УДК 539.374

Н. С. Брайковська
Н. Л. Белевцова

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ ПРИ СКЛАДНОМУ НЕІЗОТЕРМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

У роботі розглядаються складні неізотермічні процеси деформування по траєкторіях середньої кривизни, які можуть виникати в елементах колісної пари вагона при його русі.

В работе рассматриваются сложные неизотермические процессы деформирования по траекториях средней кривизны, которые могут возникать в элементах колесной пары вагона при его движении.

The paper examines the complex non-isothermal processes of deformation along the trajectories of the average curvature that may occur in the elements of the carriage wheelpair during its move.

Ключові слова: складні неізотермічні процеси, траєкторії середньої кривизни, трубчаті зразки.

Під час руху вагона по рейковому шляху колісна пара піддається впливу різних статичних, динамічних сил, а також тепловому впливу. Температурний вплив на елементи колісної пари викликає в них пластичні деформації. Тому дослідження складних неізотермічних процесів деформування елементів колісної пари є актуальним.

Розглянемо складні неізотермічні процеси деформування за траєкторіями середньої кривизни. Рівняння зв'язку між напруженнями і деформаціями запишемо згідно з роботами [1, 3], розкладаючи вектор деформації $\vec{Y}$ на складові по напрямку вектора напружень $\vec{\sigma}$ і дотичної $\vec{p_1}$ до траєкторії навантаження (рис.1), у вигляді:

$$\vec{Y} = \mathrm{N}_0\vec{\sigma} + N_1\vec{p_1}; \qquad (1)$$

$$\mathrm{N}_0 = \frac{|\vec{Y}|}{|\vec{\sigma}|}\frac{\sin\beta}{\sin\alpha}; \quad \mathrm{N}_1 = |\vec{Y}|\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin\alpha};$$

$$\alpha = \arccos\frac{\vec{\sigma}\cdot\vec{p_1}}{|\vec{\sigma}|} = \arccos\frac{\mathrm{d}|\vec{\sigma}|}{ds},$$

де α – кут між вектором напружень і дотичної до траєкторії навантаження, β – кут між вектором деформації і цією дотичною, S – довжина дуги траєкторії навантаження.

Скалярні властивості цих залежностей визначаються двома функціоналами:

$$\left|\vec{Y}\right| = \phi\left[\left|\vec{\sigma}\right|, \mathrm{T}, \mathrm{t}\right\} \quad \beta = \beta[s, \chi, T, t] \quad , \tag{2}$$

де T – температура тіла, χ – кривизна траєкторії, t – час.

Припустимо, що перший функціонал не залежить від виду напруженого стану і визначається з дослідів на просте розтягання зразків. При цьому маємо:

$$\sigma = \mathrm{F}[\varepsilon(\mathrm{t}), \mathrm{T}(\mathrm{t}), \mathrm{t}], \tag{3}$$

де σ і ε – напруження і деформація при простому розтягуванні, пов'язані з модулями вектора напруги і вектора деформації такими формулами:

$$\sigma = \left|\vec{\sigma}\right|\sqrt{\frac{3}{2}}; \quad \varepsilon = \frac{\left|\vec{Y}\right|}{1+\nu^*} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}; \quad \nu^* = \frac{1}{2} - \frac{1-2\nu}{2\mathrm{E}} \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad , \tag{4}$$

ν^* – коефіцієнт поперечної деформації, ν і E – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності, що залежать від температури. Функціональну залежність (3) між σ, ε , T і t визначимо на основі нелінійної теорії спадкового середовища, згідно з роботою [4]. Другий функціонал знаходиться на підставі рівняння диференціального рівняння [2, 3]:

$$\frac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{ds}}\left(\frac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{ds}}\right)_{\chi=0} + \chi(\mathrm{s}) = \mu(\beta, \mathrm{T}, \mathrm{t}) + \chi(\mathrm{s}), \tag{5}$$

де $\mu(\beta, \mathrm{T}, \mathrm{t})$ – швидкість зміни кута β після точки зламу в дослідах з тонкостінними трубчастими зразками за прямолінійними траєкторіями навантаження із зламом на кут $\pi/2$. Базові експерименти для конкретизації двох функціоналів: миттєва термомеханічна поверхня, криві повзучості і досліди за дволанковими траєкторіями навантаження з кутом зламу $\pi/2$ на сталі 3ОХГСА описані в роботі [6] . Для визначення $\mu(\beta, \mathrm{T}, \mathrm{t})$ скористаємося також нелінійною теорією спадкового середовища [6]. Отримаємо відношення між кутом $\beta_{\pi/2}$ і дуговою координати $\Delta\mathrm{s}$ після точки зламу в неізотермічному дволанковому процесі навантаження, який ставиться відповідно до того, що розглядається в неізотермічному складному процесі за траєкторіями середньої кривизни. Апроксимуючи залежність $\beta_{\pi/2} \sim \Delta\mathrm{S}$ аналітичних виразів, беручи похідну $\frac{\mathrm{d}\beta_{\pi/2}}{\mathrm{ds}(\Delta\mathrm{s})}$, виключаючи із цих виразів $\Delta\mathrm{S}$, отримаємо формулу для вирахування $\mu(\beta, \mathrm{T}, \mathrm{t})$.

Для експериментального обґрунтування рівняння зв'язку між напруженнями і деформаціями при неізотермічних процесах навантаження за траєкторіями середньої кривизни були здійснені експерименти на тонкостінних трубчастих зразках, виготовлених також зі сталі 3ОХГСА. Зразки навантажувались осьовою силою **P** і крутним моментом **M** при одночасному нагріванні, який проходив по лінійному закону $\mathrm{T} = \mathrm{T}_0 + \mathrm{T} \cdot \mathrm{t}$,, де $\mathrm{T}_0 = 70^0 \mathrm{c}$, $\mathrm{T} = 45$ *ãðàä/ õâ*, зі швидкістю навантаження за траєкторіями середньої кривизни

$\mathrm{S}^{(1)} = 3{,}35 \cdot 10^5$ *Ïà/ñ* äî $\mathrm{t} = 585\mathrm{c}$ ³ $\mathrm{S}^{(2)} = 37 \cdot 10^5$ *Ïà/ñ* після цього моменту часу. По заданих зусиллях і заміряних переміщеннях були визначені величини компонент тензорів і векторів напруг і деформацій [5].

У разі дії розтягування і кручення зв'язок між девіатором деформацій, девіатором напруг і швидкостей напружень, згідно з (1), має вигляд:

$$
\begin{aligned}
e_{zz} &= N_0 S_{zz} + N_1 \dot{S}_{zz}\,; \\
e_{\varphi\varphi} &= N_0 S_{\varphi\varphi} + N_1 \dot{S}_{\varphi\varphi}\,; \\
e_{\varphi z} &= N_0 S_{\varphi z} + N_1 \dot{S}_{\varphi z}\,;
\end{aligned}
\tag{6}
$$

$$
s_{zz} = \sigma_{zz} - \sigma_o\,;\ s_{\varphi\varphi} = -\sigma_o\,;\ s_{\varphi z} = \sigma_{\varphi z};\ \sigma_o = \frac{1}{3}\sigma_{zz};
$$

$$
\dot{s}_{zz} = \frac{\Delta s_{zz}}{\Delta s};\quad \dot{s}_{\varphi\varphi} = \frac{\Delta s_{\varphi\varphi}}{\Delta s};\quad \dot{s}_{\varphi z} = \frac{\Delta s_{\varphi z}}{\Delta s},
$$

де $\Delta s_{zz}, \Delta s_{\varphi\varphi}, \Delta s_{\varphi z}$ – приріст компонент девіатора напруг, Δs – приріст довжини дуги траєкторії навантаження.

Вирахувавши $\mu(\beta, T, t)$ і $\chi(s)$, вирішуємо диференціальне рівняння (5) чисельним методом, наприклад, Ейлера, знаходимо кут β. Задаючи напруження, за формулами (6) можна обчислити компоненти девіатора деформацій, а потім визначити компоненти тензора $\varepsilon_{zz}, \varepsilon_{\varphi\varphi}$ і $\varepsilon_{\varphi z}$ за формулами:

$$
\varepsilon_{zz} = e_{zz} + \varepsilon_o\,;\ \varepsilon_{\varphi\varphi} = e_{\varphi\varphi} + \varepsilon_o\,;\ \varepsilon_{\varphi z} = e_{\varphi z}, \tag{7}
$$

де $\varepsilon_o = \frac{\sigma_o}{K}$, $K = \frac{E}{1-2\nu}$, σ_o і ε_o – середнє нормальне напруження і середнє відносне подовження, К – модуль всебічного об'ємного стиснення. При цьому, з компонент тензора деформації ε_{zz} і $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ віднімалася чисто теплова деформація $\alpha_T(T - T_o)$, яка визначалася на ненавантаженому зразку при нагріванні його за наведеним вище законом, α_T – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу.

На рис. 2 і 3 суцільною лінією показані розрахункові залежності $\sigma_{zz} \sim \varepsilon_{\varphi\varphi}$ і $\sigma_{\varphi z} \sim \varepsilon_{\varphi z}$, а трикутниками – самі залежності, побудовані за результатами дослідів на складне неізотермічне навантаження трубчастих зразків за траєкторіями середньої кривизни. Як видно з малюнків, розрахунок досить добре узгоджується з експериментальними результатами.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Ильюшин А.А.* О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред. // Прикл. математика и механика. – 1954. – 18. – параграф 6. – с.641 – 666.
2. *Ленский В.С.* Некоторые новые данные о пластичности металла при сложном нагружении. // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – I960. – №5. – с. 93 – I00.
3. *Шевченко Ю.Н.* Неассоциированный закон течения для плоских траекторий десформирования средней кривизны. // Прикл. механика. – 1977. – №13. – с.133 – 140.
4. *Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г.* Определение функциональной зависимости между напряжением, деформацией и температурой при одноосном нагружении на основе нелинейной теории наследственной среды. //Проблемы прочности. – 1977. – №2 – с. 33–36.
5. *Шевченко D.Н., Терехов Р.Г., Баш В.Я., Захаров С.М.* Проверка основных гипотез теории малых упругопластических деформации при неизотермическом нагружении. // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – 1977. – Вып.17. – с. 25 – 29.
6. *Шевченко D.Н., Терехов Р.Г., Захаров С.М.* Исследование неэкзестермических сложных процессов нагружения по траекториям в виде двухзвенных ломаных. // Прикл. механика. – 1979. – №8. – С. 8 –18.