

УДК 539.3

ЗВ'ЯЗАНІ ТЕРМОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ ЗБУДЖЕННЯ ХВИЛІ
НАПРУЖЕНЬ В ТОНКОМУ ЦИЛІНДРІ ТЕПЛОВИМ ІМПУЛЬСОМ НА ТОРЦІ

Я. О. Жук¹, І. К. Сенченков¹, О. В. Бойчук², В. М. Січко²

¹Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

²Миколаївський державний університет ім. В.О. Сухомлинського

Опромінення поверхні деталей короткими лазерними імпульсами або електронними променями застосовується в сучасному виробництві з метою підвищення міцності, запобігання зношенню і покращення експлуатаційних характеристик виробів [1,2]. При цьому на поверхні і в тонкому приповерхневому шарі створюється зона із надзвичайно високою густиною енергії. Це приводить до швидкого розігріву (і наступного поступового охолодження) з великими градієнтами температури, що є причиною виникнення фронту ударної хвилі і теплових напружень. В даній статті досліджується зв'язана термомеханічна поведінка матеріалу в околі дії теплового імпульсу, розповсюдження хвилі напружень вздовж тонкого довгого циліндру і зміни температури, які його супроводжують, а також зв'язок між параметрами імпульсу і хвилі.

Постановка і метод розв'язання задачі. Розглядається круговий циліндр радіусу R і довжини L . Досліджується модельна задача для випадку $R \ll L$ (стержень). Торець циліндра $z = 0$ перебуває під дією одноразового теплового імпульсу, який задається тепловим потоком через торець

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial z} = \begin{cases} q_0 \sin(\pi t / t_p), & 0 \leq t \leq t_p, \\ 0, & t > t_p, \end{cases} \quad z = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \vec{n}} = 0, \quad z = L, \quad r = R \quad (1)$$

де θ – температура; k – коефіцієнт теплопровідності; t_p – час дії імпульсу; q_0 – параметр імпульсу. Вся інша поверхня диску вважається теплоізолюваною і вільною від напружень

$$\sigma_{ij} = 0 \text{ на } S. \quad (2)$$

Початкові умови мають вигляд

$$u_r = \dot{u}_r = 0; \quad u_z = \dot{u}_z = 0; \quad \theta = \theta_0, \quad t = 0, \quad (3)$$

де u_r, u_z переміщення, а θ_0 – початкова температура.

Постановка осесиметричної зв'язаної задачі містить співвідношення Коші (4), рівнянь руху (5), рівняння балансу енергії (6)

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\varphi) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = \rho \ddot{u}_r, \quad \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \rho \ddot{u}_z \quad (5)$$

$$c_v \dot{\theta} + 3\alpha \theta K_V (\dot{\varepsilon}_{kk} - 3\alpha \dot{\theta}) - D' - k\Delta \theta = r_s, \quad (6)$$

де ε_r , ε_z , ε_{rz} і ε_φ – компоненти тензора деформації σ_r , σ_z , σ_{rz} і σ_φ – компоненти тензора напружень; α і c_v – коефіцієнти лінійного теплового розширення і теплоємності при сталому об'ємі; K_V – об'ємний модуль матеріалу; r_s – потужність заданих внутрішніх джерел тепла; D' – швидкість дисипації механічної енергії; $\dot{\varepsilon}_{kk} = \dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_\varphi$; $\Delta = \partial^2(\cdot)/\partial r^2 + \partial(\cdot)/r\partial z^2$.

Для описання фізично нелінійної поведінки матеріалу диска і конкретизації вигляду дисипативної функції використовується узагальнена термодинамічно узгоджена теорія, розвинута на основі моделі Боднера–Партома [3,4]. Вона складається з наступних рівнянь

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^\theta, \quad ij \leftrightarrow r, z, rz, \varphi, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ij}^\theta = \delta_{ij} \int_{\theta_0}^{\theta} \alpha(\theta') d\theta', \quad (8)$$

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - \varepsilon_{ij}^p), \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^\theta), \quad (9)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda s_{ij}, \quad \dot{\varepsilon}_{kk}^p = 0, \quad (10)$$

$$D_2^p = D_0^2 \exp\left[-(Z^2/3J_2)^n\right], \quad Z = K + D, \quad (11)$$

$$\dot{K} = m_1(K_1 - K)\dot{W}_p, \quad K(0) = K_0, \quad (12)$$

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

$D_2^p = \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p / 2$, $J_2 = s_{ij} s_{ij} / 2$, $\lambda^2 = D_2^p / J_2$, $D = \beta_{ij} u_{ij}$, $u_{ij} = \sigma_{ij} / (\sigma_{ij} \sigma_{ij})^{1/2}$, $\dot{W}_p = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p$, де s_{ij} і e_{ij} – девіатори тензорів напруження і деформації відповідно; G – модуль зсуву. Величини D_0 , D_1 , K_0 , K_1 , m_1 , m_2 і n є константами моделі [3,4]. В роботі приймається $D' = \dot{W}_p$. Рівняння, граничні і початкові умови (1)–(14) 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 застосовується скінченноелементний підхід, розвинутий в статті [5] для розв'язання осесиметричних задач про зв'язану термомеханічну поведінку фізично нелінійних матеріалів.

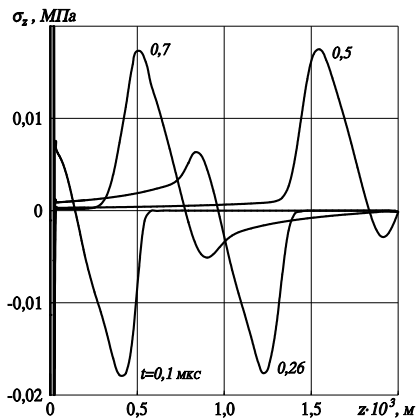


Рис. 1

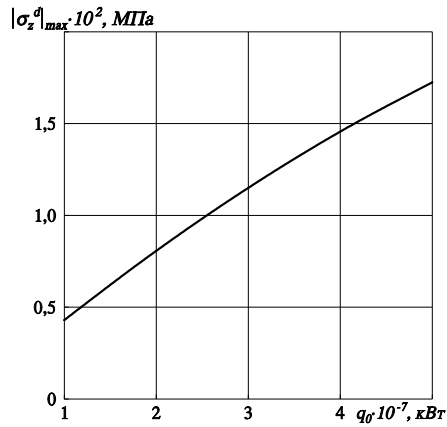


Рис. 2

Результати розрахунків. Сталь 35ХМА вибрано як матеріал циліндру. На рис. 1 представлено результати, які ілюструють проходження і відбиття імпульсу напруження, що виникає при дії теплового імпульсу з параметрами $q_0=5 \cdot 10^7$ кВт і $t_p=0,1$ мкс. Збільшення параметру q_0 призводить до збільшення максимального стискаючого напруження в імпульсі. Ця залежність представлена на рис. 2. Вона має практично лінійний характер. Встановлено також, що максимальне значення стиску досягається приблизно при $t \approx t_p/5$, коли максимальна температура нагріву ще не досягнута. Вся інша тепла енергія йде на формування заднього фронту імпульсу і поля квазістатичних напружень в приповерхневій зоні.

Література

1. Qin Y., Zou J., Dong C. et al. Temperature-stress fields and related phenomena induced by a high current pulsed electron beam // Nuclear Instrum. & Meth. In Phys. Research. Part B. 2004. V. 225. P. 544-554.
2. Коваленко В.С. Микро- и нанообработка сверхмощными лазерными импульсами // Оборудование и эксперимент для профессионалов. 2003. №4. С. 4-14.
3. Bodner S., Partom Y. Constitutive equations for elastoviscoplastic strain hardening material // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1975. Vol. 42. P. 385–389.
4. Сенченков И.К., Жук Я.А. Термомеханический анализ одной модели термовязкопластического деформирования материалов // Прикл. механика. 1997. Т. 33, № 2. С. 41-48.
5. Жук Я.А., Сенченков И.К., Козлов В.И., Табиева Г.А. Осесимметричная динамическая связанная задача термовязкопластичности // Прикл. механика. 2001. Т. 37, №10. С. 83–89.