

**Ніколайчук В. В., к.т.н., викладач Технічного коледжу НУВГП,
Тимейчук О. Ю., к.т.н., доцент, Костюк О. П., к.т.н., доцент**
(Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне)

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ НА МІЦНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ З'ЄДНАННЯ ЗМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ

В статті розроблена метод розрахунку деталей з'єднання змінної жорсткості (ЗЗЖ) при нерівномірному нагріванні. Наведено приклад визначення деформацій і напружень в деталі з'єднання порожнистого циліндричного вала при нерівномірному нагріванні його поверхні із використанням методу теорії оболонки. За результатами обчислень побудовані графіки переміщень і силових чинників в характерному перерізі вала з врахуванням зміни температури. Визначені максимальні напруження і, порівнюючи їх з допустимими, зроблено висновок про міцність деталі при нерівному її нагріванні. У списку посилань можна знайти інформацію про інші типи ЗЗЖ (структура, принцип роботи, методи розрахунків).

***Ключові слова:* вал; деталь; деформація; з'єднання; температура; жорсткість; напруження.**

Застосування ЗЗЖ в сучасних машинах (транспортні засоби, технологічне обладнання) дозволить підвищити їх надійність і довговічність. Навантажувальна здатність елементів цих з'єднань залежить від властивостей матеріалів, технологічних та експлуатаційних умов і режимів роботи машин. Тому розробка нових конструкцій ЗЗЖ з високими технічними характеристиками є актуальною, оскільки їх застосування підвищить показники надійності і довговічності як транспортних засобів так і інших типів машин.

Вважаємо, що використання методів теорій оболонки і пружності при розрахунках деталей забезпечить їх більшу точність.

Проблеми розробки нових конструкцій ЗЗЖ, методи розрахунку їх деталей на міцність і жорсткість, частково висвітлені в публікаціях

[1; 2; 3]. Однак, питання розрахунку деталей з'єднань при різних температурних режимах ще не було розглянуто.

Тому метою нашого дослідження є розробка методу розрахунку ЗЗЖ при нерівномірному нагріванні. Ці деталі застосовуються в технологічному обладнанні, що працює при різних температурних режимах.

Розглянемо приклад розрахунку температурного режиму деталі з'єднання [2] при її нагріванні, яка має форму циліндричної оболонки із ступінчатою змінною товщиною (рисунок).

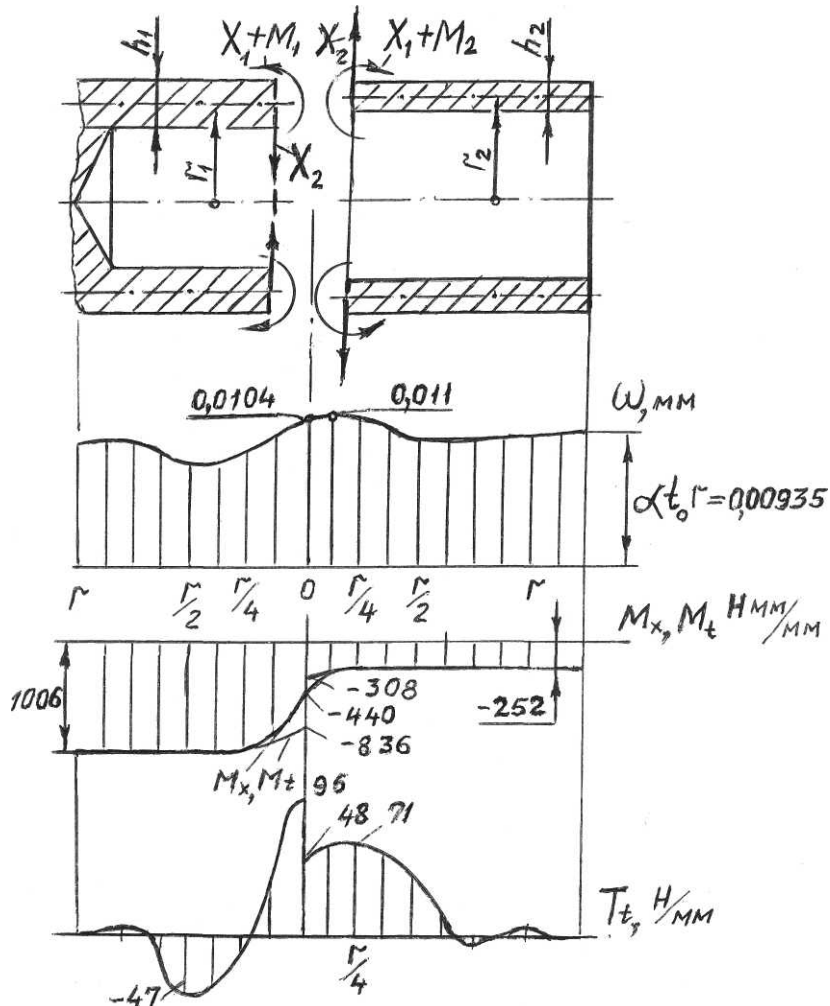


Рисунок. Епюра переміщень і силових чинників в деталі ЗЗЖ

Нагрівання деталі відбувається внаслідок тертя поверхонь

валів під час роботи ЗЗЖ. Поверхні деталі нагріваються до таких температур: внутрішня $t_1 = 80^\circ C$, зовнішня $t_2 = 20^\circ C$.

Геометричні параметри: $r_1 = 16 \text{ мм}$, $r_2 = 18 \text{ мм}$, $h_1 = 8 \text{ мм}$, $h_2 = 4 \text{ мм}$, $l_1 = 15 \text{ мм}$, $l_2 = 40 \text{ мм}$.

Фізичні параметри: Матеріал – сталь, $\mu = 0,3$, $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\beta_1 = 0,114 \frac{1}{\text{мм}}$, $\beta_2 = 0,15 \frac{1}{\text{мм}}$, $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$, $D_1 = 9,38 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{мм}$, $D_2 = 1,172 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

При розрахунках температурних напружень приймаємо такі допущення:

- 1) матеріал деталі однорідний;
- 2) діапазон зміни температури по об'єму деталі малий;
- 3) модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ і коефіцієнт лінійного розширення α вважаються постійними;
- 4) температура по товщині деталі змінюється за лінійним законом.

Умовно розріжемо оболонку по лінії дотику на дві частини і уявимо заданий стан як суму двох станів (рисунок). Обидві частини оболонки нагріті із заданим перепадом температур $\Delta t = 60^\circ C$ і додатково навантажені по краях моментами:

на першій частині –

$$M_1^t = \alpha \cdot \Delta t (1 + \mu) \frac{D_1}{h_1} = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot h_1^2}{12(1 - \mu)} = 1006 \text{ Н} \cdot \text{мм} / \text{мм}, \quad (1)$$

і на другій частині –

$$M_2^t = \alpha \cdot \Delta t (1 + \mu) \frac{D_2}{h_2} = \frac{\alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot h_2^2}{12(1 - \mu)} = 252 \text{ Н} \cdot \text{мм} / \text{мм}. \quad (2)$$

Для визначення силових чинників X_1 і X_2 запишемо умови спільності деформацій частин оболонки: радіальні переміщення і кути повороту нормалі на краях повинні бути однакові: $\omega_{01} = \omega_{02}$, $v_{01} = -v_{02}$.

В останньому виразі взято знак мінус, так як напрямки осі x для першої і другої оболонки є протилежними. Для визначення деформації використовуємо залежності [4].

Перша частина оболонки при $x = 0$:

$$M_0 = X_1 + M_1^t, \quad Q_0 = -X_2,$$

$$\omega_{01} = \frac{X_1 + M_1'}{2D_1\beta_1^2} - \frac{X_2}{2D_1\beta_1^3}, \quad v_{01} = -\frac{X_1 + M_1'}{D_1\beta_1} + \frac{X_2}{2D_1\beta_1^2}. \quad (3)$$

Аналогічно для другої частини оболонки при $x = 0$:

$$M_0 = X_1 + M_2', \quad Q_0 = X_2, \\ \omega_{02} = \frac{X_1 + M_2'}{2D_2\beta_2^2} + \frac{X_2}{2D_2\beta_2^3}, \quad v_{02} = -\frac{X_1 + M_2'}{D_2\beta_2} - \frac{X_2}{2D_2\beta_2^2}. \quad (4)$$

Підставимо ці вирази в умови спільності деформацій частин і враховуючи, що їх параметри такі:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{E \cdot h_1^3}{12(1-\mu^2)} = 9,38 \cdot 10^6 \text{ H} \cdot \text{мм}, \\ D_2 &= \frac{E \cdot h_2^3}{12(1-\mu^2)} = 1,172 \cdot 10^6 \text{ H} \cdot \text{мм}, \\ \beta_1 &= \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r_1^2 \cdot h_1^2}} = 0,114 \frac{1}{\text{мм}}, \\ \beta_2 &= \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r_2^2 \cdot h_2^2}} = 0,15 \frac{1}{\text{мм}}, \\ k_{D_1} &= \frac{D_1 \beta_1^2}{D_2 \beta_2^2} = 4,62, \\ k_{D_2} &= \frac{D_1 \beta_1}{D_2 \beta_2^2} = 6,08. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

отримаємо два рівняння:

$$X_1(1 - k_{D_1}) - X_2\left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{k_{D_1}}{\beta_2}\right) + (M_1 - M_2 k_{D_1}) = 0, \quad (6) \\ X_1(1 + k_{D_1}) - 0,5X_2\left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{k_{D_2}}{\beta_2}\right) + (M_1 + M_2 k_{D_2}) = 0.$$

Розв'язок рівнянь (6) при заданих значеннях параметрів (1, 2, 5):

$$X_1 = -440 \frac{\text{H} \cdot \text{мм}}{\text{мм}}, \quad X_2 = 36,25 \frac{\text{H}}{\text{мм}}.$$

Радіальні переміщення ω_i обчислюємо в перерізах x_i кратних $r = 17 \text{ мм}$ за формулою [4]:

$$\omega_i = \frac{M_0}{2D_i\beta_i^2} e^{-\beta_i x_i} (\cos \beta_i x_i - \sin \beta_i x_i) + \frac{Q_0}{2D_i\beta_i^3} e^{-\beta_i x_i} \cos \beta_i x_i + \alpha t_0 r. \quad (7)$$

Внутрішні силові чинники M_x , M_t і T_t обчислюємо за формулами [4]:

$$M_{x_i} = D_i \frac{d^2 \omega_i}{dx_i^2} - M_i^t; \quad M_{t_i} = D_i \mu \frac{d^2 \omega_i}{dx_i^2} - M_i^t. \quad T_{t_i} = Eh_i \left(\frac{\omega_i}{r} - \alpha t_0 \right). \quad (8)$$

Результати обчислень представимо у вигляді епюр на рисунку. Найбільш напружена точка розміщена на зовнішній поверхні тонкої частини біля ступінчатого переходу.

Сили, згинаючі моменти і напруження в цьому місці мають такі значення;

$$T_x = 0, \quad T_t = 48 \text{ H/мм}, \quad M_x = 440 \text{ H} \cdot \text{мм/мм}, \quad M_t = 308 \text{ H} \cdot \text{мм/мм},$$

$$\sigma_x = \frac{M_x \cdot 6}{h_2^2} = \frac{440 \cdot 6}{4^2} = 165 \text{ H/мм}^2,$$

$$\sigma_t = \frac{T_t}{h_2} + \frac{M_t \cdot 6}{h_2^2} = \frac{48}{4} + \frac{308 \cdot 6}{4^2} = 116 \text{ H/мм}^2.$$

На віддалі від ступінчастого переходу в деталі виникають згинаючі моменти M_1^t і M_2^t , яким відповідають напруження $\sigma_x = \sigma_t = 100 \text{ H/мм}^2$.

По розрахованим максимальним напруженням та порівнянням їх з допустимими робимо висновок про міцність деталі.

Розроблений метод розрахунку на міцність деталей ЗЗЖ при нерівномірному нагріванні дозволяє перевірити надійність з'єднання з врахуванням особливостей його конструкції та умов роботи.

1. Ніколайчук В. В., Тимейчук О. Ю. Особливості розрахунку деталей з'єднань змінної жорсткості. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2018. Вип. 1(81). С. 183–193.
2. З'єднання змінної жорсткості : пат. 129126, Україна: МПК В 60 G 11/00. № 201812457; заявл. 14.12.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8 / Малащенко В. О., Ніколайчук В. В., Тимейчук О. Ю.
3. Ніколайчук В. В., Тимейчук О. Ю. Метод розрахунку на міцність деталей нової конструкції з'єднання змінної жорсткості. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. Рівне : НУВГП, 2020. Вип. 1(89). С. 165–176.
4. Бояршинов С. В. Основы строительной механики машин : учебное пособие для студентов вузов. М. : Машиностроение, 1973. 456 с.
5. Павлице В. Т. Основы конструирования та розрахунок деталей машин : підручник. 2-е вид. випр. Львів : Афіша, 2003. 560 с.

REFERENCES:

1. Nikolaichuk V. V., Tymeichuk O. Yu. Osoblyvosti rozrakhunku detalei ziednan zminnoi zhorstkosti. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*. Rivne : NUVHP, 2018. Vyp. 1(81). S. 183–193.
 2. Ziednannia zminnoi zhorstkosti : pat. 129126, Ukraina: MPK V 60 G 11/00. № 201812457; zaiavl. 14.12.2018; opubl. 25.04.2019, Biul. № 8 / Malashchenko V. O., Nikolaichuk V. V., Tymeichuk O. Yu.
 3. Nikolaichuk V. V., Tymeichuk O. Yu. Metod rozrakhunku na mitsnist detalei novoi konstruktsii ziednannia zminnoi zhorstkosti. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*. Rivne : NUVHP, 2020. Vyp. 1(89). S. 165–176.
 4. Boiarshynov S. V. Osnovy stroytelnoi mekhanyky mashyn : uchebnoe posobyе dlia studentov vuzov. M. : Mashynostroenye, 1973. 456 s.
 5. Pavlyshche V. T. Osnovy konstruiuvannia ta rozrakhunok detalei mashyn : pidruchnyk. 2-e vyd. vypr. Lviv : Afisha, 2003. 560 s.
-

**Nikolaichuk V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Lecturer,
Tymeichuk O. Y., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
Kostiuk O. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor**
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

METHOD OF CALCULATING THE INFLUENCE OF AN UNEVEN TEMPERATURE REGIME ON THE STRENGTH OF CONNECTING DETAILS OF VARIABLE RIGIDITY

In the article, a method of calculating the details of the joint of variable stiffness with uneven heating is developed. An example of determining deformations and stresses in the joint details of a hollow cylindrical shaft with uneven heating of its surface using the shell theory method is given. Based on the results of calculations, graphs of displacements and force factors in the characteristic cross-section of the shaft were constructed, taking into account the temperature change.

The maximum stresses were determined and, comparing them with the permissible ones, a conclusion was made about the strength of the part with uneven heating. In the list of links you can find information about other types of PPE (structure, principle of operation, calculation methods).

Keywords: shaft; part; deformation; connection; temperature; stiffness; stress.