

УДК 539.3

Жук Я. О.<sup>1</sup>, д. ф.-м. н., проф.

### Методика оцінки залишкової міцності тонкостінного сталевго елемента конструкції при імпульсному тепловому опроміненні

У рамках динамічної постановки зв'язаної задачі термомеханіки досліджується залишковий напружено-деформований стан металевго диска, що виникає внаслідок дії теплового імпульсу. Розв'язування осесиметричної задачі проводиться чисельно з використанням термодинамічно узгодженої теорії непружної поведінки матеріалу із застосуванням скінченноелементної методики. Вивчається реакція матеріалу на процеси теплового опромінення і наступного поступового охолодження, досліджуються поля основних механічних величин, які входять до критеріїв міцності металевих елементів конструкції.

Ключові слова: імпульсне теплове опромінення, термов'язкопластичність, залишковий напружено-деформований стан.

<sup>1</sup> Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, 03187, м. Київ, просп. Глушкова, 4 е  
e-mail: y.zhuk@i.ua

Теплове імпульсне опромінення відноситься до технологій, які ґрунтуються на новітніх фізичних принципах і можуть знаходити широке застосування у промисловості, зокрема, для обробки поверхні з метою підвищення міцності, довговічності та витривалості деталей машин і елементів конструкцій [1, 2].

Для покращення експлуатаційних характеристик конструкцій використовуються, як правило, лазери слабкої і середньої потужності (2-3 кВт), або пучки електронних променів. При цьому для оцінки міцності конструкції необхідно розраховувати залишковий напружено-деформований стан (НДС).

Слід зазначити, що при обробці поверхні імпульсами малої потужності або тривалішими імпульсами термомеханічний вплив на матеріал при опроміненні реалізується, як правило, через наступний механізм: за відсутності абляції відбувається швидкий розігрів матеріалу і наступне поступове охолодження з великими градієнтами температури. Як наслідок, виникають великі теп-

Y. A. Zhuk<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

### Technique of the residual strength estimation of thin-wall steel structural element under thermal peening

The residual stress-strains state of the metal disk caused by the thermal pulse are investigated within the framework of the coupled dynamic thermomechanics. Solution of axisymmetric problem carried out numerically using the thermodynamically consistent theory for inelastic behavior of the material involving finite element method. Response of the material to thermal irradiation and following gradual cooling processes are studied, and the fields of the main mechanical characteristics used in the strength criteria of the metal structural elements are investigated.

Key Words: thermal pulse irradiation, thermoviscoplasticity, residual stress-strain state.

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, 4e Glushkov ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
e-mail: : y.zhuk@i.ua

лові напруження і залишкові деформації. При цьому механічні і трибологічні властивості елемента конструкції можуть суттєво змінитися не лише безпосередньо на поверхні, а й у приповерхневому шарі.

Мета даного дослідження полягає у розробці методики вивчення взаємодії теплового імпульсу і елемента конструкції із визначенням залишкового НДС. Для цього використовується динамічна постановка задачі із залученням узагальненої погодженої з термодинамікою незворотних процесів моделі фізично нелінійної поведінки матеріалів в широкому діапазоні температур. Вплив опромінення моделюється заданням теплового потоку через границю, що відповідає випадку опромінення лазерами малої потужності.

В рамках такого наближення досліджується осесиметрична задача про дію теплового імпульсу в центрі сталевго диска. При цьому вважається, що термомеханічний вплив на матеріал не супроводжується зміною агрегатного стану. Задача розв'язується за допомогою методики скін-

чених елементів, розвиненої для моделювання зв'язаної термомеханічної поведінки фізично нелінійних матеріалів [3].

### 1. Постановка задачі. Основні рівняння

Розглядається диск радіусу  $R$  і товщини  $h$ , геометрія якого в циліндричній системі координат  $Orz\varphi$  задається так:  $|r| \leq R$ ,  $0 \leq |z| \leq h$ . Центр поверхні  $z=0$  опромінює одноразовий тепловий імпульс, що моделюється тепловим потоком  $q_s$  через границю диску, який змінюється за законом

$$q_s = \begin{cases} q_0 \cos \frac{\pi r}{2r_p} \sin \frac{\pi t}{t_p}; & r \leq r_p, t \leq t_p, \\ 0; & r > r_p, t > t_p, \end{cases} \quad (1)$$

де  $t_p$  – тривалість імпульсу,  $r_p$  – радіус теплової плями. Така «дзвоноподібна» форма імпульсу з поступовим наростанням і спаданням у часі відповідає реальним умовам опромінення.

Вся інша поверхня диска вважається теплоізолюваною. Після припинення дії імпульсу опромінена частина поверхні теж вважається теплоізолюваною.

Постановку динамічної осесиметричної зв'язаної задачі складають – співвідношення Коші

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right), \quad (2)$$

– рівняння руху

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\varphi) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

– рівняння балансу енергії, що зводиться до рівняння теплопровідності,

$$c_v \dot{\theta} + 3\alpha \theta K_V (\dot{\varepsilon}_{kk} - 3\alpha \dot{\theta}) - D' - k \Delta \theta = r_s, \quad (4)$$

– механічні граничні умови

$$\sigma_{ij} n_j = 0 \text{ на } S, \quad (5)$$

– теплові граничні умови

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial \theta}{\partial z} &= q_s \text{ на } S_p \text{ і } 0 \leq t \leq t_p; \\ \frac{\partial \theta}{\partial n} &= 0 \text{ на } S - S_p, \end{aligned} \quad (6)$$

і початкові умови

$$u_r = u_z = \dot{u}_r = \dot{u}_z = 0, \quad \theta = \theta_0 \text{ при } t = 0, \quad (7)$$

де  $u_r$ ,  $u_z$  – переміщення вздовж відповідних осей;  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_{rz}$  і  $\varepsilon_\varphi$  – компоненти тензора деформації;  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{rz}$  і  $\sigma_\varphi$  – компоненти тензора напружень;  $\theta$  – температура;  $\alpha$ ,  $c_v$  і  $k$  – коефіцієнти лінійного теплового розширення, теплоємності при сталому об'ємі і теплопровідності відповідно;  $K_V$  – об'ємний модуль матеріалу;  $r_s$  – потужність заданих внутрішніх джерел тепла;  $D'$  – швидкість дисипації механічної енергії,  $\theta_0$  – початкова температура;  $n_j$  – компонента вектора одиничної нормалі до відповідної граничної поверхні;  $S_p$  – частина поверхні ( $r \leq r_p$ ,  $z = 0$ ), яка знаходиться під дією теплового імпульсу;

$$\dot{\varepsilon}_{kk} = \dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_\varphi; \quad \Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Для описання фізично нелінійної поведінки матеріалу диска і конкретизації вигляду дисипативної функції  $D'$  використовується теорія, розвинена на основі моделі Боднера – Партома (МБП) і узагальнена на випадок зв'язаних термомеханічних процесів [3, 4].

Вона використовує – представлення повної деформації у вигляді суми пружної, пластичної і теплової складових

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^\theta, \quad ij \leftrightarrow r, z, rz, \varphi, \quad (8)$$

де тепла деформація представляється у вигляді

$$\varepsilon_{ij}^\theta = \delta_{ij} \int_{\theta_0}^{\theta} \alpha(\theta') d\theta'; \quad (9)$$

– закон Гука, записаний для кульової і девіаторної частин

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - \varepsilon_{ij}^p), \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^\theta), \quad (10)$$

де  $s_{ij}$  і  $e_{ij}$  – девіатори тензорів напруження і деформації відповідно;  $G$  – модуль зсуву; по індексах, що повторюються, проводиться додавання; – закон течії з умовою пластичної нестисливості

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda s_{ij}, \quad \dot{\varepsilon}_{kk}^p = 0; \quad (11)$$

– кінетичне рівняння

$$D_2^p = D_0^2 \exp \left[ - \left( \frac{Z^2}{3J_2} \right)^n \right], \quad (12)$$

де  $Z = K + D$ ,  $J_2 = s_{ij} s_{ij} / 2$ ,  $D_2^p = \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p / 2$ ,  $\lambda^2 = D_2^p / J_2$ ; – рівняння еволюції для внутрішніх змінних ізотропного  $K$  та направленою  $\beta_{ij}$  зміцнення

$$\dot{K} = m_1 (K_1 - K) \dot{W}_p, \quad K(0) = K_0,$$

$$\dot{\beta}_{ij} = m_2(D_1 u_{ij} - \beta_{ij}) \dot{W}_p, \quad \beta_{ij}(0) = 0, \quad (13)$$

де  $D = \beta_{ij} u_{ij}$ ,  $u_{ij} = \sigma_{ij} / (\sigma_{ij} \sigma_{ij})^{1/2}$ ,  $\dot{W}_p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p$ .

Величини  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  і  $n$  є константами моделі [3, 4]. Експериментальні і теоретичні дослідження [3, 4] показали, що для більшості металів параметри  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $m_2$  слабо залежать від температури і можуть вважатись сталими в широкому інтервалі температур. Параметри  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $m_1$  і  $n$  – функції температури.

В рівняннях (13) на відміну від робіт [3, 4] відсутні доданки, що визначають тепловий зворот. Оскільки процеси, які розглядаються в даній роботі, достатньо швидкі, то при описанні поведінки матеріалу цим явищем можна знехтувати.

В загальному випадку для повного описання зв'язаної термомеханічної поведінки матеріалу диска необхідна конкретизація вигляду дисипативної функції  $D'$ . В даній роботі внаслідок специфічних умов теплового навантаження вважаємо, що розсіяною механічною енергією можна знехтувати, тому дисипативна функція буде дорівнювати нулю:  $D' = 0$ .

Рівняння (1) – (13) складають постановку зв'язаної задачі термомеханіки фізично нелінійних тіл при тепловому навантаженні.

Постановка задачі (1) – (13) є суттєво нелінійною і розв'язується чисельно. Для цього використовується підхід, розвинений в статтях [3, 4] для розв'язання динамічних плоских і осесиметричних задач термов'язкопластичності.

## 2. Результати розрахунків

Розрахунки проводились для диска радіусом  $R = 5 \cdot 10^{-3}$  м і товщиною  $h = 10^{-4}$  м. Радіус зони опромінення  $r_p = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м, тривалість дії імпульсу  $t_p$  змінювалась від  $10^{-8}$  с до  $10^{-7}$  с, параметр теплового потоку  $q_0$  також відповідно змінювався від  $6 \cdot 10^7$  кВт/м<sup>2</sup> до  $2 \cdot 10^8$  кВт/м<sup>2</sup>. Початкова температура диска  $\theta_0$  приймалась рівною  $20^\circ\text{C}$ .

Фізико-механічні властивості матеріалу та їх температурні залежності взяті з робіт [3, 4].

Дослідження полів компонент пластичної деформації показало, що в досліджених умовах теплового навантаження виникають значні пластичні деформації в зоні опромінення. Динаміка розподілів компонент пластичної деформації  $\epsilon_{rr}^p$  вздовж радіуса при  $z = 0$  і вздовж осі диска при  $r = 0$ , а також  $\epsilon_{zz}^p$  вздовж осі диска при  $r = 0$

представлена на рис. 1. Дані побудовані для випадку, коли параметр теплового потоку дорівнює  $q_0 = 2 \cdot 10^8$  кВт/м<sup>2</sup>. На рисунках моменти часу вказані цифрами.

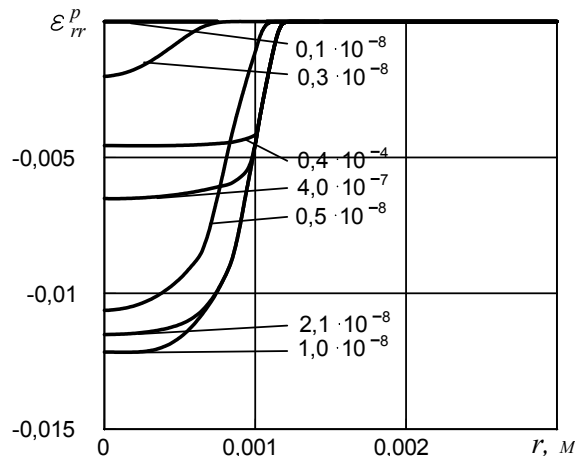


Рис. 1а. Розподіл компоненти пластичної деформації  $\epsilon_{rr}^p$  вздовж радіуса диска

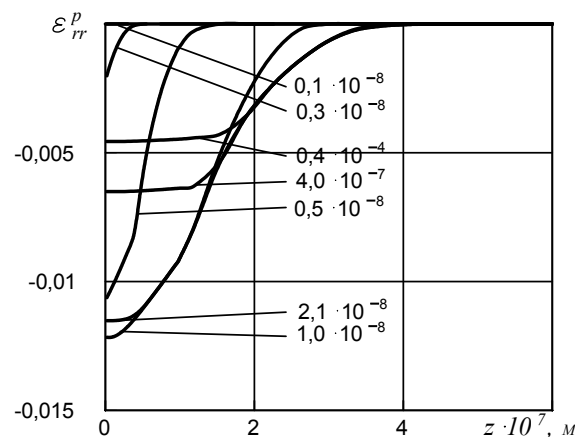


Рис. 1б. Розподіл компоненти пластичної деформації  $\epsilon_{rr}^p$  по товщині диска

Особливий інтерес з точки зору зміцнення матеріалу має оцінка залишкових полів напружень і пластичної деформації. На рис. 2 представлені типові розподіли компоненти залишкової пластичної деформації  $\epsilon_{rr}^p(r)$  при  $z = 0$  для різних значень параметра теплового потоку  $q_0$ .

З наведених даних видно, що збільшення теплового потоку призводить до розширення області впливу імпульсу температури.

Оцінка залишкової міцності елемента конструкції вимагає розрахунку залишкових полів основних механічних величин.

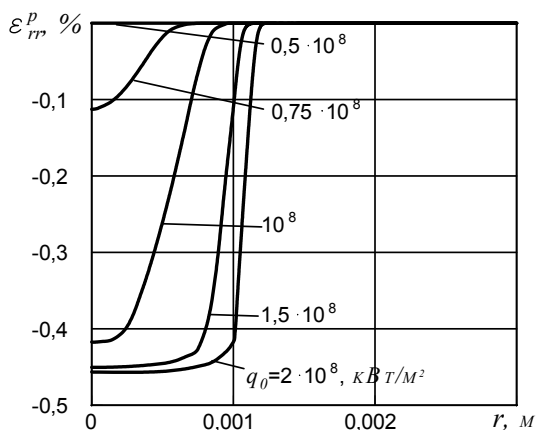


Рис. 2. Залишкова пластична деформація  $\varepsilon_{rr}^p$  при різних значеннях параметра теплового потоку  $q_0$

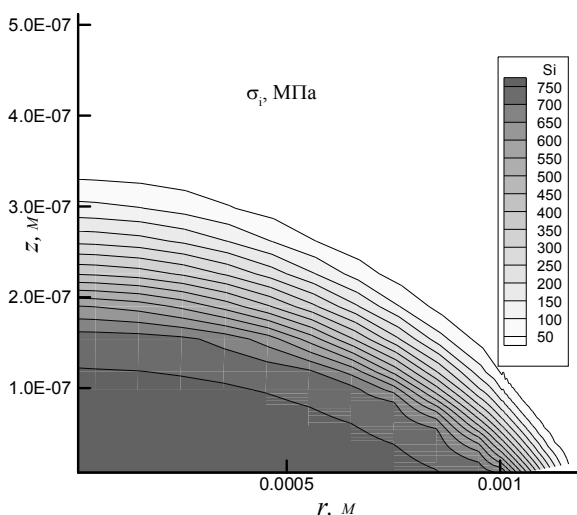


Рис. 3. Просторовий розподіл інтенсивності напружень

Численні критерії оцінки залишкової міцності елемента конструкції ґрунтуються на використанні максимальних головних напружень або деформацій, максимальних дотичних напружень, максимальних деформацій зсуву, октаедричних напружень, максимальних пластичних деформацій, інтенсивності напружень або інтенсивності пластичних деформацій тощо.

На рис. 3 показано залишкове поле інтенсивності напружень в околі зони опромінення. Поле інтенсивності пластичної деформації та поле максимальних головних напружень демонструють аналогічну поведінку. Максимум спостерігається безпосередньо в центрі диска (зони опромінення). При наближенні до краю теплової плями інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , деформацій  $\varepsilon_i$  і максимальне головне напруження  $\sigma_{pr}^{\max}$  різко змен-

шуються. Область небезпечних значень досліджуваних величин зосереджена всередині круга радіусом приблизно  $r = 1,1$  мм. За його межами рівні залишкових інтенсивностей напружень та деформацій, максимальних головних напружень незначні.

### 3. Висновки

Розроблена методика оцінки залишкової міцності тонкостінного сталевго елемента конструкції при імпульсному лазерному або пучковому опроміненні є застосовною до металічних елементів конструкцій за прийнятих припущень. Аналіз отриманих результатів показує, що визначення розмірів області впливу теплового імпульсу може проводитися як за компонентами напружень або пластичних деформацій, так і за параметром ізоτροпного зміцнення. В усіх означених випадках присутня кореляція між розмірами цієї зони, що дозволяє вважати адекватною запропоновану методику визначення області впливу термічного імпульсу, полів залишкових інтенсивностей напружень, деформації або максимальних головних напружень. Ці величини можуть бути застосованими для оцінки залишкової міцності обробленого короткими тепловими імпульсами заданої форми елемента конструкції шляхом використання будь-якого з критеріїв, оснований на використанні інтенсивностей напружень, деформації або максимальних головних напружень, а також критеріїв, що комбінують ці величини.

### Список використаних джерел

1. Ocana J. L., Morales M., Molpeceres C. and Torres J. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments // Applied Surface Science. – 2004. – V. 238. – P. 242-248.
2. Chen H., Kysar J. and Yao Y. L. Characterization of plastic deformation induced by microscale laser shock peening // J. Appl. Mech. – 2004. – V. 71. – P. 713-723.
3. Zhuk Y. A., Senchenkov I. K., Boychuk Y. V. Residual stress-strains state of steel disk under the thermal pulse irradiation // Math. Meth. and Phys.-Mech. Fields. – 2008. – V. 51, № 1. – P. 157-168. (in Ukrainian).
4. Zhuk Y. A., Senchenkov I. K., Kozlov V. I., Tabieva G. A. Axisymmetric dynamic coupled problem of thermoviscoelasticity // Int. Appl. Mech. – 2001. – V. 37, № 10. – P. 1311-1317.

Надійшла до редколегії 13.03.2013