

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА СТ45 НА МНОГОЗВЕННЫХ ТРАЕКТОРИЯХ^{*)}

В.Г. Зубчанинов, В.И. Гулятьев, Д.В. Зубчанинов

Тверь

Представлены результаты экспериментального исследования механических свойств материала СТ45 при сложном деформировании по плоским четырехзвенным траекториям с учетом сложного разгрузки материала.

В статье представлены результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки при растяжении с кручением в пространстве деформаций по четырехзвенной плоской ломаной траектории. Стальной трубчатый образец имел толщину стенки $h = 1$ мм, радиус средней поверхности $R = 15,5$ мм, длину рабочей части $l = 110$ мм. Материал образцов в достаточной степени начально изотропен, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел текучести при одноосном растяжении $\sigma_T = 330$ МПа, $\sigma^T = \sqrt{2/3}\sigma_T = 270$ МПа. При обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости ($\epsilon_0 = 0$).

Программа испытаний реализовывалась в векторном пространстве деформаций в плоскости $\mathcal{E}_1\mathcal{E}_3$ (рис. 1).

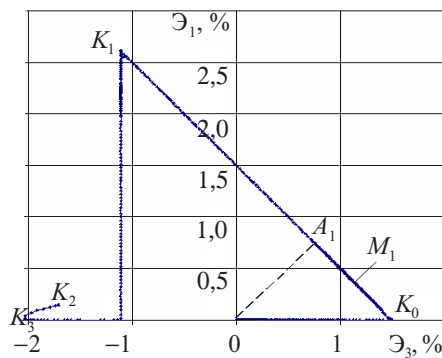


Рис. 1

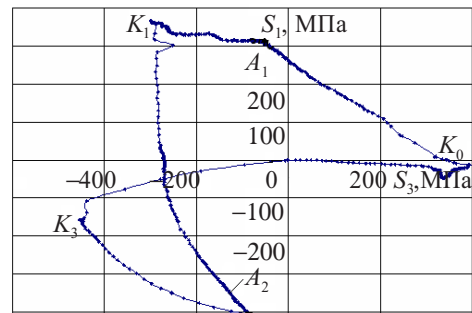


Рис. 2

Соответствующий ей отклик реализовывался в плоскости S_1S_3 векторного пространства девiatorа напряжений (рис. 2). Компоненты векторов напряжений и деформаций и их модулей в девiatorных подпространствах напряжений и деформации вычислялись по формулам:

^{*)} Статья выполнена при поддержке грантом РФФИ № 05-08-01442а.

$$S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\sigma_{11} - \frac{1}{2} \sigma_{22} \right), \quad S_2 = \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{2}}, \quad S_3 = \sqrt{2} \sigma_{12}, \quad (1)$$

$$\Theta_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_0), \quad \Theta_2 = \sqrt{2} \left(\varepsilon_{22} + \frac{1}{2} \varepsilon_{11} - \frac{3}{2} \varepsilon_0 \right), \quad \Theta_3 = \sqrt{2} \varepsilon_{12},$$

$$\sigma = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad \Theta = \sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_2^2 + \Theta_3^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты тензоров напряжений и деформации [1, 2].

Особенность программы состояла в том, что после простого деформирования кручением до уровня $\Theta = \Theta_3 = 1,5\%$ производился излом траектории деформирования на угол 135° , после чего происходило сложное разгрузие образца. После излома траектории в точке K_0 образец подвергался одновременному действию кручения и растяжения материала до точки K_1 . При этом образец разгружался локально кручением до $\Theta_3 = -1\%$ при одновременном локальном увеличении деформации растяжения до уровня $\Theta_1 = 2,5\%$. После второго излома траектории в точке K_1 образец разгружался сжатием до точки K_2 до уровня $\Theta_1 = 0\%$ при постоянном значении $\Theta_3 = -1\%$. После третьего излома в точке K_2 траектории деформирования на угол 90° образец снова закручивался до $\Theta_3 = -2\%$ при постоянном $\Theta_1 = 0$ (точка K_3), после чего разгружался из точки излома K_3 до $S_3 = 0$ и $S_1 = 0$ (см. рис. 1, 2).

На рис. 3, 4 представлены глобальная диаграмма деформирования материала σ – Θ и диаграмма прослеживания процесса нагружения σ – s , где s – длина дуги траектории деформирования; на рис. 5, 6 – локальные диаграммы деформирования S_1 – Θ_1, S_3 – Θ_3 .

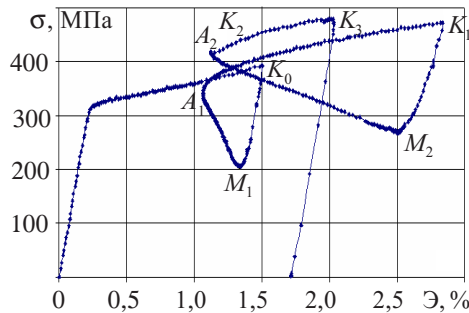


Рис. 3

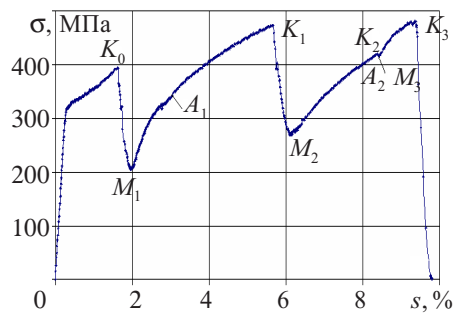


Рис. 4

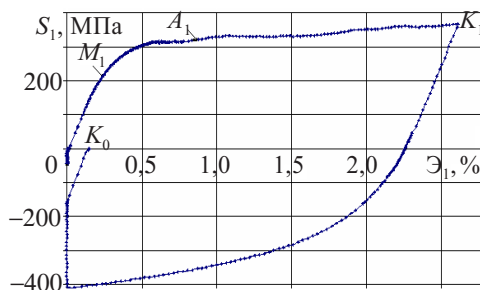


Рис. 5

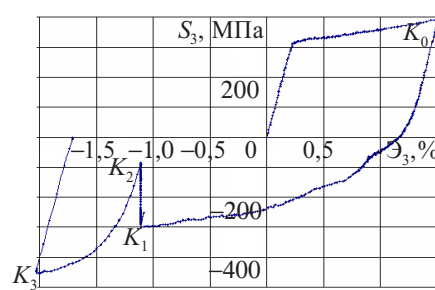


Рис. 6

После каждого излома траектории в точках K_0, K_1, K_2, K_3 на диаграмме деформирования (см. рис. 3) наблюдались обратные "нырки" напряжений, а на диаграмме прослеживания процесса нагружения (см. рис. 4) имели место прямые "нырки" напряжений [4]. Точками M_1, M_2, M_3 отмечены на "нырках" точки, в которых достигался σ_{\min} . На ниспадающих участках "нырков" $K_{i-1}-M_i$ ($i = 1, 2, 3$) происходила частичная упругая разгрузка при пассивном процессе деформирования ($dA_\phi < 0, \vartheta_1 > \pi/2$), а на восходящих участках – неполное упругопластическое деформирование при активном процессе деформирования ($dA_\phi > 0, \vartheta_1 > \pi/2$), dA_ϕ – приращение элементарной работы деформации формоизменения, ϑ_1 – угол сближения между вектором напряжений и касательным вектором к траектории деформации. Граница между активным и пассивным процессами деформирования примерно соответствовала точкам, где $\sigma = \sigma_{\min}$. Процесс пассивного нагружения–разгрузки ($dB_\phi > 0, \pi/2 \leq \vartheta_1^* \leq \pi$) реализовывался на участках $K_{i-1}-A_i$ ($i = 1, 2, 3$); dB_ϕ – приращение элементарной дополнительной работы напряжений, ϑ_1^* – угол сближения между вектором деформаций и касательной к траектории нагружения. Это участки сложного разгрузки материала. В точках A_i происходила смена пассивных процессов нагружения на активные ($dB_\phi > 0, 0 \leq \vartheta_1^* \leq \pi/2$).

На рис. 7 изображен график поведения угла сближения ϑ_1 в процессе деформирования материала. Для определения угла ϑ_1 использовалась формула

$$\cos \vartheta_1 = \frac{1}{\sigma} \left(S_k \frac{d\mathcal{E}_k}{ds} \right) \quad (k = 1, 2, 3). \quad (3)$$

Стрелками на рис. 7 указаны характерные точки смены состояний деформирования. В точках A_i окончания сложной разгрузки $dA_\phi = 0, \vartheta_1 = \pi/2, dB_\phi = 0, \vartheta_1^* = \pi/2$.

На рис. 8 показана диаграмма прослеживания процесса деформирования $\mathcal{E}-\Sigma$, где Σ – длина дуги траектории нагружения. На этой диаграмме участки K_0-A_1, K_1-A_2 отвечают пассивным процессам нагружения, то есть сложной разгрузке материала. Соответствующие "нырки" $K_0A_1K_1, K_1A_2K_2$ названы В.Г. Зубчаниновым "нырками" деформации [4].

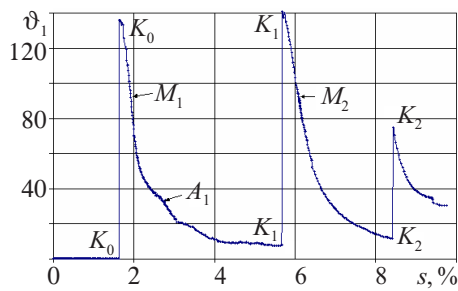


Рис. 7

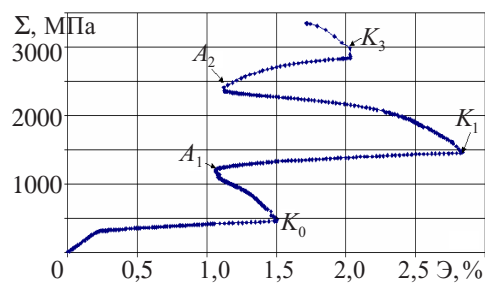


Рис. 8

Таким образом, сложная разгрузка материала описывается "нырками" напряжений и деформаций $K_{i-1}-A_i$ по терминологии, введенной В.Г. Зубчаниновым в работе [4]. "Нырок" напряжений состоит из участка частичной упругой разгрузки и участка неполного упругопластического догружения и в целом не описывается линейным законом разгрузки. "Нырок" деформаций дает закон сложной разгрузки в целом и приближенно может быть аппроксимирован линейной зависимостью.

Литература

1. *Зубчанинов, В.Г.* Математическая теория пластичности / В.Г. Зубчанинов. – Тверь: ТГТУ, 2002. – 300 с.
2. *Зубчанинов, В.Г.* Механика сплошных деформированных сред / В.Г. Зубчанинов. – Тверь: ТГТУ, 2002. – 703 с.
3. *Зубчанинов, В.Г.* Основы теории упругости и пластичности / В.Г. Зубчанинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 368 с.
4. *Зубчанинов, В.Г.* Об активных и пассивных процессах сложного нагружения-разгрузки в теории пластичности / В.Г. Зубчанинов // Современные проблемы термовязкопластичности: Труды 2-й школы-семинара. – М.: МГТУ "МАМИ", 2007. – С. 9–18.
5. *Зубчанинов, В.Г.* Экспериментальное исследование процессов сложного нагружения материалов на многозвенных траекториях / В.Г. Зубчанинов, В.И. Гуляев, Д.В. Зубчанинов // Современные проблемы термовязкопластичности: Труды 2-й школы-семинара. – М. МГТУ "МАМИ", 2007. – С. 3–8.

[06.07.2007]

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMPLEX DEFORMATION PROCESSES IN THE CT45 STEEL ON MULTY-SECTION PATHS

V.G. Zubchaninov, V.I. Gul'tyayev, D.V. Zubchaninov

The paper presents the results of the experimental study of mechanical properties of the CT45 steel under complex deformation along plane four-section paths, accounting for complex unloading of the material.