. Gart, K. A. Strunin // Materials Science. – 2017. – Vol. 52, Is. 6. – P. 768–774.
12. **Hart E. L.** Projection-iterative modification of the method of local variations for problems with a quadratic functional / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // J. Appl. Math. Mech. – 2016. – Vol. 80, Is. 2. – P. 156–163.
13. **Hart E. L.** Projection-iterative schemes for the realization of the finite-element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // J. Math. Sciences. – 2014. – Vol. 203, No 1. – P. 55–69.

14. **Hart E. L.** Numerical simulation of stress-strain state for nonhomogeneous shell-type structures based on the finite element method / E. L. Hart, V. S. Hudramovich, S. A. Ryabokon', E. V. Samarskaya // Modeling and Numerical Simulation of Material Science, 2013. – Vol. 3, No 4. – P. 155–157.

15. **Hart E. L.** Applications of the projective-iterative versions of FEM in damage problems for engineering structures / E. Hart, V. Hudramovich // Maintenance–2012: Proceedings of the Second Conference (13–16 June, 2012, Zenica, Bosnia and Herzegovina). – Zenica: Univ. of Zenica, 2012. – No 1. – P. 157–164.

16. **Hart E. L.** Modifications of projective-iterative methods for solution the boundary-value problems of elasticity theory / E. L. Hart // SHMD'2010: Summaries of Lectures 9th International Symposium of Croatian Metallurgical Society (20–24 June 2010, Sibenik, Croatia). – Sibenik, 2010. – Vol. 49, No 3. – P. 227.

17. **Hart E. L.** Projection-iterative version of the pointwise relaxation method / E. L. Hart // J. Math. Sciences. – 2010. – Vol. 167, Iss.1. – P. 76–88.

18. **Hudramovich V. S.** Mutual influence of openings on strength of shell-type structures under plastic deformation / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, D. V. Klimenko, S. A. Ryabokon' // Strength of Materials. – 2013. – Vol. 45, No 1. – P. 1–9.

19. **Hudramovich V. S.** Elastoplastic deformation of nonhomogeneous plates / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, S. A. Ryabokon' // Journal of Engineering Mathematics. – 2013. – Vol. 78, No 1. – P. 181–197.

20. **Hudramovich V. S.** Influence of cutouts on strength of cylindrical compartments of launch vehicles at inelastic deformation of material / V. Hudramovich, D. Klymenko, E. Hart // Space Technologies: Present and Future: Abstracts of the 6th Intern. Conf. (May 23–26, 2017, Dnipro, Ukraine). – Dnipro: Yuzhnoye State Design Office, 2017. – P. 122.

УДК 539.3

*А. А. Сосонная*

## **ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ**

Проведен численный расчет напряженно-деформированного состояния прямоугольной пластины и цилиндрической оболочки с двумя эллиптическими отверстиями. Исследовано влияние расположения отверстий на изменение коэффициента концентрации напряжений, найдены наиболее опасные конфигурации их взаимного расположения.

*Ключевые слова:* пластина с отверстием, цилиндрическая оболочка с отверстием, напряженно-деформированное состояние, коэффициент концентрации напряжений, метод конечных элементов.

UDC 539.3

*A. A. Sosonna*

## **INFLUENCE OF MUTUAL LOCATION OF HOLES ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THIN-WALLED ELEMENTS OF STRUCTURES**

Numerical calculation of the stress-strain state of a rectangular plate and a cylindrical shell with two elliptical holes is performed. The influence of the location

of the holes on the change in the stress concentration factor was investigated, the most dangerous configurations of their mutual arrangement were found.

**Keywords:** plate with a hole, cylindrical shell with a hole, stress-strain state, stress concentration factor, finite element method.

Plates and shells are widely used in rocket industry, aviation, shipbuilding and other fields of engineering and construction. It can be explained by the fact that due to its high strength combined with small weight, material savings greatly increase. When complex thin-walled structures are made, the components of which are elements of a plates and shells, it often becomes necessary to have some holes, which leads to local concentration of stresses in their vicinity. A large number of studies is devoted to problem of stress concentration in plates and shells with holes including [3–20].

Finding the exact solution of boundary value problems for the plate-shell design elements in an analytical form is possible only for a narrow class of practically important problems, at specific boundary conditions and methods of loading. Numerical methods are most commonly used to solve such problems, in particular the finite elements method (FEM) [2].

In this paper, the effect of the mutual arrangement of elliptical holes in a plate and a shell on their stress – strain state (SSS) in the vicinity of openings is investigated.

The rectangular plate and cylindrical shell, weakened by two symmetrically located cuts, as well as the dependence of the stress concentration factor (SCF)  $k$  around the holes from their relative position, are investigated.

Initially, calculations of plates with two elliptical holes were carried out. In the calculations, the following parameters were used: the length of the plate is  $l_1=300\text{ mm}$ , the width is  $l_2=200\text{ mm}$ , the semiaxes of elliptical holes are  $a=15\text{ mm}$  and  $b=10\text{ mm}$ . At  $l/b=2,5$ , the value of SCF is greater than at  $l/b=3$  by 28%, and at  $l/b=4,5$  and  $l/b=5$ , the results differ only by 0,4%. Consequently, the highest concentration of stresses is observed at the smallest of the considered distances between the centers of the elliptical holes of the plate, and when they are mutually separated from one another, it decreases.

Then the results of shell studies with two elliptical holes are considered. In calculations, the following parameters were used: the height of the shell is  $H=400\text{ mm}$ , the radius is  $R=112\text{ mm}$ , the semiaxes of elliptical holes are  $a=15\text{ mm}$  and  $b=10\text{ mm}$ . The thickness of the shell is determined in such a way  $(a+b)/(2\sqrt{Rh})=0,5$  that in order to calculate the shell with one elliptical holes with the given parameters and further comparison of the results with a known analytical solution [5]. In this case  $h=5,58\text{ mm}$ .

An increase in the concentration of stresses is observed when the distance between the centers of the elliptical holes of the shell decreases, and when they are mutually separated from one another, it decreases. Thus, when  $l/b=2,5$ , the value of the SCC is greater than with  $l/b=3$  by 18%, and when  $l/b=4,5$  and  $l/b=5$ , the results differ only by 0,4%.



At  $l/b = 2,5$  the value of the SCF in the shell is 3,2% more than in the plate. With an increase in the distance between the centers of the holes, the difference between the SCF of the plate and the shell increases, for example, for the given parameters at  $l/b = 4,5$  SCF in the shell more than SCF in the plate at 7%. That is, in the rectangular plate and the cylindrical shell with identical holes, with the increase in the distance between their centers, the percentage difference of the coefficient of stress concentration increases.

**Conclusions.** A computer simulation of the behavior of a plate and a shell with two elliptical holes during their deformation was carried out. The mutual influence of cuts depending on the distance between their centers is investigated. It is established that for the given parameters, when the centers of the holes are converged, an increase in the concentration of stresses occurs both in the plate and in the shell.

## REFERENCES

1. **Vasidzu K.** Variational methods in the theory of elasticity and plasticity / K. Vasidzu. – Moscow: Mir, 1987. – 544 p. (in Russian)
2. **Gallagher R.** The Finite Element Method / R. Gallagher. – Moscow: Mir, 1975. – 428 p. (in Russian).
3. **Hart E. L.** Projection-iterative schemes for the implementation of the finite element method in the problems of deformation of plates with holes and inclusions / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // Mathematical Methods and Physical and Mechanical Fields. – 2013. – Vol. 56, No. 2. – P. 48–59. (in Russian).
4. **Hudramovich V. S.** Mutual influence of the cuts on the strength of the shell structures at the plastic deformation / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, D. V. Klimenko, S. A. Rjabokon' // Problemy prochnosti. – 2013. – No. 1. – P. 5–16. (in Russian).
5. **Guz A. N.** Methods of calculation of shells. In 5 v. Vol. 1. Theory of shells weakened by holes / A. N. Guz. – Kyiv: Naukova dumka, 1980. – 636 p. (in Russian).
6. **Mavlyutov R. R.** Concentration of stresses in elements of aviation structures / R. R. Mavlyutov. – Moscow: Nauka, 1981. – 141 p. (in Russian).
7. **Pidstrygach Ya. S.** Selected Works / Ya. S. Pidstrygach. – Kiev: Naukova dumka, 1995. – 460 p. (in Ukrainian).
8. **Piskunov V. G.** Calculation of inhomogeneous shallow shells and plates by the finite element method / V. G. Piskunov, V. E. Verizhenko, V. K. Prysiashnyuk [and others] – Kyiv: Vyscha shkola, 1987. – 200 p. (in Russian).
9. **Savin G. N.** Stress distribution around holes / G. N. Savin. – Kyiv: Naukova dumka, 1968. – 888 p. (in Russian).
10. **Chekhov V. N.** Concentration of stresses in a spherical shell with two closely spaced circular holes / V. N. Chekhov, S. V. Zakora // Mathematical Methods and Physical and Mechanical Fields. – 2010. – Vol. 53, No. 3. – P. 93–98. (in Russian).
11. **Gudramovich V. S.** Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions / V. S. Gudramovich, É. L. Gart, K. A. Strunin // Materials Science. – 2017. – Vol. 52, Iss. 6. – P. 768–774.
12. **Hart E. L.** Projection-iterative modification of the method of local variations for problems with a quadratic functional / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // J. Appl. Math. Mech. – 2016. – Vol. 80, Iss. 2. – P. 156–163.

13. **Hart E. L.** Projection-iterative schemes for the realization of the finite-element method in problems of deformation of plates with holes and inclusions / E. L. Hart, V. S. Hudramovich // J. Math. Sciences. – 2014. – Vol. 203, No. 1. – P. 55–69.

14. **Hart E. L.** Numerical simulation of stress-strain state for nonhomogeneous shell-type structures based on the finite element method / E. L. Hart, V. S. Hudramovich, S. A. Ryabokon', E. V. Samarskaya // Modeling and Numerical Simulation of Material Science, 2013. – Vol. 3, No 4. – P. 155–157.

15. **Hart E. L.** Applications of the projective-iterative versions of FEM in damage problems for engineering structures / E. Hart, V. Hudramovich // Maintenance–2012: Proceedings of the Second Conference (13–16 June, 2012, Zenica, Bosnia and Herzegovina). – Zenica: Univ. of Zenica, 2012. – No 1. – P. 157–164.

16. **Hart E. L.** Modifications of projective-iterative methods for solution the boundary-value problems of elasticity theory / E. L. Hart // SHMD'2010: Summaries of Lectures 9th International Symposium of Croatian Metallurgical Society (20–24 June 2010, Sibenik, Croatia). – Sibenik, 2010. – Vol. 49, No 3. – P. 227.

17. **Hart E. L.** Projection-iterative version of the pointwise relaxation method / E. L. Hart // J. Math. Sciences. – 2010. – Vol. 167, Iss. 1. – P. 76–88.

18. **Hudramovich V. S.** Mutual influence of openings on strength of shell-type structures under plastic deformation / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, D. V. Klimenko, S. A. Ryabokon' // Strength of Materials. – 2013. – Vol. 45, No 1. – P. 1–9.

19. **Hudramovich V. S.** Elastoplastic deformation of nonhomogeneous plates / V. S. Hudramovich, E. L. Hart, S. A. Ryabokon' // Journal of Engineering Mathematics. – 2013. – Vol. 78, No 1. – P. 181–197.

20. **Hudramovich V. S.** Influence of cutouts on strength of cylindrical compartments of launch vehicles at inelastic deformation of material / V. Hudramovich, D. Klymenko, E. Hart // Space Technologies: Present and Future: Abstracts of the 6th Intern. Conf. (May 23–26, 2017, Dnipro, Ukraine). – Dnipro: Yuzhnoye State Design Office, 2017. – P. 122.

*Дніпропетровський національний  
університет ім. Олеся Гончара,  
Дніпро, Україна*

*Надійшла до редколегії 04.05.2017*