



УДК 539.3

Адамов Евгений Иванович, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Смирнов Сергей Геннадьевич, магистр кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Максимов Михаил Дмитриевич, магистр кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Ревин Юрий Владимирович, магистр кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Корнишин Денис Олегович, магистр кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Ибрагимов Рустем Талгатович, магистр кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ 45

Ключевые слова: пластическая деформация, численное моделирование, сталь 45

Аннотация. 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 термосилового нагружения.

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 ломанных и плоских криволинейных траекториях постоянной кривизны [2-7]. Экспериментов для сложных траекторий, включая плоские и пространственные траектории деформирования переменной кривизны и кручения, выполнено значительно меньше [6-8]. В тоже время для проверки физической достоверности определяющих соотношений теории пластичности необходимо проведение расчётов 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 [9] приведена математическая модель термопластичности, описывающая процессы неупругого деформирования металлов и их сплавов для траекторий произвольной кривизны.

Ниже проведена оценка применимости развитых определяющих соотношений термопластичности путём сопоставления полученных численных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными [1] по исследованию закономерностей изменения векторных и скалярных свойств стали 45 на пространственных четырёхзвенных траекториях деформирования типа «плоский винт».

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 четырёхзвенных 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 расчётно-экспериментальном комплексе СЧ-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 $l = 110 \text{ мм}$, толщиной стенки $h = 1 \text{ мм}$ и радиусом срединной поверхности $R = 15,5 \text{ мм}$ выполненных 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:

$$\sigma_{11} = P / 2\pi R h, \sigma_{22} = qR / h, \sigma_{12} = M / 2\pi R^2 h, \sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0 \quad (1)$$

$$e_{11} = \Delta l / l, e_{22} = \Delta R / R, e_{12} = \varphi R / 2l$$

где φ - угол закручивания.

В опытах измерялись деформации e_{11} , e_{22} , e_{12} и напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} . Векторы напряжений $\bar{\sigma}$ и деформаций $\bar{\varepsilon}$ в трёхмерном совмещённом векторном подпространстве девиаторов с общим неподвижным репером $\{\bar{e}_k\}$ имеют вид:

$$\bar{\sigma} = S_k \bar{e}_k, \bar{\varepsilon} = \varepsilon_k \bar{e}_k \quad (k=1, 2, 3) \quad (2)$$

Компоненты векторов S_k , ε_k напряжений $\bar{\sigma}$, деформаций $\bar{\varepsilon}$ и их модули σ , ε вычислялись по формулам:

$$S_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} (\sigma_{11} - \sigma_0) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\sigma_{11} - \frac{1}{2} (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \right], S_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (3)$$

$$S_3 = \sqrt{2} \sigma_{12}$$

$$\mathcal{E}_1 = \sqrt{\frac{3}{2}}(e_{11} - e_0), \quad \mathcal{E}_2 = \sqrt{2}\left(e_{22} + \frac{1}{2}e_{11} - \frac{3}{2}e_0\right), \quad \mathcal{E}_3 = \sqrt{2}e_{12}$$

$$\sigma = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad \varepsilon = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 + \mathcal{E}_2^2 + \mathcal{E}_3^2}$$

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

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

Расчётный анализ процессов деформирования лабораторных образцов с использованием модели термопластичности [9] проводился при следующих материальных параметрах стали 45: модуль сдвига $G = 76920 \text{ МПа}$; модуль объёмного сжатия $K = 166670 \text{ МПа}$; начальный радиус поверхности текучести $C_p^0 = 195 \text{ МПа}$; модули анизотропного упрочнения $g_1 = 8000 \text{ МПа}$, $g_2 = 80$.

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

Результат испытаний, их сравнение с полученными численными результатами приведены на рисунках (рис. 1-11).

На (рис. 1-4) представлена программа испытаний в трёхмерном векторном пространстве деформаций $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ (жёсткое нагружение).

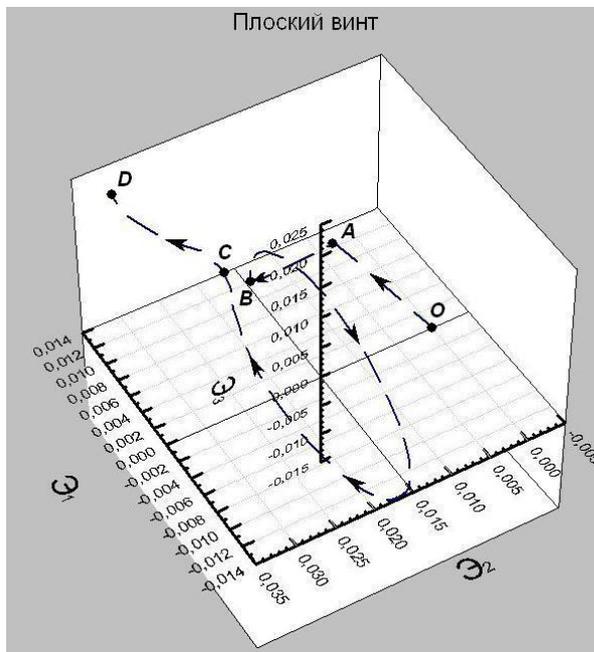


Рис. 1

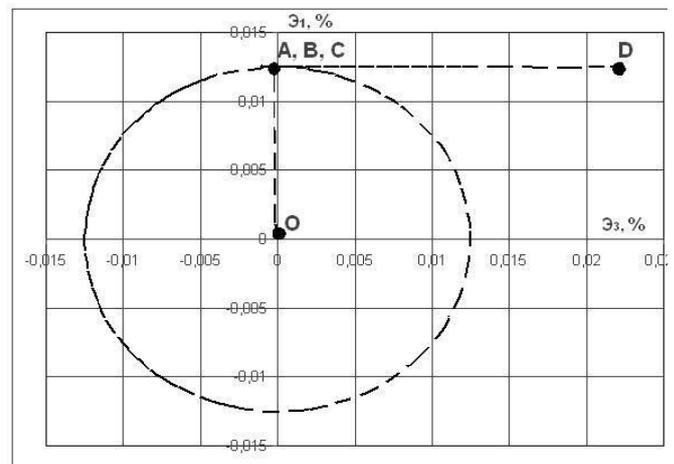


Рис. 2

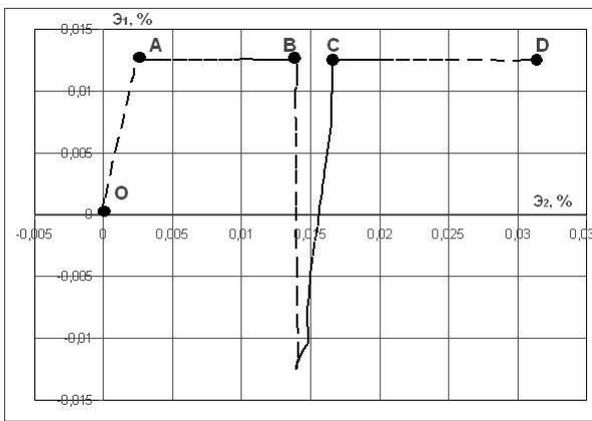


Рис. 3

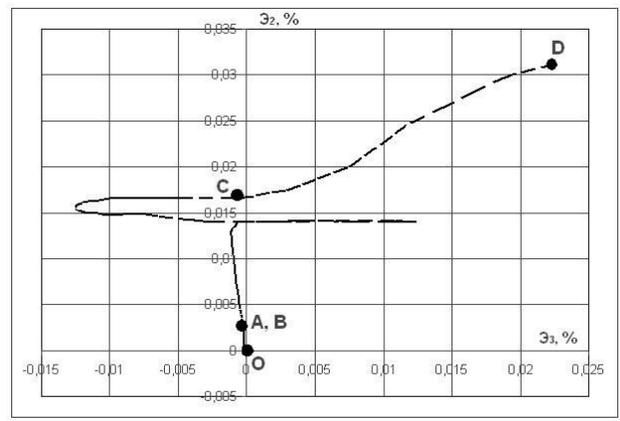


Рис. 4

На (рис. 5-7) изображён отклик на программу испытаний в векторном пространстве напряжений (пунктирной линией отмечены опытные данные [1]). Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчётных данных. Вместе, (рис. 1-4) и (рис. 5-7) представляют собой реализованный образ процесса нагружения.

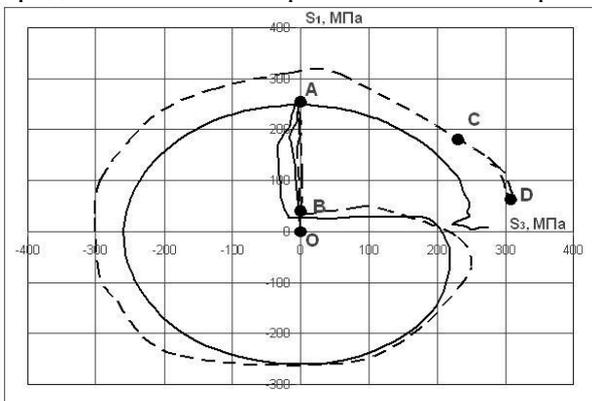


Рис. 5

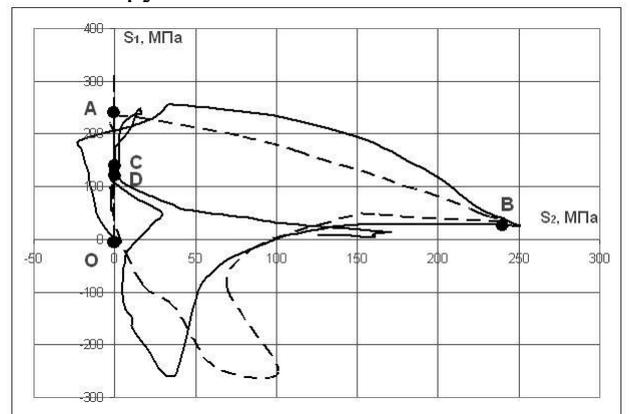


Рис. 6

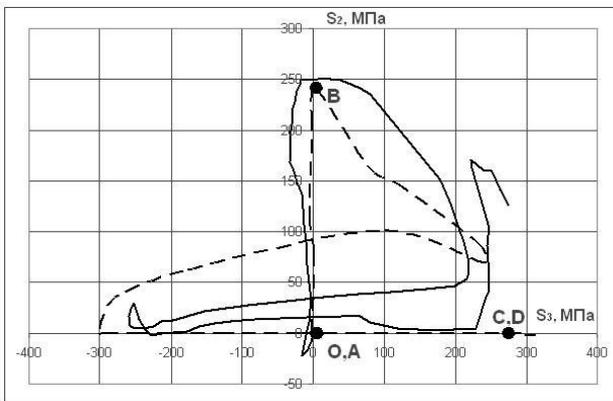


Рис. 7

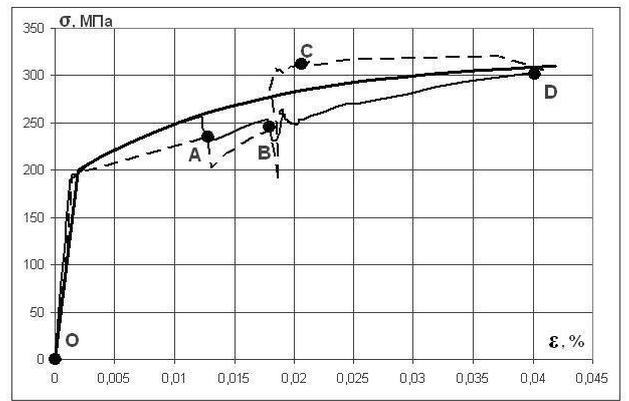


Рис. 8

На первом этапе образец растягивался до значения $\varepsilon_1 = 1,25\%$ (точка А на рис. 1-11). Затем траектория деформирования претерпевала излом в точке А на угол 90° в плоскости $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ и с помощью внутреннего давления осуществлялось деформирование вдоль оси ε_2 до значения $\varepsilon_2 = 1,4\%$ (точка В на рис. 1-11) при постоянном значении $\varepsilon_1 = 1,25\%$. В точке В происходил второй излом траектории деформирования на угол 90° и последующее деформирование реализовывалось в ортогональной к оси ε_2 плоскости $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ по траектории в виде окружности радиуса $R = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2} = 1,25\%$.

Этот третий участок траектории был условно назван «плоским винтом» [1]. В точке С при завершении окружности происходило изменение траектории деформирования (осуществлялось деформирование кручением при постоянном значении $\mathcal{E}_1 = 1,25\%$ до потери устойчивости оболочки (точка D на рис. 1-11)).

На рис. 8 представлена «глобальная» диаграмма деформирования $\sigma - \varepsilon$, а на рис. 9-11 «локальные» диаграммы $S_1 - \mathcal{E}_1$, $S_2 - \mathcal{E}_2$, $S_3 - \mathcal{E}_3$ (пунктирной линией отмечены опытные данные [1]). Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчётных данных.

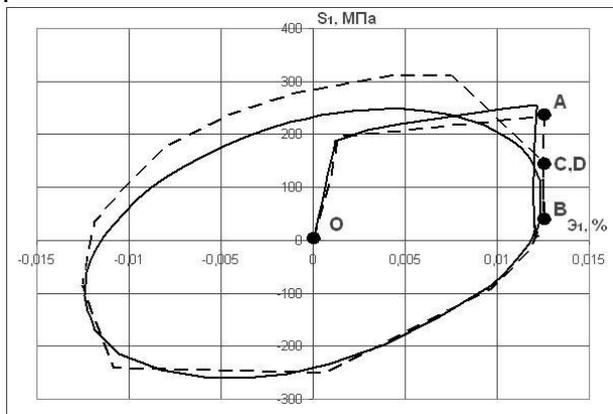


Рис. 9

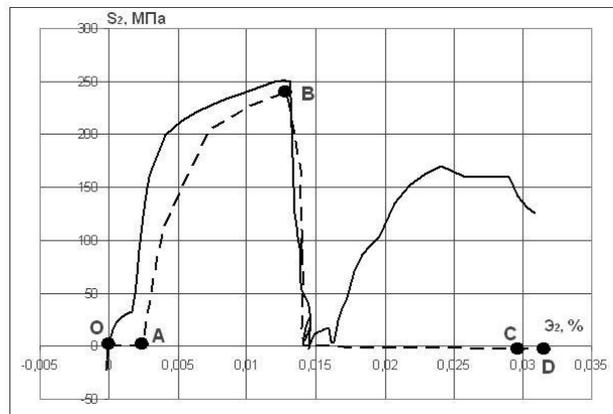


Рис. 10

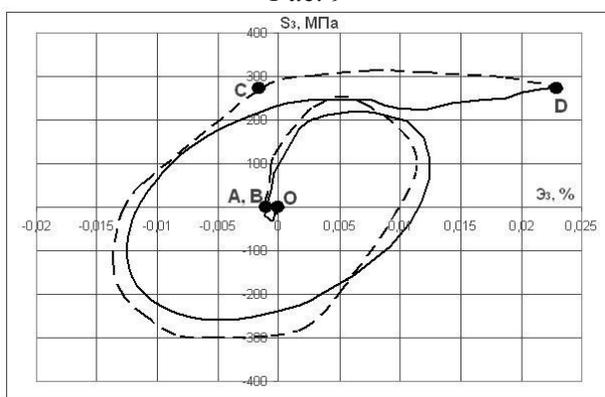


Рис. 11

В точке А диаграммы деформирования происходил «нырок» (рис. 8), после чего реализовывалось частично упругая разгрузка материала и упругопластическое догружение.

После второго излома траектории в точке В на «глобальной» диаграмме деформирования (рис. 8) 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, анализируя полученные численные результаты в сравнении с экспериментальными данными, можно отметить качественные и количественные совпадения модельных представлений с опытными данными [1] по пространственному деформированию материала. Некоторое отличие расчётных значений от экспериментальных данных может быть объяснено, например, неточностями при задании физико-механических характеристик материала, и тем фактом, что при обработке экспериментальных данных принималось условие несжимаемости материала.

Заключение.

Проведена оценка адекватности определяющих соотношений термопластичности [9] путём сопоставления результатов численных экспериментов с опытными данными для

сложных пространственных траекторий непропорционального деформирования, которая подтвердила правильность моделирования процессов сложного пластического деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов).

Список литературы.

- [1] Зубчанинов В.Г, Гультяев В.И., Зубчанинов Д.В. Экспериментальное исследование стали 45 по траекториям типа «плоский винт» // Современные проблемы прочности, пластичности и устойчивости: сборник статей к 75-летию со дня рождения В.Г. Зубчанинова. Тверь: ТГТУ, 2007. С.104-109.
- [2] Дегтярёв В.П. Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций. М.: Машиностроение, 1967. 131с.
- [3] Жуков А.М. Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании // Вопросы теории пластичности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С.30-57.
- [4] Экспериментальное исследование процессов деформирования стали по двухзвенным траекториям / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук, Н.М. Кульчиукий, А.Ф. Хакимов // Проблемы прочности. 1988 №3 С.7-10.
- [5] Ohashi Y., Tanaka E. Plastic behavior of mild steel along orthogonal trilinear strain trajectory in free-dimensional vector space of strain deviator // Transactions of the ASME. Oct. 1981. V. 103. №4. P. 287-292.
- [6] Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Гаранников В.В. Экспериментальная пластичность. Книга 1. Процессы сложного деформирования. Тверь: ТГТУ, 2003.- 172с.
- [7] Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Гаранников В.В. Экспериментальная пластичность. Книга 2. Процессы сложного нагружения. Тверь: ТГТУ, 2004.- 184с.
- [8] Завохайко А.А., Можаровский Н.С., О характеристиках прочности и пластичности при сложных путях нагружения // Проблемы прочности. 1992. №1. С.90-93.
- [9] Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. 464 с.

NUMERICAL STUDY OF PROCESSES OF COMPLEX PLASTIC DEFORMATION OF STEEL 45

Evgeniy I. Adamov, Sergey G. Smirnov, Maksim D. Maksimov, Yriy V. Revin, Denis O. Kornishin, Rustem T. Ibragimov,

Keywords: plastic deformation, numerical modeling, steel 45

To assess the degree of adequacy and determine the limits of applicability of the theory of plasticity with kinematic and isotropic hardening, numerical studies of the complex plastic deformation of steel 45 on the spatial four-link deformation trajectories of the "flat screw" type were carried out and the numerical results were compared with the data of field experiments. It is shown that the developed model qualitatively and quantitatively describes the main effects of complex plastic deformation of metals under arbitrary disproportionate ways of thermal force loading.