

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ 45
ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ТРАЕКТОРИЯМ
ТИПА "ПЛОСКИЙ ВИНТ"^{*)}**

И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов, О.В. Сидорова

Нижний Новгород

Для оценки степени адекватности и определения границ применимости теории пластичности с кинематическим и изотропным упрочнением проведены численные исследования сложного пластического деформирования стали 45 по пространственным четырехзвенным траекториям деформирования типа "плоский винт" и выполнено сравнение полученных численных результатов с данными натурных экспериментов. Показано, что развитая модель качественно и количественно описывает основные эффекты сложного пластического деформирования металлов при произвольных непропорциональных путях термодинамического нагружения.

1. Введение

Изучение закономерностей сложного пластического деформирования конструкционных материалов имеет принципиальное значение для развития фундаментальных основ математической теории пластичности. При значительном количестве экспериментальных работ по исследованию процессов сложного упругопластического деформирования большинство экспериментов выполнено на многозвенных ломаных и плоских криволинейных траекториях постоянной кривизны [1–7]. Экспериментов для сложных траекторий, включая плоские и пространственные траектории деформирования переменной кривизны и кручения, выполнено значительно меньше [6–8]. В то же время для проверки физической достоверности определяющих соотношений теории пластичности необходимо проведение расчетов и сопоставление полученных численных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными на широком классе сложных траекторий деформирования произвольной кривизны и кручения. Результаты таких исследований могут быть также полезны при определении (конкретизации) материальных параметров, скалярных функций и функционалов, входящих в определяющие соотношения термопластичности.

В работах [9, 10] представлена математическая модель термопластичности, описывающая процессы неупругого деформирования металлов и их сплавов для траекторий произвольной кривизны. Ниже дается оценка применимости развитых определяющих соотношений термопластичности путем сопоставления полученных численных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными

^{*)} Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 07-08-13637-офи_ц).

[1] по исследованию закономерностей изменения векторных и скалярных свойств стали 45 на пространственных четырехзвенных траекториях деформирования типа "плоский винт".

2. Сравнение численных результатов с экспериментальными данными

В [1] приведены результаты экспериментальных исследований напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$), закономерностей изменения векторных и скалярных свойств стали 45 на пространственных четырехзвенных траекториях деформирования типа "плоский винт", которые были получены в лабораториях механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе СМ-ЭВМ под общим руководством профессора В.Г. Зубчанинова. Эксперименты были выполнены при нормальной температуре $T=20^\circ\text{C}$ на тонкостенных цилиндрических образцах с длиной рабочей части $l = 110$ мм, толщиной стенки $h = 1$ мм и радиусом срединной поверхности $R = 15,5$ мм, изготовленных из стали 45 в состоянии поставки. Образцы нагружались по заданной программе испытаний осевой силой P , внутренним давлением q и крутящим моментом M . Компоненты тензоров напряжений и деформаций в рабочей части образца вычислялись по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= P/2\pi Rh, & \sigma_{22} &= qR/h, & \sigma_{12} &= M/2\pi R^2 h, & \sigma_{33} &= \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0, \\ e_{11} &= \Delta l/l, & e_{22} &= \Delta R/R, & e_{12} &= \phi R/2l,\end{aligned}\quad (1)$$

где Δl – изменение длины, ϕ – угол закручивания образца.

В опытах измерялись деформации e_{11}, e_{22}, e_{12} и напряжения $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$. Векторы напряжений σ и деформаций ε в трехмерном совмещенном векторном подпространстве девятиаторов с общим неподвижным репером $\{e_k\}$ имеют вид:

$$\sigma = S_k e_k, \quad \varepsilon = \Theta_k e_k \quad (k = 1, 2, 3). \quad (2)$$

Компоненты векторов S_k, Θ_k напряжений σ , деформаций ε и их модули σ, ε вычислялись по формулам:

$$\begin{aligned}S_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}}(\sigma_{11} - \sigma_0) = \sqrt{\frac{2}{3}}\left[\sigma_{11} - \frac{1}{2}(\sigma_{22} + \sigma_{33})\right], \\ S_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_{22} - \sigma_{33}), \quad S_3 = \sqrt{2}\sigma_{12}, \\ \Theta_1 &= \sqrt{\frac{3}{2}}(e_{11} - e_0), \quad \Theta_2 = \sqrt{2}\left(e_{22} + \frac{1}{2}e_{11} - \frac{3}{2}e_0\right), \quad \Theta_3 = \sqrt{2}e_{12}, \\ \sigma &= \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad \varepsilon = \sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_2^2 + \Theta_3^2},\end{aligned}\quad (3)$$

где $e_0 = 1/3(e_{11} + e_{22} + e_{33}), \sigma_0 = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$.

При обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости ($e_0 = 0$) и считалось, что $\sigma_{33} = 0$ [1].

Расчетный анализ процессов деформирования лабораторных образцов с использованием модели термопластичности [9] проводился при следующих материальных

параметрах стали 45: модуль сдвига $G = 76920$ МПа; модуль объемного сжатия $K = 166670$ МПа; начальный радиус поверхности текучести $C_p^0 = 195$ МПа; модули анизотропного упрочнения $g_1 = 8000$ МПа; $g_2 = 80$.

При численном моделировании данных экспериментальных процессов с использованием развитых определяющих соотношений упругопластичности [9, 10] заданными являлись экспериментальные траектории деформаций (закономерности изменения компонент тензора деформации $e_{ij}(t)$), а траектории напряжений находились в результате интегрирования определяющих соотношений термопластичности по заданной истории изменения e_{ij} . Получаемые численные результаты сопоставлялись с экспериментальными данными.

Результаты испытаний, их сравнение с полученными численными результатами приведены на рис. 1–8. На рис. 1 представлена программа испытаний в трехмерном векторном пространстве деформаций $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (жесткое нагружение).

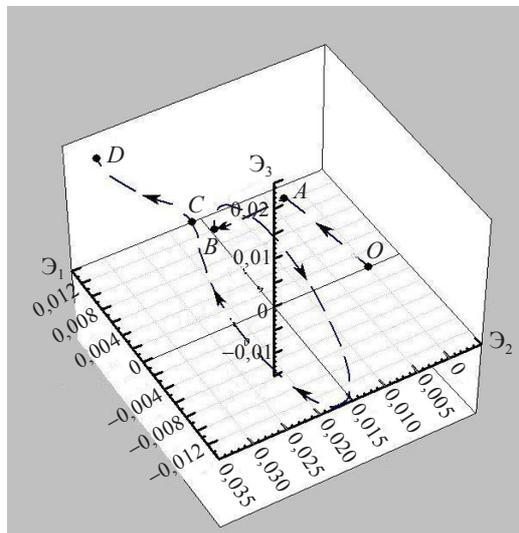


Рис. 1

На рис. 2–4 изображен отклик на программу испытаний в векторном пространстве напряжений (штриховой линией отмечены опытные данные [1]). Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчетных данных. Вместе рис. 1 и рис. 2–4 представляют собой реализованный образ процесса нагружения. На первом этапе образец растягивался до значения $\mathcal{E}_1 = 0,0125$ (точка A на рис. 1–8). Затем траектория деформирования претерпевала излом в точке A на угол 90° в плоскости $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ и с помощью внутреннего давления осуществлялось деформирование вдоль оси \mathcal{E}_2 до значения $\mathcal{E}_2 = 0,014$ (точка B на рис. 1–8) при постоянном значении $\mathcal{E}_1 = 0,0125$. В точке B происходил второй излом траектории деформирования на угол 90° , и последующее деформирование реализовывалось в ортогональной к оси \mathcal{E}_2 плоскости $\mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_1$ по траектории в виде окружности радиуса $R = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_3^2} = 0,0125$. Этот третий участок траектории был условно назван "плоским винтом" [1]. В точке C при завершении окружности происходило изменение траектории деформирования (осуществлялось деформирование кручением при постоянном значении $\mathcal{E}_1 = 0,0125$ до потери устойчивости оболочки (точка D на рис. 1–8)).

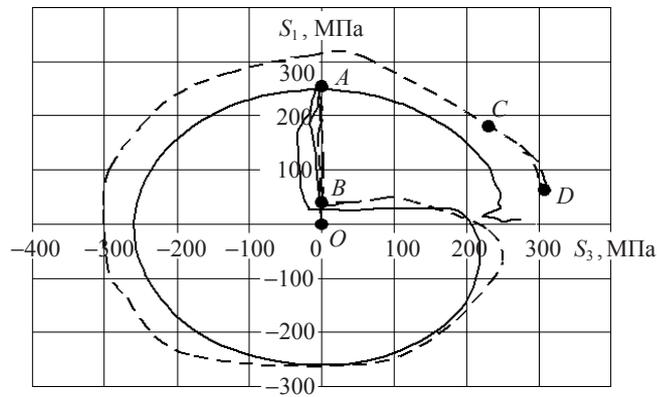


Рис. 2

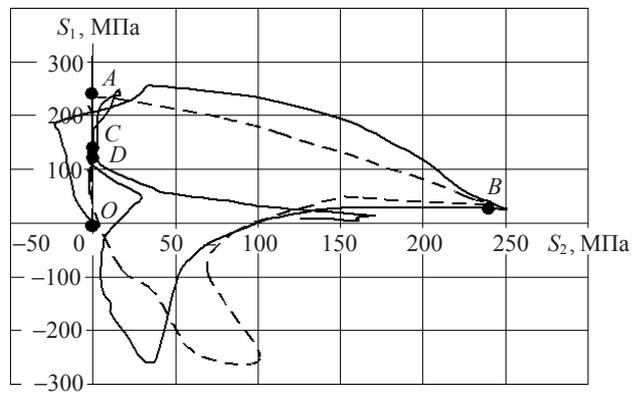


Рис. 3

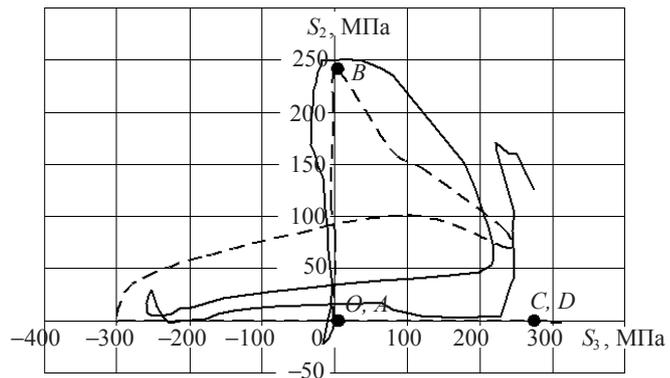


Рис. 4

На рис. 5 представлена "глобальная" диаграмма деформирования σ - ϵ , а на рис. 6-8 - "локальные" диаграммы S_1 - ϵ_1 , S_2 - ϵ_2 , S_3 - ϵ_3 (штриховой линией отмечены опытные данные [1]). Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчетных данных.

В точке A диаграммы деформирования происходил "нырок" (см. рис. 5), после чего реализовывалась частично упругая разгрузка материала, а затем – упруго-пластическое догружение.

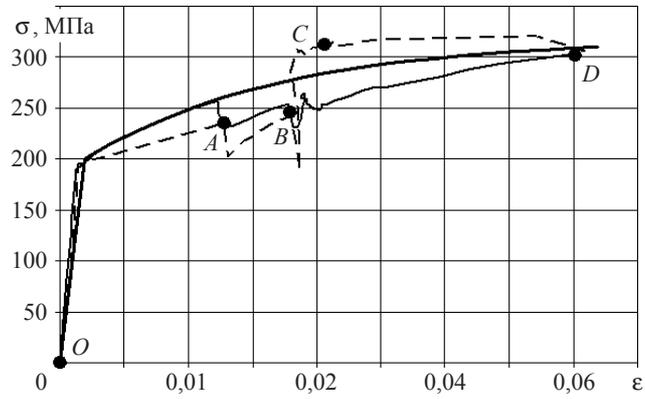


Рис. 5

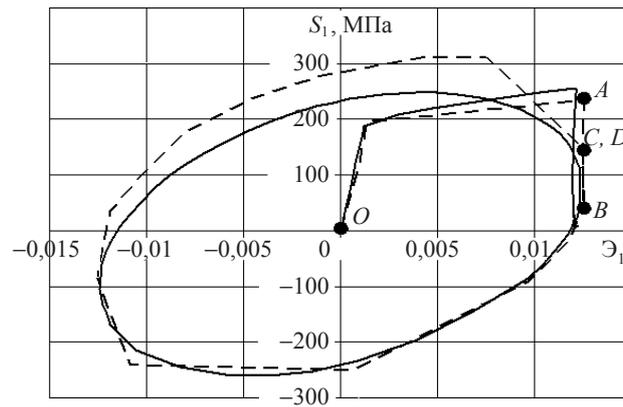


Рис. 6

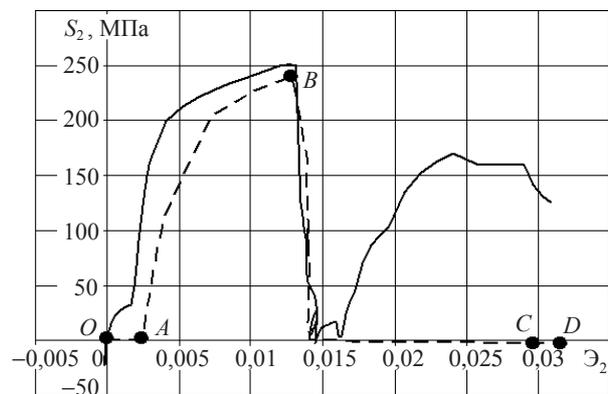


Рис. 7

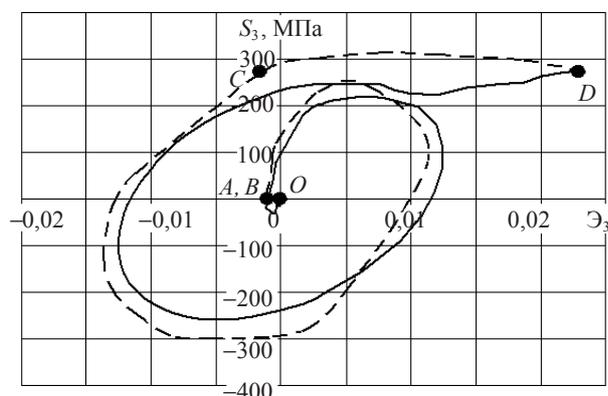


Рис. 8

После второго излома траектории в точке B на "глобальной" диаграмме деформирования (см. рис. 5) наблюдается второй "нырок" и диаграмма деформирования при сложном процессе поднимается выше диаграммы деформирования при одноосном растяжении (жирная линия), что соответствует упрочнению материала и активному процессу упругопластического деформирования.

В целом, сопоставляя полученные численные результаты с экспериментальными данными, можно отметить качественные и количественное совпадение модельных представлений с опытными данными по пространственному деформированию материала [1]. Некоторое отличие расчетных значений от экспериментальных может быть объяснено, например, неточностями при задании физико-механических характеристик материала и тем фактом, что при обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости материала.

3. Заключение

Проведена оценка адекватности определяющих соотношений термопластичности [9, 10] путем сопоставления результатов численных расчетов с опытными данными для сложных пространственных траекторий непропорционального деформирования, которая подтвердила правильность моделирования процессов сложного пластического деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов).

Ключевые слова: теория пластичности, кинематическое и изотропное упрочнение, пластическое деформирование, сталь 45, "плоский винт".

Литература

1. *Зубчанинов, В.Г.* Экспериментальное исследование стали 45 по траекториям типа "плоский винт" / В.Г. Зубчанинов, В.И. Гулятьев, Д.В. Зубчанинов // Современные проблемы прочности, пластичности и устойчивости: Сб. науч. трудов к 75-летию со дня рождения В.Г. Зубчанинова. – Тверь: ТГТУ, 2007. – С. 104–109.
2. *Дегтярев, В.П.* Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций / В.П. Дегтярев. – М.: Машиностроение, 1967. – 131 с.
3. *Жуков, А.М.* Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании / А.М. Жуков // Вопросы теории пластичности. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 30–57.

4. Экспериментальное исследование процессов деформирования стали по двухзвенным траекториям / А.А. Лебедев [и др.] // Проблемы прочности. – 1988. – №3. – С. 7–10.
5. *Ohashi, Y.* Plastic behavior of mild steel along orthogonal trilinear strain trajectory in three-dimensional vector space of strain deviator / Y. Ohashi, E. Tanaka // Trans. of the ASME. – 1981. – V. 103, №4. – P. 287–292.
6. *Зубчанинов, В.Г.* Экспериментальная пластичность. Кн. 1. Процессы сложного деформирования / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гаранников. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.
7. *Зубчанинов, В.Г.* Экспериментальная пластичность. Кн. 2. Процессы сложного нагружения / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гаранников. – Тверь: ТГТУ, 2004. – 184 с.
8. *Завохайко, А.А.* О характеристиках прочности и пластичности при сложных путях нагружения / А.А. Завохайко, Н.С. Можаровский // Проблемы прочности. – 1992. – №1. – С. 90–93.
9. *Коротких, Ю.Г.* Моделирование процессов упругопластического деформирования сталей при сложном нагружении / Ю.Г. Коротких, И.А. Волков, Гордлеева И.Ю. // Устойчивость, пластичность, ползучесть при сложном нагружении: Сб. науч. трудов, посвященных 70-летию В.Г. Зубчанинова. – Тверь: ТГТУ, 2000. – С. 60–65.
10. *Волков, И.А.* Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. – М.: Физматлит, 2008. – 464 с.

[10.09.2008]

NUMERICAL INVESTIGATION OF COMPLEX PLASTIC DEFORMATION PROCESSES OF STEEL 45 ON SPACE TRAJECTORIES OF "PLANE SCREW" TYPE

I.A. Volkov, Yu.G. Korotkikh, I.S. Tarasov, O.V. Sidorova

Numerical investigations of the complex plastic deformation of steel 45 on space four-element deformation trajectories of a "plane screw" type are performed for evaluating an adequacy degree and determining an applicability range of the theory of elasticity with kinematic and isotropic strengthening. The obtained numerical results are compared with the data of the full-scaled experiments. It is shown that the developed model qualitatively and quantitatively describes the main effects of the complex plastic metal deformation during arbitrary non-proportional ways of thermo-power loading.

Key words: theory of plasticity, kinematic and isotropic strengthening, plastic deformation, steel 45, "plane screw".