УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ ПО МНОГОЗВЕННЫМ КРИВОЛИНЕЙНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Зубчанинов В.Г., д.т.н., проф., Алексеев А.А., к.т.н., доц., Гультяев В.И., д.т.н., проф.

Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Российская Федерация

Реферат. *В статье представлены данные эксперимента по сложной траектории деформирования (растяжение с кручением – Р-М опыт) в виде плоской кривой, состоящей из пяти участков (звеньев), в том числе постоянной кривизны. Для верификации математической модели результаты теоретических расчётов сравниваются с экспериментальными данными, полученными авторами на экспериментальном комплексе СН-ЭВМ.*

Ключевые слова: пластичность, траектория деформирования, экспериментальные данные, моделирование процесса деформирования.

В теории процессов для численного моделирования упругопластического деформирования материалов в девиаторном пространстве А.А. Ильюшина E_5 по сложным плоским траекториям с аналитическими криволинейными участками используются определяющие соотношения [1], учитывающие скалярные и векторные свойства материалов

$$\frac{d\bar{\sigma}}{ds} = M_1 \frac{d\bar{Э}}{ds} + \left(\frac{d\sigma}{ds} - M_1 \cos\vartheta_1\right)\frac{\bar{\sigma}}{\sigma}, \qquad \frac{d\vartheta_1}{ds} + \kappa_1 = -\frac{M_1}{\sigma}\sin\vartheta_1, \tag{1}$$

где $\bar{\sigma}$, $\bar{Э}$ – векторы формоизменения напряжений и деформаций соответственно, s – длина дуги траектории деформирования; $\vartheta_1 = \vartheta_1(s, \kappa_1, \vartheta_1^0)$ – угол сближения, являющийся функционалом процесса векторных свойств материала, характеризующий в каждой точке траектории деформирования направление вектора $\bar{\sigma}$; κ_1 – кривизна траектории; ϑ_1^0 – угол излома в начальной точке аналитического участка траектории; $\sigma = \sigma(s, \kappa_1, \vartheta_1^0)$ – функционал процесса скалярных свойств материала; M_1, $\frac{d\sigma}{ds}$ – функционалы процесса деформирования, зависящие от параметров сложного нагружения $s, \kappa_1, \vartheta_1^0$.

К основным уравнениям математической модели теории процессов для плоских траекторий относятся уравнения (1) и зависящие от всех указанных выше параметров сложного нагружения универсальные аппроксимации функционалов

$$\sigma(s) = \Phi\left(s, \vartheta_1^0, \kappa_1\right) = \Phi\left(s\right) + Af_0^p\,\Omega - B\Delta s\kappa_1 - \Delta\sigma,$$

$$\frac{d\sigma}{ds} = \frac{d\Phi}{ds} + Af_0^p\frac{d\Omega}{ds} - B\frac{d}{ds}\left(\Delta s\kappa_1\right),$$

(2)

$$M_1 = 2G_p + \left(2G - 2G_p^0\right)f^q, \tag{3}$$

где $\Delta s = s - s_K^{\text{т}}$ – приращение дуги траектории деформирования; $s_K^{\text{т}}$ – длина дуги в точке излома траектории или изменения ее кривизны; $\Phi\left(s\right)$ – универсальная функция деформирования Одквиста–Ильюшина для процессов, близких к простому нагружению, без учета их истории; $\Delta\sigma = \Phi(s_{\text{к}}^{\text{т}}) - \sigma_{\text{к}}^{\text{т}}$ – разница между значениями универсальной функции Одквиста–Ильюшина и реальным значением модуля вектора напряжений в точке смены участков траектории деформирования;

$$\Omega=-\left[\gamma\Delta s\, e^{-\gamma\Delta s}+b\left(1-e^{-\gamma\Delta s}\right)\right],\qquad f=f(\vartheta_1)=\frac{1-\cos\vartheta_1}{2} \tag{4}$$

– функции сложного нагружения; A, B, b, γ, p, q – экспериментально определяемые параметры аппроксимаций.

Экспериментальное исследование проведено на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ, реализующем трехпараметрическое воздействие на образец (осевое растяжение-сжатие, кручение и внутреннее давление). В качестве образца использована тонкостенная цилиндрическая оболочка из стали Ст3 в состоянии поставки, имеющие в рабочей части: длину $l=110$ мм, толщину $h=1$ мм и диаметр срединной поверхности $d=31$ мм. Программа эксперимента при жестком нагружении представляет собой в девиаторном пространстве деформаций $Э_1-Э_3$ плоскую кривую, содержащую участки постоянной кривизны (рис. 1).

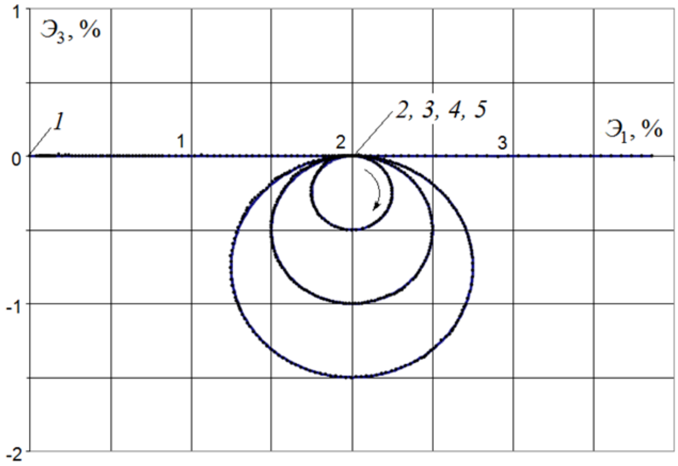

Рисунок 1 – Программа эксперимента

Расчетные и экспериментальные результаты приводятся в векторном представлении напряжений и деформаций А.А. Ильюшина [1–2]. На рисунке 2 приведен отклик на реализованную траекторию деформирования в плоскости S_1–S_3 девиаторного пространства напряжений, на рисунке 3 приведена диаграммы $\sigma-s$. На рисунках 5, 6 приведены локальные диаграммы деформирования. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5 на рисунках 1–3 обозначены точки начала соответствующих участков реализованной траектории. Опытные данные на рисунках обозначены точками, а модельные расчётные данные – сплошной линией.

Рисунок 2 – Отклик по напряжениям

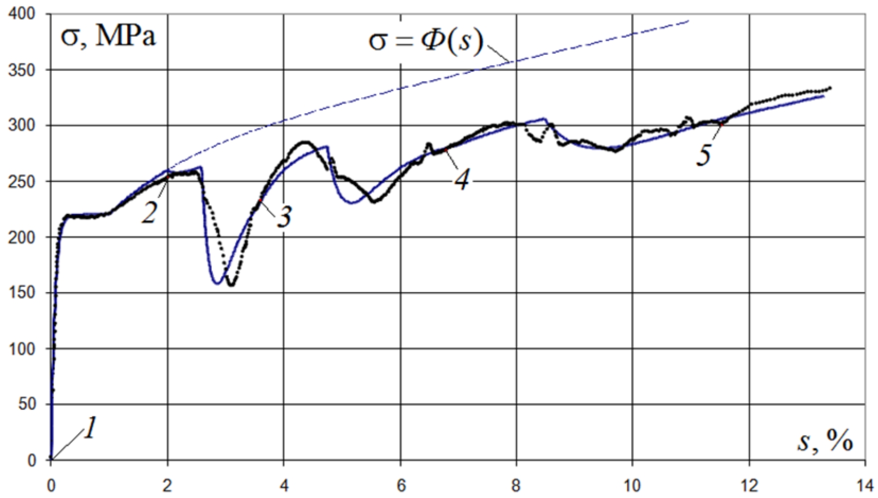

Рисунок 3 – Диаграмма деформирования σ–s

Видно качественное и достаточное для практических расчётов количественное совпадение опытных и расчетных данных по предложенной математической модели для реализованной траектории деформирования, что говорит о правильности моделирования процесса сложного упругопластического деформирования материала. Ранее варианты используемой модели теории процессов использованы для описания процессов деформирования ломаных прямолинейных траекторий [3–4], а также траекторий с криволинейными участками [5–7].

Список использованных источников

1. Зубчанинов, В. Г. Механика процессов пластических сред / В. Г. Зубчанинов. М.: Физматлит, 2010. – 352 с.
2. Ильюшин, А. А. Труды (1946-1966). Т. 2. Пластичность. / А. А. Ильюшин – М.: Физматлит, 2004. – 480 с.
3. Зубчанинов, В. Г. Численное моделирование процессов сложного упругопластического деформирования стали по двузвенным ломаным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А Алексеев, В. И. Гультяев // Проблемы прочности и пластичности. – 2014. – Т. 76. – № 1. – С. 18–25.
4. Зубчанинов, В. Г. Моделирование процессов упругопластического деформирования материалов по многозвенным кусочно-ломаным прямолинейным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гультяев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 3. – С. 203–215. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.12
5. Зубчанинов, В. Г. Математическое моделирование процессов пластического деформирования материалов по сложным плоским траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, Е. Г. Алексеева // Materials Physics and Mechanics (MPM) – Т. 24. – № 2. – 2015. – С. 107–118.
6. Зубчанинов, В. Г. Проверка постулата изотропии и численное моделирование процессов деформирования материалов на сложных гладких траекториях / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, Е. Г. Алексеева // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Т. 29. –№ 2. – С. 150–157.
7. Zubchaninov, V. G. Experimental verification of postulate of isotropy and mathematical modeling of elastoplastic deformation processes following the complex angled nonanalytic trajectories / V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, E. G. Alekseeva, V. I. Gultiaev // Materials Physics and Mechanics. – 2017. Vol. 32. № 3. P. 298-304. DOI: 10.18720/MPM.3232017_10.