

УДК 539.374

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ТРАЕКТОРИЯМ ТИПА ВЕЕРА

В.Г. Зубчанинов, В.И. Гульятеев, Д.В. Зубчанинов

Тверь

В статье представлены результаты базовых испытаний стали по двухзвенным траекториям деформирования типа веера. Исследовано влияние угла излома траектории на глубину “нырка” при частичной сложной разгрузке материала.

Испытания проводились на автоматизированном испытательном комплексе СН–ЭВМ в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета. Стальные трубчатые образцы имели толщину стенки $h = 1$ мм, радиус срединной 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 $\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma^T = 305$ МПа.

Компоненты векторов напряжений и деформаций и их модулей в девиаторном подпространствах напряжений Σ_3 и деформаций E_3 вычислялись по формулам [1–2]:

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

$$\Theta_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} (\epsilon_{11} - \epsilon_0), \quad \Theta_2 = \sqrt{2} \left(\epsilon_{22} + \frac{1}{2} \epsilon_{11} - \frac{3}{2} \epsilon_0 \right), \quad \Theta_3 = \sqrt{2} \epsilon_{12},$$

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

где σ_{ij} , ϵ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) – компоненты тензоров напряжений и деформаций. При обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости ($\epsilon_0 = 0$).

Для экспериментальных исследований было выбрана сталь Ст 45 с площадкой текучести и без площадки текучести в состоянии поставки. На рис. 1 представлена диаграмма растяжения: 1 – для материала с площадкой текучести, 2 – без площадки текучести.

Диаграмма растяжения с площадкой текучести может быть аппроксимирована выражениями [3, 4]:

$$\sigma = \begin{cases} 2G\vartheta & \text{при } \vartheta \leq \vartheta^T, \\ \sigma^T & \text{при } \vartheta^T \leq \vartheta \leq \vartheta_*^T, \\ \sigma^T + 2G_*(\vartheta - \vartheta_*^T) + \sigma_a(1 - e^{-\beta(\vartheta - \vartheta_*^T)}) & \text{при } \vartheta > \vartheta_*^T, \end{cases} \quad (3)$$

где $\vartheta^T = \sigma^T / 2G$.

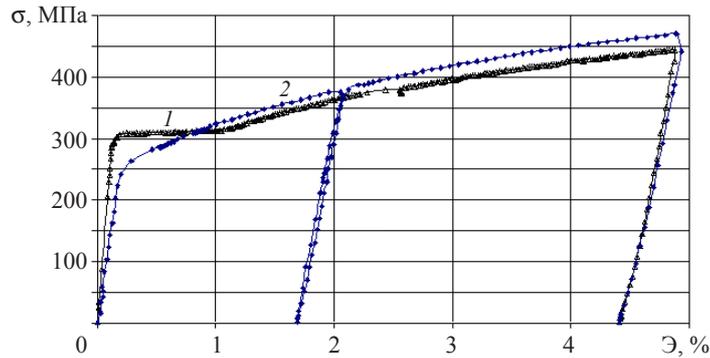


Рис. 1

Если площадка текучести отсутствует, то в (3) $\vartheta^T = \vartheta_*^T$ и второй участок (площадка текучести) отсутствует.

На рис. 2 представлена экспериментальная диаграмма для Ст 45 с площадкой текучести и соответствующая ей аппроксимационная диаграмма, построенная согласно (3) при значении параметров $\sigma^T = 305$ МПа, $2G_* = 1500$ МПа, $\sigma_a = 38$ МПа, $\beta = 50$. Погрешность аппроксимации не превосходит 3%.

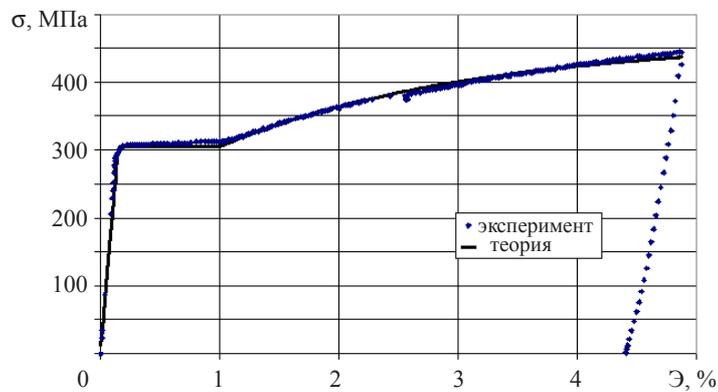


Рис. 2

Программа испытаний реализовывалась в векторном пространстве деформаций в плоскости $\vartheta_1\vartheta_3$, соответствующий ей отклик реализовывался в плоскости S_1S_3 векторного пространства девиатора напряжений. На рис. 3 представлена программа с точками излома при $\vartheta_1^0 = 1\%$ и $\vartheta_1^0 = 2\%$ для материала с площадкой текучести, а на рис. 4 – при $\vartheta_1^0 = 1,5\%$ для материала без площадки текучести.

Для первой программы излом траектории по лучам типа веера происходил соответственно под углом 0, 45, 90, 135, 150 и 180°, для второй программы – при углах излома 0, 60, 90, 135, 150 и 180°. После излома траектории при углах излома

45 и 60° образец подвергался одновременному действию кручения с растяжением, при 90° – кручению, при 135 и 150° – упругой разгрузке после растяжения с кручением, при 180° – чистому знакопеременному нагружению с упругой разгрузкой. Угол излома 0° соответствовал диаграмме растяжения материала.

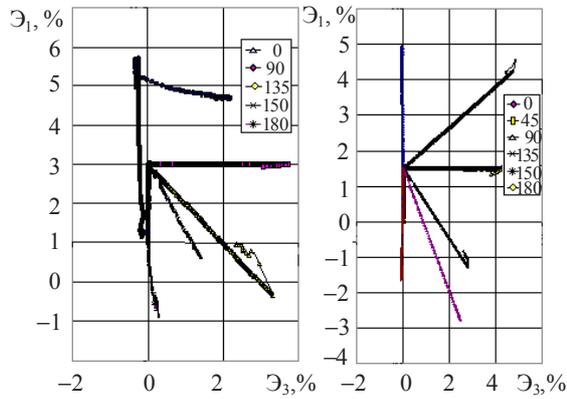


Рис. 3

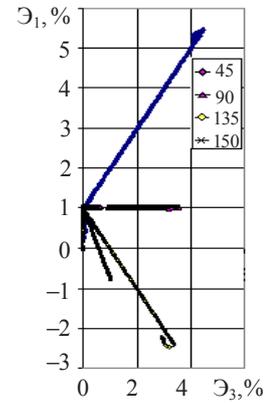


Рис. 4

После излома траектории при напряжении σ_k^T имели место “нырки” на диаграмме σ – S и σ – Δ (рис. 5, 6).

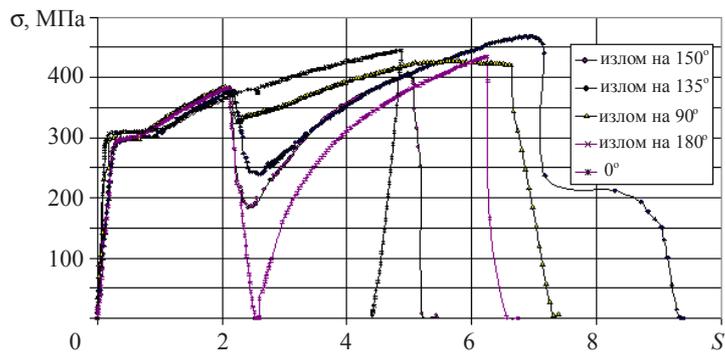


Рис. 5

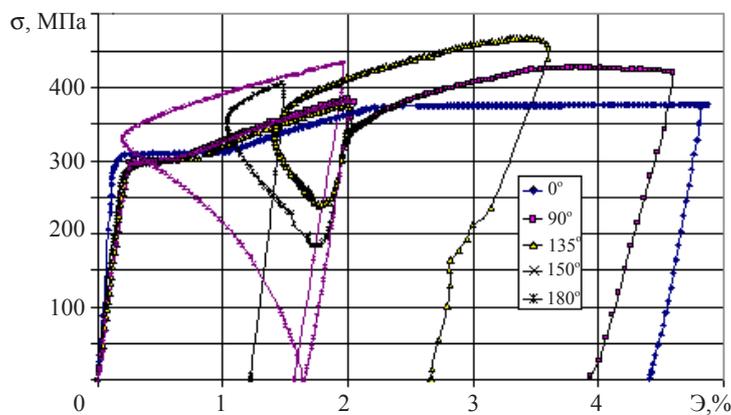


Рис. 6

Ниспадающая часть “нырка” соответствует частичной упругой сложной разгрузке до минимального значения напряжения σ_{BT}^T , при котором происходит “протыкание” предельной поверхности и возникают вторичные пластические деформации. Напряжения σ_{BT}^T может быть названо вторичным пределом текучести. На ниспадающей части “нырка” происходит упругая разгрузка на диаграмме $S_1-\mathcal{E}_1$ и упругое нагружение на диаграмме $S_3-\mathcal{E}_3$ при кручении образца (рис. 7, 8). На восходящей ветви “нырка” продолжается упругая разгрузка по растяжению–сжатию, но происходит активное пластическое деформирование от кручения, что и является причиной прекращения частичной упругой разгрузки материала (см. рис. 7, 8).

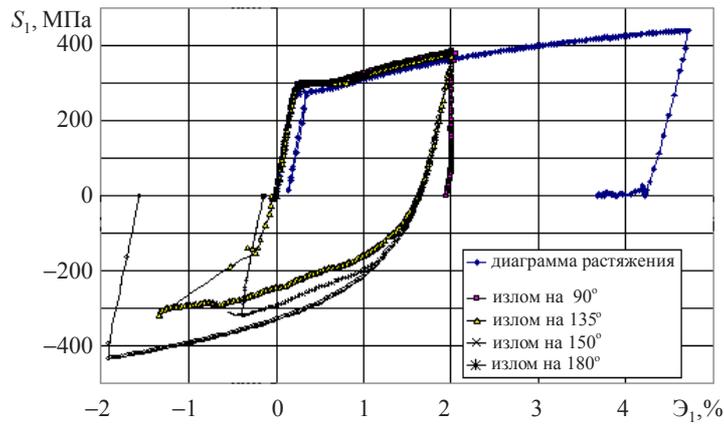


Рис. 7

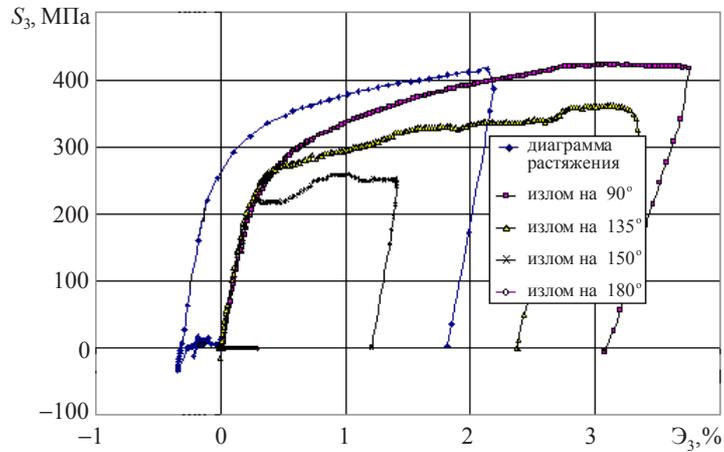


Рис. 8

Из рис. 4,5 следует, что частичная разгрузка практически линейна. Поэтому, по предложению одного из авторов [1], закон сложной упругой разгрузки может быть принят линейным:

$$\Delta\sigma = 2G(S - S_0) = 2G(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0), \quad (4)$$

где $S_0 = \mathcal{E}_0$ – значения S и \mathcal{E} в точке K излома траектории. При полной разгрузке

$$\Delta\sigma = \sigma_k^T = 2G(S_R - S_0) = 2\gamma_0\sigma^T, \quad (5)$$

откуда $\gamma_0 = \sigma_k^T / \sigma^T$. Обозначим

$$\gamma = (\sigma_k^T - \sigma_{BT}^T) / \sigma^T. \quad (6)$$

На рис. 9 представлена теоретическая

$$\gamma = \gamma_0 (1 - \text{ctg} \vartheta_1^0 / 2)^m \quad (7)$$

и экспериментальная зависимости параметра γ от угла излома ϑ_1^0 траектории для стали 45 с площадкой текучести на участке частичной разгрузки материала ($\sigma_T = 305$ МПа). Для $\vartheta_1^0 = 180^\circ$ имеем $\gamma = 1,273$, что меньше значения 2, предсказываемого принципом Мазинга при идеальном выполнении эффекта Баушингера.

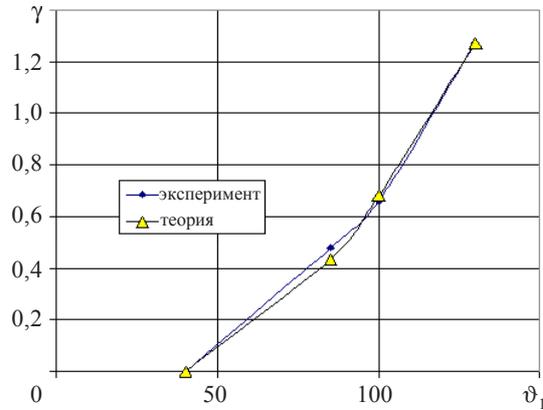


Рис. 9

На участке вторичного пластического деформирования, согласно гипотезе В.Г. Зубчанинова [1], имеет место локально простой процесс при $\vartheta_1 = 0$. Зависимость $\sigma = \Phi(S)$ описывается выражением

$$\sigma = \Phi(S) = \sigma_{BT}^T + 2G_* (S - S_0^Y) + \sigma_a [1 - e^{-\beta(S - S_0^Y)}], \quad (8)$$

где длина дуги S_0^Y соответствует началу участка при $\sigma = \sigma_{BT}^T$.

На рис. 10 представлена экспериментальная диаграмма деформирования и ее теоретическая аппроксимация согласно (8) для угла излома $\vartheta_1^0 = 135^\circ$.

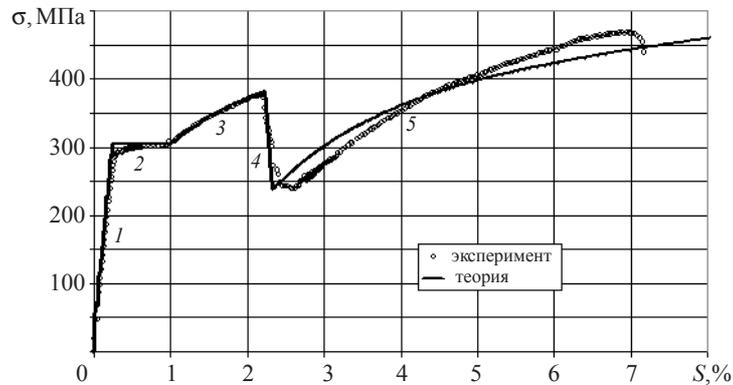


Рис. 10

Как видно, используемые аппроксимации поведения материала на траекториях типа веера достаточно точно подтверждаются экспериментальными данными.

Расчетные характеристики диаграмм по лучам типа веера приведены в таблице.

| № п/п | ϑ_1^0 | σ^T | $2G^*$ | | σ_a | | β | | $\gamma_{\text{эксп}}$ | $\gamma_{\text{теор}}$ | σ_{BT}^T |
|-------|-----------------|------------|--------|------|------------|------|---------|------|------------------------|------------------------|-----------------|
| | | | 3 уч | 5 уч | 3 уч | 5 уч | 3 уч | 5 уч | | | |
| 1 | 0 | 305 | 2 | | 145 | | 0,5 | | – | – | – |
| 2 | 90 | 305 | 2 | 2 | 130 | 120 | 0,7 | 0,7 | 0 | 0 | 320,1 |
| 3 | 135 | 305 | 2 | 30 | 130 | 300 | 0,7 | 0,7 | 0,479 | 0,746 | 238,3 |
| 4 | 150 | 305 | 2 | 40 | 120 | 350 | 0,7 | 0,7 | 0,661 | 0,931 | 183,5 |
| 5 | 180 | 305 | 2 | 45 | 110 | 180 | 0,7 | 2 | 1,273 | 1,273 | 0 |

Зависимость ϑ_1^0 от $2G_*$ для третьего и пятого участков представлена на рис. 11 соответственно линиями 1 и 2, а зависимость ϑ_1^0 от σ_a – линиями 3, 4.

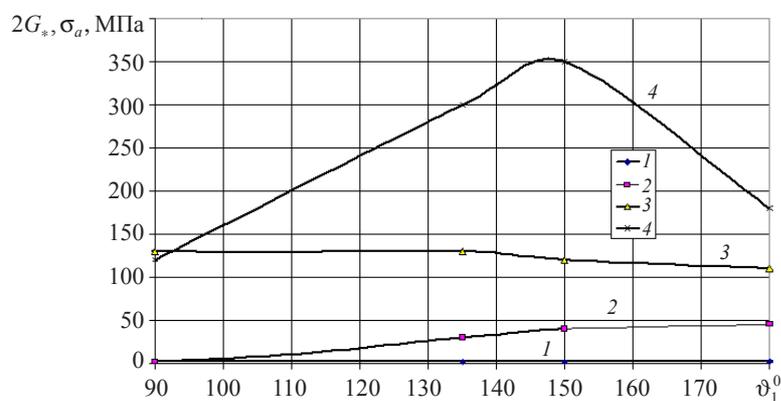


Рис. 11

Таким образом, результаты представленного экспериментального исследования подтверждают достоверность математической модели пластического деформирования материалов [3].

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. Математическая модель пластического деформирования материалов при сложном нагружении / В.Г. Зубчанинов // Настоящ. сб. – С. 5–13.
4. Ильюшин, А.А. Пластичность. Ч.1. Упруго-пластические деформации / А.А. Ильюшин. – Л.: ОГИЗ ГИТТЛ, 1948. – 388 с.

[5.07.2005]