

УДК 539.3

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/2.32>

Яковенко Н.Д.¹, к.ф.-м.н.
Якименко С.М.², к.ф.-м.н.

¹Yakovenko N.D., Cand. Sci. (Phys.-Math.),
²Yakymenko S.M., Cand. Sci. (Phys.-Math.)

Дослідження напружено-деформованого стану циліндра з мікроструктурними перетвореннями за умов імпульсного навантаження

Investigation of the stress-strain state of a cylinder with microstructural transformations under pulse loading

¹Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, 03057, м. Київ, Україна, вул. Нестерова, 3, e-mail: ndoksenchuk@gmail.com

¹S. P. Timoshenko Institute of mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine, 03057, Kyiv, Ukraine, 3, Nesterova e-mail: ndoksenchuk@gmail.com

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Університетський проспект, 8, Україна, e-mail: yasm@i.ua

²Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006, Prospekt Universytetskyi, 8, e-mail: yasm@i.ua

Розглядається осесиметрична задача про імпульсне термомеханічне навантаження сталевого циліндра. Враховуються об'ємні деформації, які супроводжують мікроструктурні перетворення мартенситного типу при охолодженні тіл, а також залежність непружних характеристик матеріалу від фазового складу. Термомеханічна поведінка ізотропного матеріалу описується моделлю течії Боднера-Партома. Задача розв'язується чисельно методом покрокового неявного інтегрування за часом, ітераційним методом та методом скінченних елементів. За допомогою чисельного моделювання проводиться дослідження напружено-деформованого стану за умов врахування залежності параметрів моделі від мікроструктури матеріалу. Встановлено, що мікроструктурні перетворення суттєво зменшують залишкові деформації та сприяють появі стискальних напружень. Отримані результати можуть бути використані в інженерних розрахунках на міцність елементів конструкцій, а також параметрів технологій поверхневого зміцнення.

Ключові слова: імпульсне навантаження, модель течії, мікроструктурні перетворення

Axisymmetric dynamic problem of thermomechanical loading of a steel cylinder is considered. Volume strain caused by the microstructural transformations of the martensitic type under cooling solids as well as into consideration and dependence inelastic characteristics of material for multiphase state are taken. The thermomechanical nonlinear behavior of an isotropic material is described by unified flow model generalized for the case of multiphase material state. The problem is solved numerically by the implicit step-by-step time integration method, by the iterative method and by the finite element method. The investigation of the stress-strain state of an inelastic material with regard for the dependence of parameters of the flow model on the phase composition of a material is carried out by using of numerical simulation. We established that microstructural transformations significantly reduce residual inelastic strain and promote the appearance of compressive stresses. The results obtained in the work can be used in calculations of parameters of surface hardening technologies.

Key words: pulse loading, model of flow, microstructural transformations

Статтю представив член-кореспондент НАН України, д.ф.-м.н., проф. Жук Я.О.

Вступ

Чисельне моделювання динамічних термомеханічних процесів у циліндричних непружних тілах з мікроструктурними перетвореннями (далі МСП) за умов імпульсного опромінення є досить вагомим під час

проектування елементів конструкцій та викликає значний теоретичний і практичний інтерес для аналізу та оцінки міцності деталей [1]. Врахування МСП важливе для сталей, в яких відбувається найбільш суттєві зміни вільних об'ємів та непружних характеристик.

У даній роботі за допомогою скінченно-елементної методики досліджується залишковий напружено-деформівний стан за умов термо-механічного імпульсного навантаження циліндра з мікроструктурними перетвореннями.

Постановка задачі

Розглядається динамічна осесиметрична зв'язана задача термомеханіки для кругового циліндра. В циліндричній системі координат $Orz\varphi$ геометричні розміри задаються наступним чином: $0 < z < L$, $0 < r < R$. За умов термомеханічного навантаження на тіло одночасно діють термічне і механічне навантаження, що супроводжуються взаємодією парціальних термомеханічних процесів.

Постановка задачі включає – рівняння Коші

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}, \varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \\ \varepsilon_{rz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

– рівняння руху

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} &= \rho \ddot{u}_{rr}, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \ddot{u}_{zz}. \end{aligned} \quad (2)$$

В рівняннях (1) – (2) прийнято наступні позначення: u_r і u_z – компоненти вектора переміщень; ε_{rr} , ε_{zz} , ε_{rz} і $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ – компоненти тензора деформації; σ_{rr} , σ_{zz} , σ_{rz} і $\sigma_{\varphi\varphi}$ – компоненти тензора напружень; ρ – густина матеріалу.

Також до постановки задачі входить рівняння теплопровідності, яке має вид

$$\begin{aligned} c_V \dot{\theta} + 3\alpha\theta K_V (\dot{\varepsilon}_{kk} - 3\alpha\dot{\theta}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) - \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - D' = r_s. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут θ – температура; α , c_V і k – коефіцієнти лінійного теплового розширення, теплоємності при сталому об'ємі і теплопровідності відповідно; K_V – модуль об'ємного стиску; $\dot{\varepsilon}_{kk} = \dot{\varepsilon}_{rr} + \dot{\varepsilon}_{zz} + \dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi}$; D' – швидкість дисипації; θ – абсолютна температура; c_V , k – об'ємна теплоємність та коефіцієнт теплопровідності; r_s – потужність заданих внутрішніх джерел тепла.

У рівнянні теплопровідності (3) третій доданок визначає ефект зміни об'єму,

зумовлений змінами температури та фазового складу матеріалу, четвертий доданок – ефект прихованої теплоти, а п'ятий – швидкість дисипації механічної енергії.

Початкові умови задачі наступні

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

Граничні умови на торці $z = 0$ мають вид

$$q = \begin{cases} q_0 \sin \frac{\pi}{t_q} t, & t \leq t_q, \\ 0, & t > t_q, \end{cases}$$

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} -p_0 \sin \frac{\pi}{t_\sigma} t, & t \leq t_\sigma, \\ 0, & t > t_\sigma, \end{cases}$$

де θ_0 – початкова температура; q_0 і p_0 – задані параметри теплового та механічного навантаження відповідно; t_q , t_σ – часові параметри навантаження – терміни дії імпульсів, між якими приймається співвідношення $t_\sigma = 2t_q$. Вся інша поверхня циліндра вважається теплоізолюваною і вільною від навантажень.

Для моделювання нелінійної термомеханічної поведінки при швидкісному деформуванні ізотропного матеріалу в статті використана модель течії Боднера–Партома, узагальнена на випадок багатофазового складу матеріалу. Для врахування впливу поточного фазового складу на непружні характеристики для визначення коефіцієнтів моделі течії, що відповідають за границю текучості та тимчасовий опір матеріалу, було використано лінійне правило сумішей. Основні рівняння моделі Боднера – Партома представлено в роботі [2].

Мікроструктурні перетворення враховуються через зміни об'єму та залежність границі текучості і тимчасового опору від фазового складу матеріалу.

Зміна об'єму матеріалу визначається під час фазових перетворень термотрансформаційною деформацією ε_{ij}^{0ph} [3]

$$\varepsilon_{ij}^{0ph}(\theta, \theta_r, C^\xi) = \frac{V^\xi(\theta) C^\xi(\theta) - V^\xi(\theta_r) C^\xi(\theta_r)}{3V^\xi(\theta_r) C^\xi(\theta_r)} \delta_{ij}.$$

Тут C^ξ – концентрація фази ξ , θ – поточна температура; $V^\xi(\theta)$ – питомий об'єм фази ξ для температури θ .

Метод розв'язування

Задача, що розглядається, є нелінійною та розв'язується чисельно методом покровоного

інтегрування за часом, ітераційного методу та методу скінченних елементів. Алгоритм розв'язування задачі викладено в роботі [4].

Результати розрахунків

Розрахунки проводились за наступних параметрів: $L = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $R = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Параметр теплового навантаження дорівнює $q_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ кВт/м}^2$, а параметр механічного навантаження – $p_0 = 1 \text{ ГПа}$. Тривалість теплового та механічного імпульсів відповідно рівна $t = 10^{-7} \text{ с}$ та $t = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$. За час формування залишкового стану приймається $t = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$. Початкова температура циліндра θ_0 дорівнює 20°C . Початкова структура сталі наступна: $C^a = 0$, $C^b = 0,79$, $C^{f,p} = 0,11$, $C^m = 0,10$, де a – аустеніт, b – бейніт, f – ферит, p – перліт, m – мартенсит. Має місце швидкий розігрів (до 1300°C).

На рис. 1 зображені залишкові просторові розподіли інтенсивності непружної деформації e_i^{in} , максимальне значення якої у смузі $r \leq 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $z \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ за умов комбінованого термомеханічного навантаження дорівнює $e_{i \text{ max}}^{in} = 0,06$.

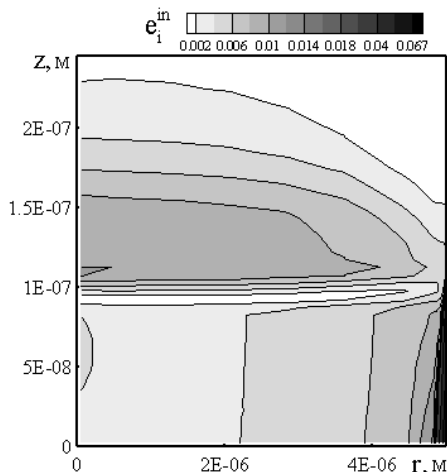


Рис. 1 Залишкові просторові розподіли

інтенсивності непружної деформації e_i^{in} за умов комбінованого термомеханічного навантаження

Для порівняння на рис. 2 наведено аналогічні розподіли лише за умов імпульсного термічного навантаження. Видно, що в тій же смузі інтенсивність непружної деформації значно менша $e_{i \text{ max}}^{in} = 0,01$. Це пояснюється тим, що за комбінованого термомеханічного навантаження

приторцева область циліндра суттєво змінюється за рахунок механічного навантаження в умовах її розігріву термічним імпульсом.

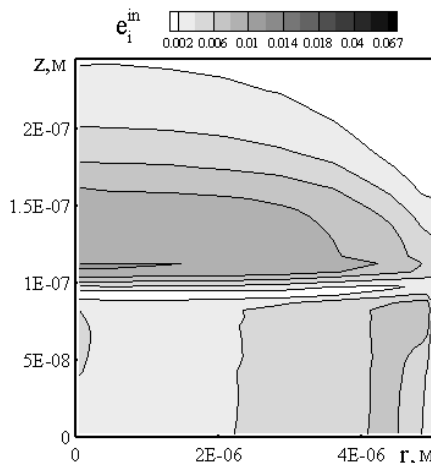


Рис. 2 Залишкові просторові розподіли інтенсивності непружної деформації за умов термічного навантаження

На рис. 3 та рис. 4 ілюструються відповідно залишкові осьові розподіли компоненти радіальних напружень σ_{rr} та інтенсивності непружної деформації e_i^{in} . Тут суцільна лінія –

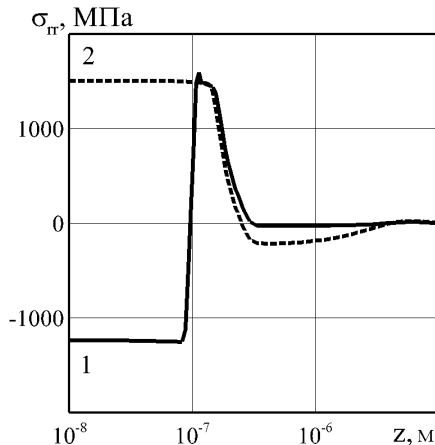


Рис. 3 Залишкові осьові розподіли компоненти радіальних напружень σ_{rr} за умов комбінованого термомеханічного навантаження

розрахунок із врахуванням залежності непружних характеристик від фазового складу матеріалу, штрихова лінія – розрахунок без врахування мікроструктурних перетворень.

Порівняння штрихової і суцільної кривих свідчить про те, що врахування МСП істотно впливає на рівень і знак напружень, але не впливає на товщину мартенситного шару, який визначається термічними факторами.

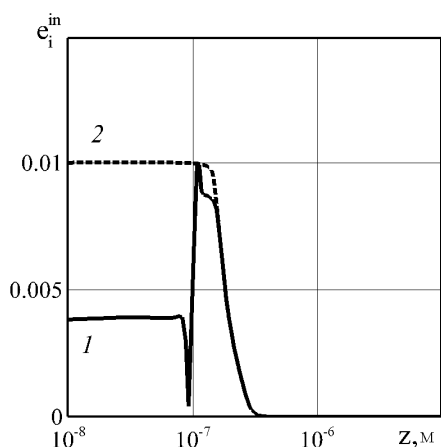


Рис. 4 Залишкові осеві розподіли інтенсивності
непружної деформації e_i^{in} за умов
термомеханічного навантаження

На рисунках 3 та 4 бачимо, що рівень
залишкових радіальних напружень та
інтенсивність neprужної деформації за умов
врахування МСП становить відповідно

$\sigma_{rr} = -1440 \text{ МПа}$, $e_i^{in} \approx 0,003$, а без врахування
МСП – $\sigma_{rr} = 1500 \text{ МПа}$, $e_i^{in} \approx 0,01$.

Трансформація напружень із розтягувальних в
стискальні пояснюється тим, що у фазі
мартенситу сталь має більший питомий об'єм
ніж у інших фазах [3]. Також на зміну знаку
залишкових напружень впливає врахування
залежності параметрів моделі, що відповідають
за neprужні характеристики, від фазового складу
матеріалу. Даний ефект носить не лише
кількісний, але і якісний характер: поява
залишкових стискальних напружень сприяє
поверхневому зміцненню матеріалу.

Параметричний аналіз розв'язку задачі
дозволяє управляти залишковими напруженнями
та мікроструктурою за допомогою вибору
тривалості імпульсу та парціальними вкладками
механічного та теплового потоку в ньому.
Результати роботи можуть бути використані в
інженерних розрахунках на міцність елементів
конструкцій, деталей машин та механізмів, а
також формування елементів конструкцій.

Список використаних джерел

1. Yilbas B. S. Laser-shock processing of steels [Електронний ресурс] / B. S. Yilbas, S. Z. Shuja, A. Arif, M. A. Gondal // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 135. – P. 6–17. – Режим доступу до журн.: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00813-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00813-0)
2. Senchenkov I. K. Modeling of a nonisothermal flow with regard for the dependence of plastic properties on the microstructure of a material [Електронний ресурс] / I. K. Senchenkov, N. D. Oksenchuk // J. Math. Sci. – 2013. – V. 190, N 6. – P. 796–803. – Режим доступу до журн.: <https://doi.org/10.1007/s10958-013-1289-6>
3. Leblond J. B. A theoretical and numerical approach to the plastic behavior of steel during phase transformation. – I. Derivation of general relations [Електронний ресурс] / J. B. Leblond, G. Mottet, J. C. Devaux // J. Mech. Phys. Solids. – 1986. – Vol. 34, № 4. – P. 395–409. – Режим дост. до журн.: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(86\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0022-5096(86)90009-8)
4. Zhuk Y.A. Axisymmetric dynamic problem of coupled thermoviscoplasticity [Електрон. ресурс] / Y.A. Zhuk, I.K. Senchenkov, V.I. Kozlov, G. A. Tabieva // Int. Appl. Mech. – 2001. 37, No.10. – P. 1311–1317. – Режим доступу до журн.: <https://doi.org/10.1023/A:1013976219144>

References

1. YILBAS, B. S., SHUJA, S. Z., ARIF, A., GONDAL, M. A. (2003). Laser-shock processing of steels. *J. Mater. Process. Technol.* [Online] 135. p. 6–17. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00813-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00813-0)
2. SENCHENKOV, I. K., OKSENCHUK, N. D. (2013) Modeling of a nonisothermal flow with regard for the dependence of plastic properties on the microstructure of a material. *J. Math. Sci.* [Online] 190 (6). p. 796-803. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10958-013-1289-6>
3. LEBLOND, J. B., MOTTET, G., DEVAUX, J. C. (1986). A theoretical and numerical approach to the plastic behavior of steel during phase transformation. – I. Derivation of general relations. *J. Mech. Phys. Solids.* [Online] 34 (4). p. 395–409. Available from: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(86\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0022-5096(86)90009-8)
4. ZHUK, Y. A., SENCHENKOV, I. K., KOZLOV, V. I., TABIEVA, G. A. (2001). Axisymmetric dynamic problem of coupled thermoviscoplasticity. *International Applied Mechanics.* [Online] 37 (10). p. 1311–1317. Available from: <https://doi.org/10.1023/A:1013976219144>

Надійшла до редколегії 11.08.2023