

¹И. К. Сенченков, д-р физ.-мат. наук, старш. науч. сотруд.,
¹О. П. Червинко, канд. физ.-мат. наук, старш. науч. сотруд.,
²Е. В. Бойчук, канд. физ.-мат. наук, ст. преп.,
³Л. С. Братица, доц.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

¹Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины
²Николаевский государственный университет им. В.А.Сухомлинского
³Национальный авиационный университет

Рассмотрена динамическая задача термомеханики неупругого полупространства под действием нагружения наносекундными импульсами теплового потока и давления. Механическое поведение материала описывается моделью течения Боднера–Партома. Численно исследованы волновые процессы и остаточное напряженно-деформированное состояние.

Введение. В настоящее время интенсивно развиваются технологии поверхностного упрочнения деталей с использованием мощных короткоимпульсных ($\sim 10^{-7} \dots \sim 10^{-9}$ с) с целью повышения износостойкости и усталостной прочности поверхности детали [1–3]. С механической точки зрения воздействие лазерного импульса на поверхность тела может моделироваться совместным действием импульсов давления и теплового потока в рамках динамической задачи термомеханики [4]. Определяющим является процесс формирования остаточных напряжений и поверхностного наклепа при прохождении упругопластических волн.

Обзор экспериментально-теоретических исследований и методов математического моделирования таких процессов дан в работах [1–3]. Однако в этих работах при математическом моделировании не учитываются в комплексе такие факторы, как физическая нелинейность, зависимость физико-механических характеристик материала от температуры, взаимодействие термических и механических импульсов, термомеханическая связанность и т.п. В на-

стоящей статье с учетом указанных выше факторов разработана методика расчета и проведена численное моделирование процессов в цилиндрических деталях в осесимметричной постановке

Постановка и решение задачи. Постановка задачи включает в себя кинематические уравнения связи перемещений и деформаций:

$$\varepsilon_{zz} = \partial u_z / \partial z, \quad \varepsilon_{rr} = \partial u_r / \partial r, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = u_r / r, \quad \varepsilon_{rz} = (\partial u_z / \partial r + \partial u_r / \partial z) / 2;$$

уравнения движения

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

уравнение теплопроводности

$$c_V \dot{\theta} + 3\alpha T K_V \dot{\varepsilon}_{kk} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = 0,$$

где u_i , ε_{ij} , σ_{ij} – компоненты вектора перемещения и тензоров деформации и напряжений ($i, j = r, z, \varphi$); θ – температура ($T = 273^\circ C + \theta$); ρ – плотность; c_V , k и α – коэффициенты объемной теплоемкости, теплопроводности и линейного термического расширения; K_V – коэффициент объемного сжатия; $\dot{\theta} = \partial \theta / \partial t$.

Поведение материала описывается унифицированной моделью Боднера–Партома [5], модифицированной для случая быстрого нагрева. Рассматриваются процессы скоростного деформирования.

Соотношения модели включают уравнения адитивности деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p;$$

уравнения закона Гука

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - e_{ij}^p), \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \alpha(\theta - \theta_0)),$$

уравнения закона течения Прандтля-Рейсса с условиями текучести Мизеса и пластической несжимаемости

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{K_0 + K_1}{\sqrt{3} J_2} \right) \right]^{2n} \frac{s_{ij}}{\sqrt{J_2}}, \quad \varepsilon_{ij}^p(0) = 0, \quad \varepsilon_{kk}^p = 0;$$

уравнения эволюции для параметра изотропного упрочнения

$$\dot{K} = m_1(K_1 - K)\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^p, \quad K(0) = 0,$$

где $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{kk} \delta_{ij} / 3$; $\sigma_{kk} = \sigma_{rr} + \sigma_{zz} + \sigma_{\varphi\varphi}$; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{kk} \delta_{ij} / 3$;
 $J_2 = s_{ij} s_{ij} / 2$; D_0, K_0, K_1, m_1, n – параметры модели.

Начальные условия для задач динамики и теплопроводности имеют вид $u_i(\bar{x}) = 0, \dot{u}_i(\bar{x}) = 0, \theta = \theta_0$ при $t = 0$.

Расчеты проводились для полупространства $z > 0, 0 < r < \infty$, на поверхности $z = 0$ которого действуют наносекундные импульсы теплового потока и давления. Граничные условия имеют вид

$$\sigma_{zz} = -p_0 \sin \frac{\pi}{t_\sigma} t \text{ при } t \leq t_\sigma; \quad \sigma_{zz} = 0 \text{ при } t > t_\sigma; \quad \sigma_{rz} = 0; \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial z} = q_0 \sin \frac{\pi}{t_q} t \text{ при } t \leq t_q; \quad -k \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \text{ при } t > t_q, \quad (2)$$

где q_0 и p_0 – заданные параметры нагружения; t_σ и t_q – длительности импульсов, принимается $t_\sigma = 2t_q$.

В классической работе [6] показано, что отличной от нуля является лишь компонента $u_z = u_z(z, t)$ и $\theta = \theta(z, t)$. Легко установить, что задача для полупространства эквивалентна задаче для тонкого стержня $0 < r < R, z > 0$, на боковой поверхности которого ставятся условия гладкого контакта и теплоизоляции

$$u_r = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad \partial \theta / \partial r = 0, \quad r = R, \quad z > 0,$$

а на торце $z = 0$ – условия (1), (2).

Задача решается методом конечных элементов в сочетании с методами Ньюмарка и Эйлера интегрирования по времени и итерационных методов решения нелинейных задач на каждом временном шаге [4; 7].

Описание и анализ результатов численных исследований.

При проведении расчетов параметры модели течения были конкретизированы для стали 35ХМА на основе экспериментальных данных [8] в интервале температур $20^\circ C < \theta < 1000^\circ C$ и скоростей $5 \cdot 10^{-4} c^{-1} < \dot{\varepsilon} < 4 \cdot 10^4 c^{-1}$. Расчеты проводились для стержня $R = 10^{-6} м$ и длиной до $z < 5 \cdot 10^{-2} м$.

Для исследования парциальных влияний теплового и механического нагружений были рассмотрены следующие задачи: задача 1 отвечает чисто термическому нагружению $q_0 \neq 0, p_0 = 0$, за-

дача 2 – чисто механическому нагружению $q_0 = 0$, $p_0 \neq 0$; задача 3 – термомеханическому нагружению $q_0 \neq 0$, $p_0 \neq 0$. В расчетах принималось $q_0 = 2 \cdot 10^{11} \text{ квт/м}^2$, $p_0 = 8 \text{ ГПа}$, $t_2 = 10^{-8} \text{ с}$. Для интерпретации результатов использовались интенсивности

$$s_i = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}, \quad e_i = (e_{ij}e_{ij}/2)^{1/2}, \quad e_i^p = (e_{ij}^p e_{ij}^p / 2)^{1/2}.$$

Расчеты для задачи 1 показали, что напряжения в волнах на несколько порядков ниже по сравнению с остаточными напряжениями, которые формируются при остывании вблизи поверхности $z = 0$. Эти напряжения локализованы в слое $0 < z \leq 10^{-6} \text{ м}$, являются растягивающими и по уровню близки к динамическому пределу текучести, который примерно в 2 раза выше статического.

Динамический процесс в задаче 2 иллюстрируется кинетикой распространения упруго-пластической волны сжатия для компоненты σ_{rr} (рис. 1) и формирования остаточного напряженного состояния (рис. 2). Последнее ассоциируется с напряжениями, остающимися после прохождения волны.

Для задачи 3 распределения остаточных напряжений и неупругих деформаций показаны на рис. 3 и 4 сплошными линиями. Для сравнения пунктирной и штриховой линиями показаны соответствующие распределения для задач 1 и 2.

Отметим следующие особенности приведенных результатов. Остаточное напряженно-деформированное состояние имеет двухмасштабную структуру. В поверхностном слое $0 < z < 10^{-6} \text{ м}$ состояние определяется конкуренцией процессов, инициированных тепловой и механической составляющими нагружения. В результате взаимного подавления уровень напряжений относительно низкий: $s_i \leq 200 \text{ МПа}$, $e_i^p \leq 0,4\%$. Далее в глубине тела формируется почти на три порядка большая область сжимающих напряжений $10^{-6} \leq z \leq 10^{-3} \text{ м}$, определяемая импульсом сжатия. Уровень напряжений отвечает динамическому пределу текучести $s_i \approx 1000 \text{ МПа}$ и пластической деформации $e_i^p \approx 0,9\%$. Напряжения в этой области сжимающие, что благоприятно с точки зрения поверхностной прочности и формирования таких остаточных состояний, является целью современных ударных лазерных технологий.

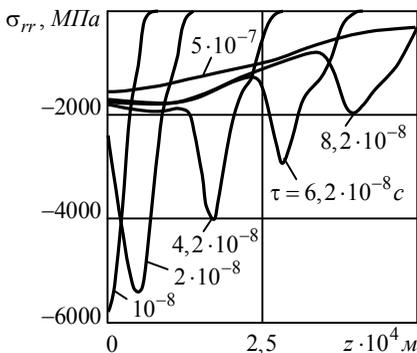


Рис 1. Кинетика распространения пластической волны

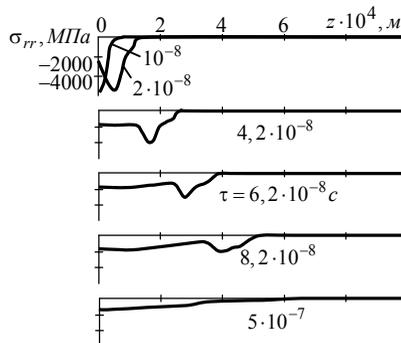


Рис 2. Формирования остаточных напряжений

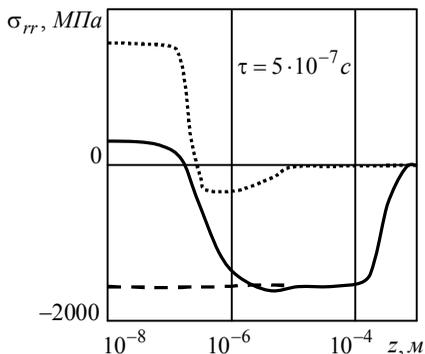


Рис 3. Остаточные напряжения

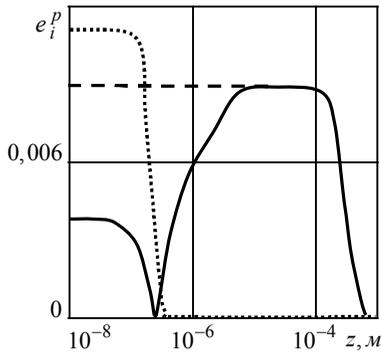


Рис 4. Остаточные деформации

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [3].

Вывод. На основе разработанной модели и приведенных расчетов установлены масштабы толщин поверхностного слоя стальных деталей, упрочненных термическим импульсом и волной давления при ударном лазерном наклепе.

Список литературы

1. *Chen H.* Characterization of plastic deformation induced by micro-scale laser shock peening / H. Chen, J. Kysar and Y. L. Yao // ASME. J. Appl. Mech. – 2004. – Vol. 71. – P. 713–723.
2. *Yilbas B. S.* Laser pulse heating and flexural wave generation during treatment of metallic surfaces / B. S. Yilbas, S. J. Hyder // J. Mater. Proc. Tech. – 2003. – Vol. 141. – P. 1–8.

3. *Yilbas B.S.* Laser-shock processing of steel / B. S. Yilbas, S. Z. Shuja A. Arif, M. A. Ciondal // *J. of Mater. Proces. Technol.* – 2003. – 135, N 1. – P. 6-17.

4. *Бойчук Е. В.* Волны напряжений в цилиндре, возбуждаемые термическим импульсом на торце / Е. В. Бойчук, Я. А. Жук, И. К. Сенченков // *Акустичний вісник.* – 2006. – Т. 9, № 3. – С. 7–15.

5. *Bodner S.* Constitutive equations for elastoviscoplastic strain hardening material / S. Bodner, Y. Partom // *ASME. J. Appl. Mech.* – 1975. – Vol. 42. – P. 385–389.

6. *Даниловская В. И.* Об одной задаче термоупругости / В. И. Даниловская // *Прикладная математика и механика.* – 1952. – Т. 16, № 3. – С. 341–344.

7. *Мотовиловец И. А.* Термоупругость / И. А. Мотовиловец, В. И. Козлов – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с. – (Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5-ти т.; Т. 1)

8. *Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур* / Н. И. Безухов, И. И. Бажанов, И. И. Гольденблат и др. – М.: Машиностроение, 1965. – 568 с.

Сенченков І.К., Червінко О.П., Бойчук О.В., Братица Л.С. **Числове моделювання поверхневого зміцнення пружнопластичних тіл при імпульсно-термомеханічного навантаження** // *Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб.* – К: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 54– С.199–204.

Розглянуто динамічну задачу термомеханіки непружного півпростору під дією навантаження наносекундними імпульсами теплового потоку і тиску. Механічна поведінка матеріалу описується моделлю течії Боднера–Партома. Чисельно досліджено хвильові процеси і залишковий напружено-деформований стан.

Рис. 4, список літ: 8 найм.

Numerical modeling of surface strengthening of elastoplastic bodies under impulse thermomechanical loading. Dynamical problem of thermomechanics for half space under nanosecond impulse of heat flux and pressure loading is numerically investigated within axisymmetrical statement. Unified Bodner-Partom flow theory is used to model deformation of material. Stress wave propagation as well as residual stress-strain state is examined.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2010