УДК 539.374

Н. С. Брайковська
Н. Л. Белевцова

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСТУЛАТУ ІЗОТРОПІЇ В МЕТАЛАХ ПРИ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Робота присвячена експериментальній перевірці постулату ізотропії при складному навантаженні металу. При цьому розглядаються процеси, які відбуваються в металі при проміжному розвантаженні.

Работа посвящена экспериментальной проверке постулата изотропии при сложном нагружении металла. При этом рассматриваются процессы, происходящие в металле при промежуточной разгрузке.

The work is devoted to the experimental verification of the postulate of isotropy under complex loading of metal. At the same time we consider processes running in the metal under intermediate off-load.

Ключові слова: постулат ізотропії, складне навантаження, експериментальна перевірка, проміжне розвантаження.

Вагон в процесі експлуатації піддається дії статичних, динамічних і теплових навантажень, тобто, елементи вагона можуть перебувати в складному навантаженні. Тому експериментальна перевірка постулату ізотропії при складному навантаженні металу є актуальною.

Постулат ізотропії [1], що лежить в основі теорії процесів складного навантаження, сформульований для довільних процесів навантаження, зокрема і для процесів з проміжним розвантаженням. Згідно з постулатом ізотропії сукупність траєкторій навантаження і побудованих в кожній її точці відповідних векторів деформації інваріантна щодо перетворень обертання і віддзеркалення, тобто вектор деформації повністю визначається внутрішньою геометрією траєкторії навантаження. Справедливість постулату ізотропії при активному навантаженні перевірялась експериментально для великого класу ізотропних в початковому стані матеріалів при кімнатній температурі [2] і постійних підвищених температурах [3]. Перевірка справедливості цього постулату для ізотермічних складних процесів навантаження з проміжним розвантаженням в умовах підвищених температур в літературі відсутній.

У зв'язку з цим у даній роботі наведені результати дослідної перевірки постулату ізотропії при складному навантаженні по траєкторіях з проміжним розвантаженням, отримані при випробуванні тонкостінних трубчастих зразків,

© Брайковська Н. С., Белевцова Н. Л., 2014

виготовлених зі сплаву ЭИ-437, при складному навантаженні їх розтягує силою *P* і крутним моментом *M* при *T=700°C*.

Випробування проведені за двома траєкторіями навантаження з однаковою внутрішньою геометрією, але по-різному розташованих у просторі напруги $\sum_5$.

Для здійснення програм навантаження задавалися компоненти σ_1 і σ_5 вектора напруги і закон руху точки по траєкторії $s \sim t$. Обчислювали значення довжини дуги в кожній точці:

$$s_n = \sum_{i=1}^{n} \Delta s, \tag{1}$$

де $$\Delta s_i = \sqrt{(\sigma_{1,i} - \sigma_{1,i-1})^2 + (\sigma_{5,i} - \sigma_{5,i-1})^2}, \; i = 1,..., n, \tag{2}$$

i – номер етапу навантаження, *n* – кількість етапів. Знаючи величини s_n, по закону $s \sim t$ визначались відповідні значення часу t_n. Розтягуюча сила *P* і крутний момент *M* в кожній точці траєкторії навантаження обчислювали за формулами [3]:

$$P_n = \sqrt{6}\pi R_{ср} h \sigma_{1,n}, \quad M_n = \sqrt{2}\pi R^2_{ср}\, h \sigma_{5,n}, \tag{3}$$

Тут *Rcp* і *h* – відповідно середній радіус і товщина стінки трубчастого зразка. Визначивши *P(t)* і *M(t)*, програми навантаження були реалізовані на випробувальній машині за методикою, описаною в [3] .

За рахунок певної інерційності виконавчих механізмів здійснені траєкторії навантаження дещо відрізнялися від заданих, тому компоненти тензора напружень у циліндричній системі координат z, r, φ розраховуються за реальною силою *P* та крутним моментом *M* за формулами:

$$\sigma_{zz} = \frac{P}{2\pi R_{ср} h}, \qquad \sigma_{\varphi z} = \frac{M}{2\pi R^2_{ср} h}, \qquad \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{rr} = \sigma_{zr} = \sigma_{r\varphi} = 0, \tag{4}$$

а компоненти тензора деформацій згідно з формулами:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta \ell}{\ell}, \qquad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \varepsilon_{rr} = \frac{\Delta D}{D}, \quad \varepsilon_{\varphi z} = \frac{R_{ср}\varphi}{2\ell}, \; \varepsilon_{zr} = \varepsilon_{r\varphi} = 0, \tag{5}$$

де ℓ – база тензометра, установленого на зразку, $\Delta\ell$ – величина зміни бази в результаті деформації зразка, *D* і ΔD – зовнішній діаметр зразка і розмір його зміни відповідно, φ – кут повороту одного поперечного перерізу зразка щодо іншого, розташованих на базі ℓ .

Компоненти векторів напруження σ_i і деформації $Э_i$ виражаються через уточнені компоненти тензора напруження і заміряні деформації

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_{zz}, \qquad \sigma_5 = \sqrt{2}\sigma_{\varphi z}, \qquad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = 0, \tag{6}$$

$$\acute{Y}_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}\left(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{\varphi\varphi}\right), \qquad \acute{Y}_5 = \sqrt{2}\varepsilon_{\varphi z}, \qquad \acute{Y}_2 = \acute{Y}_3 = \acute{Y}_4 = 0, \tag{7}$$

Швидкість навантаження в описаних експериментах була рівна $\dot{S} = ds/dt = 30 \cdot 10^{-5}$ *Їà /ñ*. На рис. 1 в координатах σ_1, σ_5 (6) зображені дві симетричні відносно осі σ_1 траєкторії навантаження I і I/ з ділянками проміжного розвантаження.

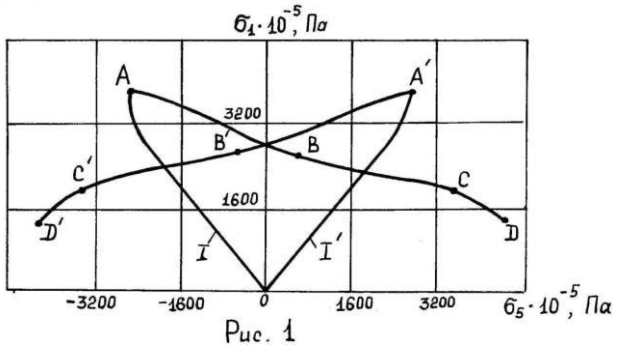

Рис. 1

Як критерій активного навантаження приймалися умови позитивності роботи вектора напруження $\vec{\sigma}$ на збільшеннях вектора незворотних складових деформації $d\vec{y}^{(n)}$:

$$\vec{\sigma} \cdot d\vec{y}^{(n)} \geq 0 \qquad (8)$$

При розвантаженні

$$\vec{\sigma} \cdot d\vec{y}^{(n)} < 0 \qquad (9)$$

Тут $\vec{y}^{(n)} = \vec{y} - \vec{y}^{(e)}$, $\vec{y}^{(e)} = \frac{\vec{\sigma}}{2G}$, G - модуль зсуву.

Згідно з критеріями (8), (9) на ділянках траєкторій АВ і АВ/ відбувається розвантаження. На ділянках ВС і ВС/ йдуть процеси навантаження в пружній області, на СД і СД/ – повторного навантаження у пластичній області. У відповідних (рівновіддалених від початку координат) точках траєкторій I і I/ з використанням формул (7) обчислені складові вектора деформації ***Э1*** і ***Э5***.

Для перевірки постулату ізотропії проведено порівняння орієнтації векторів деформацій щодо двох траєкторій і значення їх модулів у відповідних точках траєкторій на ділянках АД і АД/. Результати порівняння представлені на рис. 2 і 3 у вигляді графіків залежностей модуля вектора напруження $\left|\vec{\sigma}\right| = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_5^2}$ від модуля вектора деформації $\left|\vec{y}\right| = \sqrt{y_1^2 + y_5^2}$ і залежності $\beta \sim \Delta s^*$, де β – кут нахилу вектора деформації $\vec{Y}$ до дотичної до траєкторії навантаження, а Δs^* - довжина дуги траєкторії навантаження, яка вираховується від точок А, А/ (рис.1).

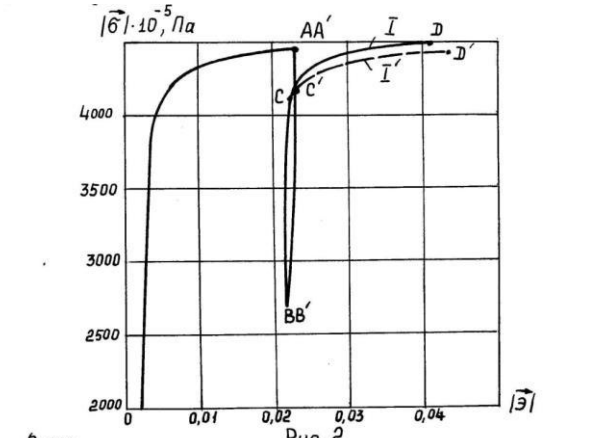

Рис. 2

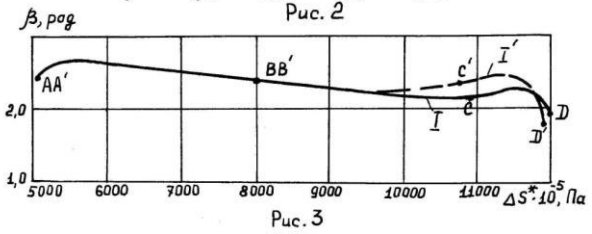

Рис. 3

Кут β при цьому вираховується за формулою:

$$\beta = \arccos \frac{\acute{Y}_1 \Delta\sigma_1 + \acute{Y}_5 \Delta\sigma_5}{\left|\vec{Y}\right| \Delta S} \qquad (10)$$

де $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_5, \Delta S$ – приріст складових вектора напруження і довжини дуги між відповідними точками.

Результати випробувань за двома різними, але з однаковою внутрішньою геометрією траєкторіях навантаження близькі між собою. Різниця значень модулів векторів напруження $\left|\vec{\sigma}\right|$ для однакових значень модулів векторів деформації $\left|\vec{Y}\right|$ (рис. 2) не перевищує 3%. Різниця кутів β для однакових значень довжин дуг траєкторій навантаження ΔS^* (рис. 3) не перевищує 10%.

Отримані результати свідчать про те, що постулат ізотропії з певною точністю справедливий і при ізотермічному складному навантаженні по траєкторіях, що включає ділянки проміжного розвантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Ильюшин А.А.* Пластичность. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 272 с.

2. *Ленский В.С.* Экспериментальная проверка законов изотропии и запаздывания при сложном нагружении.// Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. – 1958. – №11. – с. 15–24.

3. *Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г.* Физические уравнения термовязкопластичности. – К.: Наукова думка, 1982. – 240 с.