

УДК 539.3

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕРМОУПРУГОГО ИМПУЛЬСА ВДОЛЬ ТОНКОГО КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Я.А. Жук, И.К. Сенченков, Е.В. Бойчук

*Институт механики НАМ Украины, г. Киев
Николаевский государственный университет*

Рассматривается комплекс вопросов, связанных с образованием и распространением волн напряжений в теле, подверженном воздействию кратковременного теплового импульса. Решается модельная задача об облучении торца тонкого кругового стального цилиндра (стержня) лазерным импульсом или пучком заряженных частиц. Такие процессы составляют основу технологического метода обработки поверхностей металлических деталей с целью создания областей остаточных сжимающих напряжений в приповерхностной зоне материала, обеспечивающих повышенную прочность, износостойчивость и усталостную долговечность [1, 2]. Особое внимание в данной статье уделяется описанию связанного термомеханического поведения материала в области действия теплового импульса, распространению волн напряжений вдоль тонкого цилиндра и сопровождающих их изменений температуры, оценке параметров импульса, необходимых для генерации волн, и связи между параметрами теплового импульса и волн.

Рассматривается круговой цилиндр радиуса R , длина которого равна L . На торце $z=0$ действует кратковременный тепловой импульс, который задается тепловым потоком через границу. Вся поверхность стержня, включая торцы, считается теплоизолированной и свободной от напряжений. Решается модельная осесимметричная задача для случая $R \ll L$ (длинный тонкий круговой цилиндр, стержень). В такой постановке задача для тонкого цилиндра (стержня) позволяет изучить основные закономерности возбуждения и распространения импульса сжатия вдоль оси цилиндра при воздействии теплового импульса на его торце.

Используется обобщенная термомеханическая модель Боднера-Партома, описывающая как упругое, так и неупругое поведение материала при больших скоростях деформации [3].

Постановка задачи также включает соотношения Коши для осесимметричного случая; уравнения движения (1); уравнение теплопроводности (2);

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

$$c_v \dot{\theta} + 3\alpha\theta K_V (\dot{\varepsilon}_{kk} - 3\alpha\dot{\theta}) - D' - k\Delta\theta = r_s, \quad (2)$$

где ε_{ij} , и σ_{ij} , $i, j \leftrightarrow r, z, \varphi$ - компоненты тензоров деформации и напряжения; ρ - плотность материала; θ - температура; c_v и k - коэффициенты

объемной теплоемкости и теплопроводности соответственно; K_V – модуль объемного сжатия; D' – скорость диссипации механической энергии и r_s – внутренние источники тепла, $\Delta = \partial^2(\cdot)/\partial r^2 + \partial(\cdot)/r\partial z^2$.

Выражение для скорости диссипации записывается в виде

$$D' = \chi \dot{W}_p = \chi \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p, \quad \chi \approx 0,7 - 0,8. \quad (3)$$

Начальные и граничные условия имеют соответственно вид

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

$$\sigma_{ij} = 0 \text{ на } S,$$

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad z = L, \quad r = R, \quad (4)$$

где u_r и u_z – компоненты перемещения; q_0 – параметр теплового потока; t_p – время действия импульса.

Уравнения модели Боднера-Партома, уравнения (1)-(3) с начальными и граничными условиями (4) представляют собой постановку связанной задачи термомеханики физически нелинейных тел при тепловом импульсном нагружении.

В качестве материала тонкого цилиндра выбрана сталь 35ХМА. Расчеты проводились для следующих геометрических параметров цилиндра $R = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $L = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Длительность теплового импульса $t_p = 10^{-7} \text{ с}$. Параметр теплового потока q_0 изменялся в пределах $10^{-7} - 5 \cdot 10^{-7} \text{ кВт/м}^2$. Начальная температура диска θ_0 равна 20° C .

Задача является существенно нелинейной. Она решается численно с использованием временной схемы Кранка-Никольсена, итерационного метода и метода конечных элементов.

На рис. 1 представлены результаты, иллюстрирующие прохождение и отражение волны напряжения σ_{zz} , генерируемой тепловым импульсом с параметрами $q_0 = 5 \cdot 10^7 \text{ кВт/м}^2$ и $t_p = 0,1 \text{ мкс}$. Профиль волны напряжения изображен для моментов времени $t_p = 0,1; 0,26; 0,5$ и $0,7 \text{ мкс}$. Напряжение σ_{zz} и неупругая деформация ε_{zz}^p оказываются малыми, поэтому волна напряжений является упругой.

При рассматриваемых условиях возбуждения возникают две состав-

ляющие поля напряжений: термоупругая волна и квазистатические тепловые напряжения (вертикальная линия в окрестности оси напряжений). Область влияния квазистатической составляющей поля напряжений чрезвычайно узка.

Вследствие термоупругой связанности температура в волне сжатия повышается, а в волне растяжения – понижается. Повышение температуры при рассмотренных параметрах задачи составило $\approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$, что обусловлено низким значением напряжения сжатия в импульсе.

Увеличение параметра q_0 приводит к увеличению максимального сжимающего напряжения в импульсе. Зависимость $|\sigma_{zz}|_{\max} \sim q_0$ представлена на рис. 2. В рассматриваемом интервале значений параметров цилиндра и импульса эта зависимость имеет практически линейный характер.

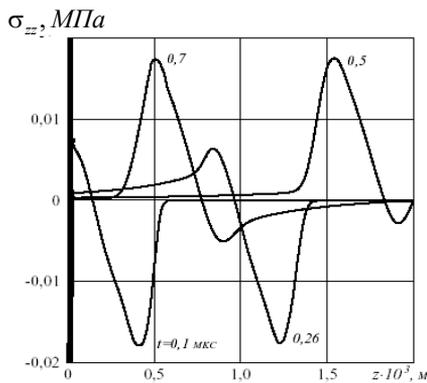


Рис. 1

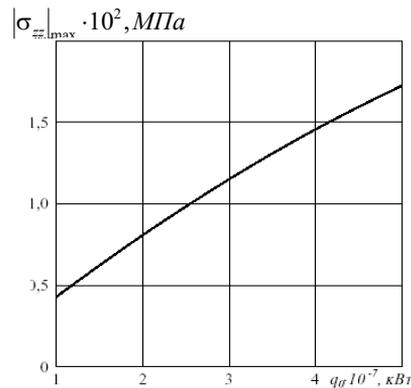


Рис. 2

Расчеты также показали, что распространяющаяся волна сжатия формируется в начальный момент действия теплового импульса. Так, например, максимальное значение импульса сжатия достигается приблизительно к моменту времени $t \approx t_p/5$. Вся остальная тепловая энергия, подводимая к цилиндру до момента окончания импульса, расходуется на формирование заднего фронта импульса и поля квазистатических напряжений в приповерхностной зоне.

Список литературы: 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 and Math In Phys Research Part B. – 2004. – Vol. 225. – P. 544-554. 2. Коваленко В.С. Микро- и нанообработка сверхмощными лазерными импульсами // Оборудование и эксперимент для профессионалов. – 2003. – N 4. – С. 4-14. 3. Сенченков И.К., Жук Я.А. Термомеханический анализ одной модели термовязкопластического формирования материалов // Прикладная механика. – 1997. – Т.33, N 2. – С.41-48.