

УДК 539.376

О.В. Бойчук, аспірант.

Поле залишкової непружної деформації в диску, викликане тепловим імпульсом

У рамках динамічної постановки зв'язаної задачі термомеханіки чисельно досліджено залишкові непружні деформації в зоні опромінення. Встановлено, що радіальні компоненти непружної деформації є стискаючими, а осьові компоненти є розтягуючими. Розподіл має екстремальні значеннями в центрі плями опромінення. Розподіл залишкових непружних деформацій визначається формою та величиною теплового імпульсу.

Ключові слова: залишкові непружні деформації, опромінення, тепловий імпульс, нелінійна поведінка матеріалу

E-mail: term@inmech.kiev.ua

Представив професор В.В. Мелешко

1. Вступ

Обробка поверхні деталей лазерним імпульсом або електронним променем є сучасним методом підвищення міцності, довговічності та витривалості деталей машин. Зокрема, технологія блокування поширення втомної тріщини полягає в створенні поля стискаючих залишкових напружень і пластичних деформацій за допомогою імпульсного вибухового впливу з фокусуванням енергії в області вершини тріщини [7]. Крім того, в процесі експлуатації елементи конструкцій можуть зазнавати дії теплових імпульсів, які спричиняють появу непружних залишкових деформацій. Механічні властивості елементів конструкції при цьому можуть суттєво змінитися в зоні опромінення.

В даній статті досліджується непружне деформування сталевого диска під дією опромінення і наступного поступового охолодження в рамках динамічної постановки задачі із залученням узагальненої погодженої з термодинамікою незворотних процесів моделі фізично нелінійної поведінки матеріалів в широкому діапазоні температур [3,14].

2. Постановка задачі

В циліндричній системі координат $O r z \varphi$ розглядається диск радіусу $|r| \leq R$ і товщини $0 \leq |z| \leq h$. Центр поверхні $z = 0$ опромінюється тепловим імпульсом, що моделюється тепловим

O.V. Boychuk, PhD student.

The field of residual inelastic strains of nonelastic disk caused by thermal pulse

The residual inelastic strains in irradiation zone are investigated within the framework of posing the dynamic statement coupled thermomechanics problem. It established that radial component's of inelastic strains are compressive and axial component's are stretch, distribution has extramal value in the center irradiation spot. The field of residual inelastic strains determine by form and parametr of thermal pulse.

Key Words: residual inelastic strains, thermal pulse irradiation, inelastic material behavior.

поток q_s через границю диску, який змінюється за законом

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

де t_p і r_p – тривалість та радіус дії імпульсу.

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

В постановку динамічної осесиметричної зв'язаної задачі входять співвідношення Коші

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

рівняння руху

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\varphi) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2},$$

рівняння балансу енергії

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

механічні граничні умови

$$\sigma_{ij} n_j = 0 \text{ на } S,$$

теплові граничні умови

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial z} = q, \text{ на } S_p, 0 \leq r \leq r_p;$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 \text{ на } S - S_p,$$

початкові умови

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

де u_r, u_z – переміщення вздовж відповідних осей; $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_{rz}$ і ε_φ – компоненти тензора деформації; $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_{rz}$ і σ_φ – компоненти тензора напружень; θ – температура; α, 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, θ_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; $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_\varphi$;

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Фізично нелінійна поведінки матеріалу диска описується за допомогою розвиненої на основі моделі Боднера–Партома [5,9] узагальненої термодинамічно узгодженої теорії. Ця теорія використовує:

– представлення повної деформації у вигляді суми пружної, непружної і теплової складових

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

$$\text{де } \varepsilon_{ij}^\theta = \delta_{ij} \int_0^{\theta} \alpha(\theta') d\theta';$$

– закон Гука

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

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

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

– кінетичне рівняння

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

$$\text{де } Z = K + D, \quad J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \quad D_2^p = \frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p,$$

$$\lambda^2 = D_2^p / J_2;$$

– рівняння еволюції для внутрішніх змінних ізотропного K та направленого β_{ij} змішнень

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

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

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

В рівняннях еволюції на відміну від робіт [5,9] знехтувані доданки, що визначають тепловий зворот, оскільки розглядувані процеси достатньо швидкі.

Величини $D_0, D_1, K_0, K_1, m_1, m_2$ і n є константами моделі [5,9]. Експериментальні і теоретичні дослідження [6] 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.

Вираз для швидкості дисипації механічної енергії D' , отриманий із залученням термодинаміки незворотних процесів із внутрішніми змінними, має вигляд [5]

$$D' = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p - K\dot{\delta} - \beta_{ij} \dot{\alpha}_{ij} = \dot{W}_p - \dot{W}_{\delta K} - \dot{W}_{\beta p},$$

де δ і α_{ij} – внутрішні змінні, спряжені до термодинамічних сил K і β_{ij} . Останні два доданки описують частину непружної потужності, що не переходить у тепло, а накопичується у матеріалі.

3. Метод розв'язання

Як матеріал диску використовується сталь 35ХМА. Її фізико-механічні властивості взяті з роботи [4], а значення параметрів моделі Боднера–Партома отримані обробкою діаграм розтягу з книг [6,12]. Враховуються температурні залежності властивостей матеріалу і деяких параметрів моделі Боднера–Партома.

Постановка задачі є суттєво нелінійною і розв'язується чисельно з використанням підходу, розвиненого в статтях [3,5] для розв'язання динамічних плоских і осесиметричних задач термов'язкопластичності.

Чисельна реалізація задачі проводиться у рамках подвійного ітераційного процесу. Перший – внутрішній – пов'язаний з інтегруванням системи нелінійних рівнянь моделі поведінки матеріалу з використанням неявної схеми, другий – зовнішній – з

розв'язанням рівнянь руху і теплопровідності. В рамках зовнішнього ітераційного процесу враховується температурна залежність констант матеріалу і параметрів моделі Боднера–Партома. Наявність областей швидкої зміни розв'язку при переході від пружного деформування до пластичного вимагає застосування схем із змінним кроком інтегрування в часі. Рівняння еволюції інтегруються неявним методом Ейлера з використанням правила «середньої точки». Система нелінійних трансцендентних рівнянь, яка виникає на кожному кроці за часом, розв'язується методом простої ітерації. Для прискорення збіжності використовується процедура Стефенса–Ейткена.

Задача розв'язується за допомогою методики скінчених елементів розвиненої для моделювання зв'язаної термомеханічної поведінки фізично нелінійних матеріалів.

4. 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 в інтервалі від $6 \cdot 10^7$ кВт/м² до $2 \cdot 10^8$ кВт/м². Початкова температура диску θ_0 приймалась рівною 20°C .

При дії теплового імпульсу на матеріал в зоні опромінення на поверхні і в приповерхневій зоні утворюється область великих градієнтів температури, внаслідок чого виникають великі теплові напруження [10-13]. На відміну від випадку опромінення стержня [1,2] за даних умов в диску спостерігаються значні непружні деформації. Після припинення дії теплового імпульсу відбувається поступове вирівнювання температури по об'єму диска. Охолодження супроводжується зміною напружено-деформованого стану, який стабілізується після певного проміжку часу, формуючи зони розтягу та стиску. Непружні деформації стають помітними вже при $t = 0,3 \cdot 10^{-8}$ с. Радіальні компоненти непружної деформації в зоні дії теплового імпульсу є стискаючими, а осьові компоненти – розтягуючі. Максимальних по модулю значень ($\varepsilon_r^p = -0,012$, $\varepsilon_z^p = 0,024$) непружна деформація в центрі зони опромінення досягає в момент припинення дії імпульсу. Після цього протягом приблизно 10^{-8} с непружні

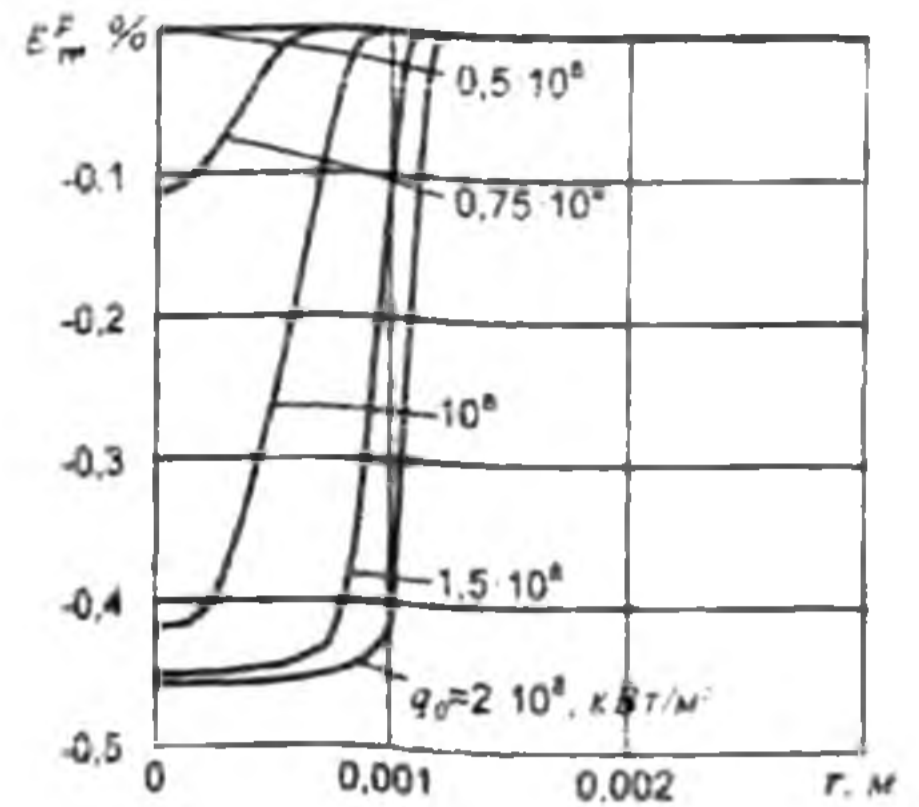


Рис. 1

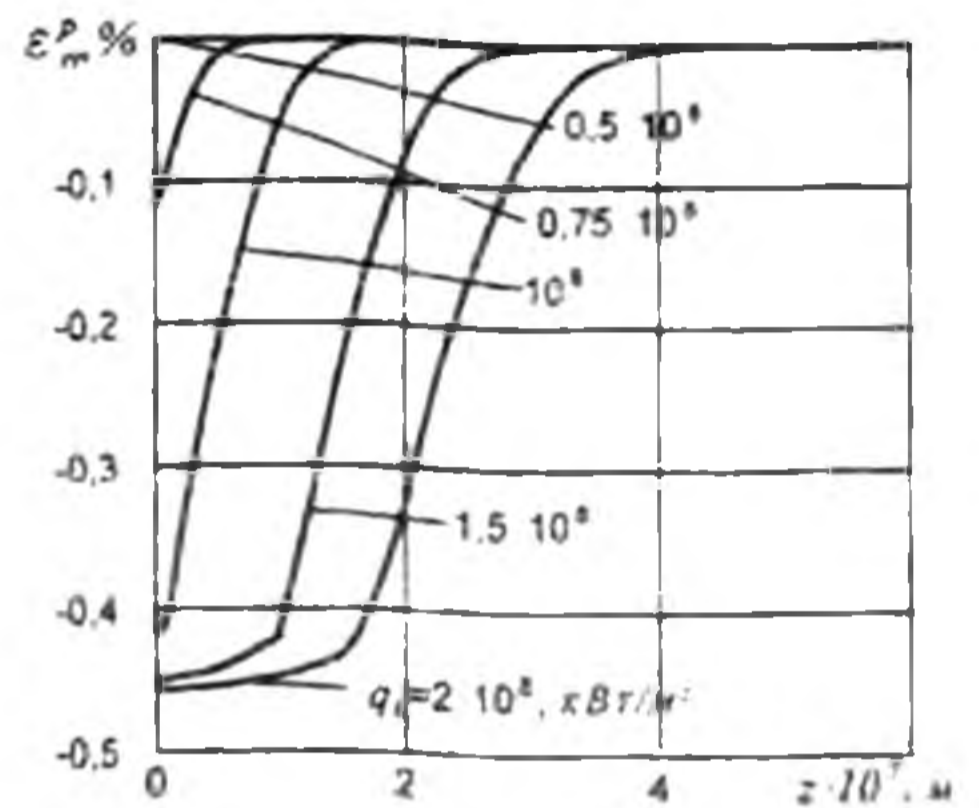


Рис. 2

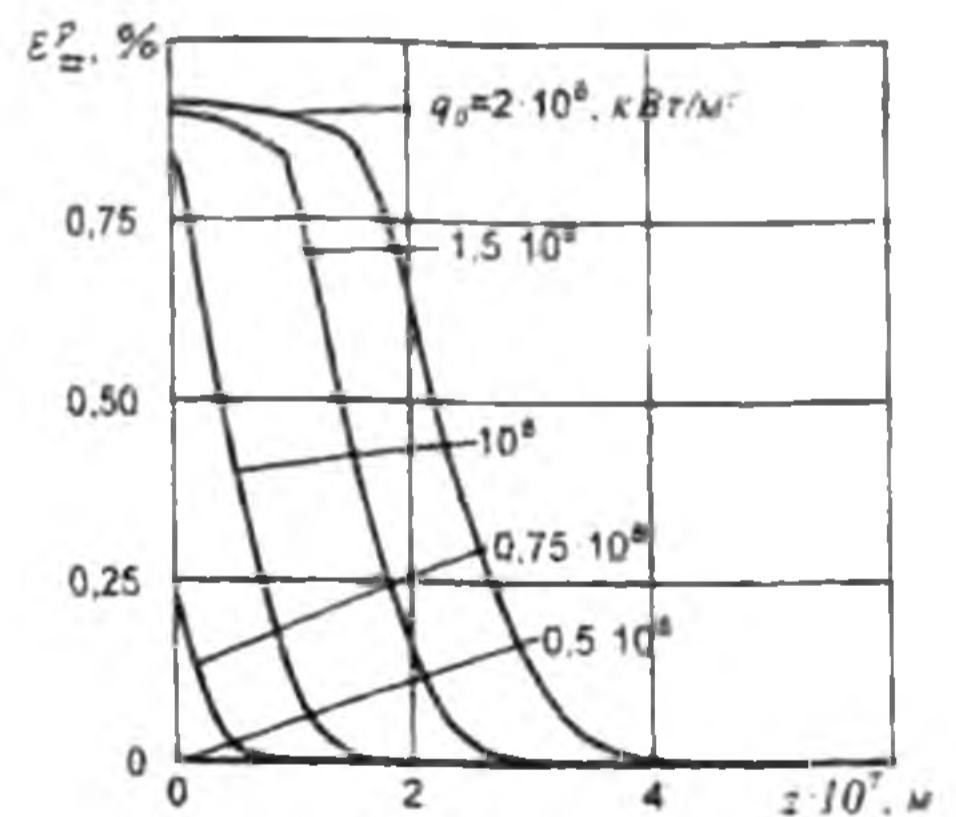


Рис. 3

деформації залишаються постійними. При цьому відбувається процес термопружного розвантаження. При охолодженні виникають вторинні непружні деформації, що призводять до повільного і поступового зменшення по модулю рівня непружних деформацій. Остаточні залишкові непружні деформації в центрі зони опромінення в момент часу $t = 0,4 \cdot 10^{-4}$ с складають $\varepsilon_r^p = -0,0046$, $\varepsilon_z^p = 0,0092$.

Для оцінки зміцнення матеріалу досліджують саме залишкові поля непружної деформації. Розподіли компонент залишкової непружної

деформації ε_r^p вздовж радіуса при $z=0$ і вздовж осі диска при $r=0$, а також ε_z^p вздовж осі диска при $r=0$ для різних значень параметра теплового потоку q_0 представлені на рис. 1, 2, 3 відповідно.

З графіків видно, що збільшення теплового потоку призводить до розширення області впливу імпульсу температури. Вздовж радіуса відбувається спочатку швидке зростання розміру області теплового впливу, потім, при наближенні до розміру радіуса плями зростання суттєво сповільнюється і відбувається її насичення. Така поведінка пояснюється формою імпульсу вздовж координати r . По осі диска відбувається насичення значень компонент непружної деформації, в той час як розмір самої області продовжує зростати практично за лінійним законом. Це обумовлено, перед усім, вузькістю області впливу імпульсу по осі Oz .

Область впливу теплового імпульсу за критерієм непружного деформування являє собою круг радіуса 1,1мм. Це обумовлено просторовою формою імпульсу опромінення. Поле залишкових непружних деформацій не поширюється глибше 0,4мм при вибраних умовах опромінення.

Список використаних джерел

1. Жук Я.А., Сенченков И.К., Бойчук Е.В. Волны напряжений в цилиндре, возбуждаемые термическим импульсом на торце // Акустичний вісник. – 2006. – 9, № 3. – С. 7-16.
2. Жук Я.О., Сенченков И.К., Бойчук О.В. Динамічні процеси в тонкому циліндрі при тепловому опроміненні торця // Доповіді НАН України. – 2007. – № 2. – С. 45-51.
3. Жук Я.А., Сенченков И.К., Козлов В.И., Табиева Г.А. Осесимметричная динамическая связанная задача термовязкопластичности // Прикл. механика – 2001. – 37, №10. – С. 83–89.
4. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / Гольденблат И.И., ред. – М.: Машиностроение, 1965. – 567 с.
5. Сенченков И.К., Жук Я.А. Термомеханический анализ одной модели термовязкопластического деформирования материалов // Прикл. механика. – 1997. – 33, № 2. – С. 41–48.
6. Сенченков И.К., Табиева Г.А. Определение параметров модели Боднера–Партома термовязкопластического деформирования материалов // Прикл. механика. – 1996. – 32, № 2. – С. 64–72.
7. Совершенствование сварных металлических конструкций / Жербин М.М., ред. – Киев: Наук. думка, 1992. – 272 с.
8. Чжань К., Линдхольм У. Неупругая деформация при неизотермическом нагружении // Современ. машиностроение. Сер. Б. – 1990. – № 6. – С. 11–21.
9. Bodner S., Partom Y. Constitutive equations for elastoviscoplastic strain hardening material // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1975. – 42. – P. 385–389.
10. Chen H., Kysar J., Yao Y.L. Characterization of plastic deformation induced by microscale laser shock peening // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 2004. – 71. – P. 713–723.
11. Nikitin B., Scholtes B., Maier H.J., Altenberger I. High temperature fatigue behavior and residual stress stability of laser shock peened and deep rolled austenitic steel AISI 304 // Scripta Mater. – 2004. – 50. – P. 1345–1350.
12. Ocana J.L., Morales M., Molpeceres C., Torres J. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments // Applied Surface Science. – 2004. – 238. – P. 242–248.
13. Qin Y., Zou J., Dong C. Temperature–stress fields and related phenomena induced by a high current pulsed electron beam // Nuclear Instrum. Meth. Phys. Research. Part B. – 2004. – 225. – P. 544–554.
14. Senchenkov I.K., Andrushko N.F. Thermo-mechanical coupling effects in materially nonlinear disk under impulsive radial loading // Int. Appl. Mech. – 2006. – 42. – P. 951–959.
15. Valette S., Audouard E., Le Harzic R., Huot N., Laporte P., Fortunier R. Heat affected zone in aluminum single crystals submitted to femtosecond laser irradiations // Appl. Surf. Science. – 2005. – 239. – P. 381–386.

Надійшла до редакції 18.05.2007