

of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800

°C // Nuclear Engineering and Design. 2011. 241(7), 2416.

9. Vikram J., Sekar S. K. Enhancement of concrete sustainability under temperature variation using hybrid fibre reinforcement // Indian Journal of Science and Technology. 2015. October. Vol. 8 (28).

10. Shaikh F. U. A., Tawee M. Compressive strength and failure behavior of fibre reinforced concrete at elevated temperatures // Advances in Concrete Construction. 2015. Vol.3, No. 4. Pp. 283–293.

11. Alan Lau. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers. M. Phil. The Hong Kong Polytechnic University, 2003.

12. Jihwan Kim, Gyu Pil Lee, Do Young Moon. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test

//Construction and Building Materials. 2015. Vol. 79. Pp. 182–191.

13. Cheyrezy M., Maret V., Frouin L. Microstructural analysis of RPC // Cement and Concrete Research. 1995. 25 (7). Pp. 1491–150.

14. Stepanov V. G., Stepanyuchenko V. S. Obes pe chenie ognestoykosti zhelezobetonnykh stroitel' nykh konstruksiy [Providing fire resistance to reinforced concrete designs]. Stroitelstvo i arkhitektura – Construction and Architecture, 2008

15. Wasan I. Khalil. Influence of high temperature on steel fiber reinforced concrete.

Journal of Engineering and Development, 2006, Jun., vol. 10, no. 2, pp. 139–150.

16. Davidenko A.A., Davidenko A.I., Fomin S.L. Correction of concrete deformation diagrams for designing steel-reinforced concrete structures in case of fire. 220-229.

УДК 624.01

ПОТЕНЦІЙНА ЕНЕРГІЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТРИШАРОВОЇ ПІДКРІПЛЕНОЇ ПЛАСТИНИ

*Ємел'янова Т.А., доцент кафедри будівництва, архітектури та дизайну,
Херсонський державний аграрно-економічний університет*

Вступ. Тришарові пластини, як плоскі елементи конструкцій, знайшли широке застосування в різних галузях техніки і будівництва. Це пояснюється тим, що плоским тонкостінним конструкціям притаманні легкість і раціональність форм, висока несуча здатність, економічність і хороша технологічність. Для розрахунку таких конструкцій найчастіше застосовують

енергетичні методи, що базуються на поняттях потенційної енергії деформації зазначених конструкцій [1,2]. Тому отримання рівняння для потенційної енергії підкріпленої пластини для розробки нових методів розв'язання задач на стійкість та вільні коливання підкріплених тришарових пластин, є актуальною і перспективною задачею.

Основний текст. В роботі розглядається отримання рівняння потенційної енергії пружної деформації тришарової пластини з легким заповнювачем, яка підкріплена ребрами жорсткості (рис.1). Відстань між ребрами, а також їх жорсткості, вважаються однаковими. При цьому ребра розташовані симетрично відносно серединної поверхні тришарової пластини. Для виведення рівняння були прийняті наступні гіпотези: для зовнішніх несучих шарів – гіпотези Кірхгофа – Лява; для заповнювача і ребр – лінійний закон зміни тангенціальних переміщень за товщиною та враховувався згин ребер в вертикальній площині [3].

Для потенційної енергії деформації пластини маємо [4]:

$$\begin{aligned}
 U_{nl} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{r+1} \sum_{k=1}^{s+1} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_{y_{k-1}}^{y_k} \left[\int_{-h-\delta}^{-h} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \tau_{12} \gamma_{12}) dz + \right. \\
 & \left. + \int_h^{h-\delta} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \tau_{1,2} \gamma_{1,2}) dz + \int_{-h}^h (\tau_{12} \varepsilon_{12} + \tau_{23} \varepsilon_{23}) dz \right] dx dy,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де s, r - кількість ребер пластини у напрямку вісей x та y , $x_i, x_{i-1}, y_k, y_{k-1}$ - координати ділянки пластини, що замкнена між ребрами $i, i-1$ та $k, k-1$ (рис.1).

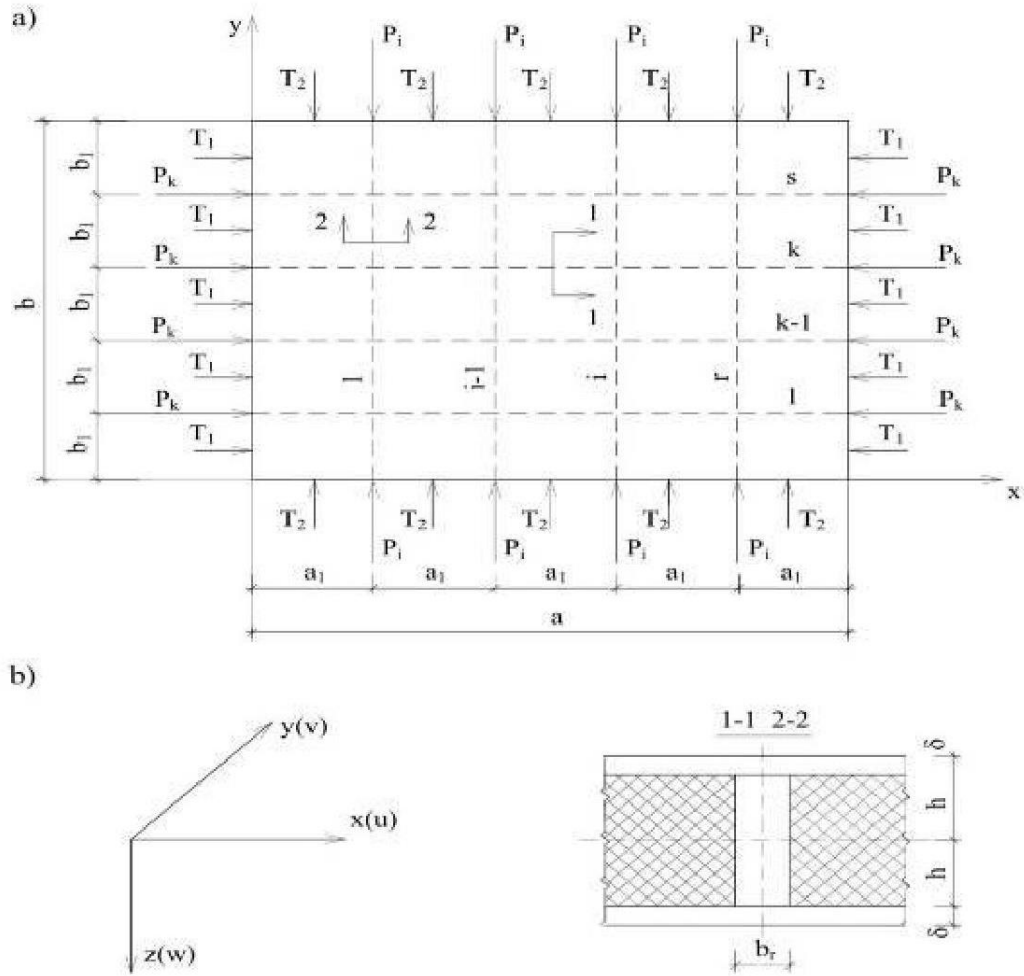


Рис. 1. Схема тришарової пластини з легким заповнювачем, яка підкріплена ребрами жорсткості: а) схема підкріпленої пластини в плані, б) розріз пластини за перерізами 1-1 та 2-2

$$\begin{aligned}
 U_{nl} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{r+1} \sum_{k=1}^{s+1} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_{y_{k-1}}^{y_k} \left\{ 2B \left[\left(\frac{\partial U_\alpha}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial y} \right)^2 + 2\mu \frac{\partial U_\alpha}{\partial x} \frac{\partial V_\alpha}{\partial y} + \right. \right. \\
 & + \frac{1-\mu}{2} \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial x} + \frac{\partial U_\alpha}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_\beta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\beta}{\partial y} \right)^2 + 2\mu \frac{\partial V_\beta}{\partial y} \frac{\partial U_\beta}{\partial x} + \\
 & \left. \left. + \frac{1-\mu}{2} \left(\frac{\partial V_\beta}{\partial x} + \frac{\partial U_\beta}{\partial y} \right)^2 \right] + 2D \left[(V^2 W)^2 - 2(1-\mu) \left(\frac{\partial W}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial W}{\partial y \partial x} \right)^2 \right) \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{2G_3}{h} \left(U_\beta - H \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \frac{2G_3}{h} \left(V_\beta - H \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy. \tag{2}
 \end{aligned}$$

Для потенційної енергії деформації ребер, що паралельні вісі y маємо:

$$U_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r \sum_{K=1}^{S+1} \int_{Y_{k-1}}^{Y_k} \left[\int_{-b_p/2}^{b_p/2} \int_{-h}^h (\tau_{13}\gamma_{13} + \sigma_2\varepsilon_2 + \tau_{23}\gamma_{23}) dx dz + C_i (\omega_{iy})^2 \right] dy. \quad (3)$$

$$U_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r \sum_{K=1}^{S+1} \int_{Y_{k-1}}^{Y_k} \left\{ \frac{2G_{13p}b_p}{h} \left(U_\beta - H \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \frac{2G_{23p}b_p}{h} \left(V_\beta - H \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2E_p b_p h \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial y} \right)^2 + \frac{2}{3} E_p b_p h \left(\frac{\partial V_\beta}{\partial y} - \frac{\delta}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + \frac{C_i}{4h^2} \left[\frac{\partial U_\beta}{\partial y} + \left(h - \frac{\delta}{2} \right) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right]^2 \right\} dy \quad (4)$$

де C_i, C_k - жорсткості ребер на кручення.

Максимальне значення потенційної енергії пластини та ребер:

$$U_{\max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{r+1} \sum_{k=1}^{s+1} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_{y_{k-1}}^{y_k} \left\{ 2B \left[\left(\frac{\partial U_\alpha}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial y} \right)^2 + 2\mu \frac{\partial U_\alpha}{\partial x} \frac{\partial V_\alpha}{\partial y} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1-\mu}{2} \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial x} + \frac{\partial U_\alpha}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_\beta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\beta}{\partial y} \right)^2 + 2\mu \frac{\partial V_\beta}{\partial y} \frac{\partial U_\beta}{\partial x} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1-\mu}{2} \left(\frac{\partial V_\beta}{\partial x} + \frac{\partial U_\beta}{\partial y} \right)^2 \right] + 2D \left[(\nabla^2 W)^2 - 2(1-\mu) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{2G_a}{h} \left(U_\beta - H \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \frac{2G_a}{h} \left(V_\beta - H \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 - 2T_1 \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 - 2T_2 \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^{s+1} \int_{y_{k-1}}^{y_k} \left\{ \frac{2G_{xzp}b_p}{h} \left(U_\beta - H \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \frac{2G_{yzp}b_p}{h} \left(V_\beta - H \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right. \\ \left. + 2E_p b_p h \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial y} \right)^2 + \frac{2E_p b_p h}{3} \left(\frac{\partial V_\beta}{\partial y} - \frac{\delta}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{C_i}{4h^2} \left[\frac{\partial U_\beta}{\partial y} + \left(h - \frac{\delta}{2} \right) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right]^2 - P_i \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right\} dy + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{r+1} \sum_{k=1}^s \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left\{ \frac{2G_{yzp}b_p}{h} \left(V_\beta - H \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 + \frac{2G_{xzp}b_p}{h} \left(U_\beta - H \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2E_p b_p h \left(\frac{\partial U_\alpha}{\partial x} \right)^2 + \frac{2E_p b_p h}{3} \left(\frac{\partial U_\beta}{\partial x} - \frac{\delta}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{C_k}{4h^2} \left[\frac{\partial V_\beta}{\partial x} + \left(h - \frac{\delta}{2} \right) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right]^2 - P_k \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right\} dx. \quad (5)$$

В рівняннях (1 – 5) позначено: ρ_r - щільність матеріалу ребра, що доводиться на одиницю об'єму; ρ_a - щільність матеріалу заповнювача, що доводиться на одиницю об'єму; ρ_o - щільність матеріалу зовнішніх шарів пластини, що доводиться на одиницю об'єму; $B = \frac{E \cdot \delta}{1 - \mu^2}$ - жорсткість на розтяг зовнішніх шарів; $D = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$ - згинальна жорсткість пластини.

Висновки Проаналізовано особливості напружено-деформованого стану підкріпленої тришарової пластини, що дозволило прийняти адекватні вихідні гіпотези та припущення.

Отримані вирази для потенційної енергії деформації тришарової пластини та ребер, а також для максимальної потенційної енергії підкріпленої пластини.

Список використаних джерел:

1. Алфутов Н.А., Трофимов В.В. Энергетический метод расчета оболочек на устойчивость, не требующий определения начального напряженного состояния. *Труды VII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок*, Днепропетровск, 1969 г. Москва: Наука, 1970. С. 52–57.
2. Дорофеев В.С., Ковров А.В., Крутий Ю.С., Оробей В.Ф., Сурьянинов Н.Г., Таций Р.М., Ушак Т.И. Новые методы расчета систем с дискретно-непрерывным распределением параметров / Под ред. Н.Г. Сурьянинова. Одесса: ЭВЕН, 2012. 374 с.
3. Емельянова Т.А. Дифференциальные уравнения свободных колебаний трехслойной оболочки, подкрепленной ребрами жесткости. *Теоретическая и прикладная механика: сборник научных трудов*. Минск: УП «Технопринт», 2002. С. 169–181.
4. Yemelianova T. A., Kirichenko V. L. Differential equations of stability and free oscillations of a three-layer plate supported by rigidity ribs. *Perspective trajectory of scientific research in technical sciences: Collective monograph*. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 9.07.2021. P.132-154.