

УДК 539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ 45 ПО ПЛОСКИМ ДВУХЗВЕННЫМ ЛОМАНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ ТИПА ВЕЕРА\*

© 2014 г. Коротких Ю.Г., Волков И.А., Волков А.И., Тарасов И.С.

*Волжская государственная академия водного транспорта,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmpmvgavt@yandex.ru

*Поступила в редакцию 03.11.2014*

Приведены расчеты процесса деформирования по двухзвенным ломаным траекториям типа веера (растяжение с кручением) с использованием теории течения с трансляционно-изотропным упрочнением. Результаты теоретических расчетов сравниваются с экспериментальными результатами. Получено качественное и приемлемое для инженерных расчетов количественное совпадение опытных данных и модельных представлений.

*Ключевые слова:* моделирование, пластичность, сложное нагружение, двухзвенные траектории деформирования, теория течения, материальные параметры, базовый эксперимент.

### **Введение**

Исследования закономерностей упругопластического деформирования конструкционных материалов (металлов и их сплавов) имеют принципиальное значение для развития фундаментальных основ теории пластичности. Несмотря на значительное количество работ по исследованию упругопластических процессов, большинство экспериментов выполнено при простом упругопластическом нагружении. Экспериментов на сложное нагружение выполнено в настоящее время значительно меньше [1–3]. В то же время для проверки физической достоверности определяющих соотношений теории пластичности необходимо проведение расчетов и сопоставление полученных численных результатов с экспериментальными данными на широком классе сложных траекторий деформирования. Результаты таких исследований могут быть использованы при определении (конкретизации) материальных параметров, скалярных функций и функционалов, входящих в определяющие соотношения термопластичности.

В настоящей статье приведены расчеты процесса деформирования образцов по двухзвенным ломаным траекториям типа веера (растяжение с кручением) с использованием теории течения с трансляционно-изотропным упрочнением [4]. Результаты теоретических расчетов сравниваются с экспериментальными результатами, приведенными в [3].

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-00204-а).

## 1. Моделирование базового эксперимента

По результатам экспериментальных исследований [3] с использованием экспериментально-теоретической методики [4, 5] были получены основные физико-механические характеристики, материальные параметры и скалярные функции теории течения с трансляционно-изотропным упрочнением для стали 45 с площадкой текучести: модуль объемного сжатия  $K$ , модуль сдвига  $G$ , начальное значение радиуса поверхности текучести  $C_p^0$ , модули анизотропного упрочнения  $g_1$  и  $g_2$ , модули изотропного упрочнения  $q_1$  и  $q_2$  (табл. 1, 2).

Таблица 1

Физико-механические характеристики стали 45	$T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
$K$ , МПа	168500
$G$ , МПа	78500
$C_p^0$ , МПа	305
$g_1$ , МПа	18600
$g_2$	220
$q_1$	$q_\chi$ (см. табл. 2)
$q_2$	0

Таблица 2

$\chi_m$	0	0,004	0,008	0,012	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
$q_\chi$ , МПа	-21250	-9450	-1750	6100	5050	2200	1800	1630	1370

Здесь  $\chi_m$  – длина траектории пластического деформирования на монотонных участках, а  $q_\chi = q_\chi(\chi_m, T)$  – модуль изотропного упрочнения при пропорциональном (лучевом) нагружении.

С использованием полученных механических характеристик было осуществлено численное моделирование базового эксперимента по растяжению-сжатию лабораторных образцов из стали 45. В таблице 3 приведены значения напряжений и радиуса поверхности текучести, полученные экспериментально [3] и с помощью численного моделирования [4].

Таблица 3

$e_{11}^p$	Расчет		Эксперимент	
	$\sigma_{11}$ , МПа	$C_p$ , МПа	$\sigma_{11}$ , МПа	$C_p$ , МПа
0	377	305,0	368	300,5
0,0005	383	298,0	416	300,7
0,0020	382	271,0	418	284,4
0,0050	380	237,6	419	264,8
0,0080	392	232,6	420	257,4
0,0097	398	231,4	421	251,7
0,0110	409	235,6	438	263,1
0,0140	449	265,7	467	286,0
0,0200	491	296,7	506	317,0
0,0260	530	327,3	533	337,4
0,0350	584	373,0	562	360,0
0,0410	623	402,1	582	376,3
0,0467	658	431,6	603	393,4

Анализируя полученные результаты, можно отметить качественное и приемлемое для инженерных расчетов количественное совпадение модельных представлений с опытными данными. Полученное расхождение (не более 10%) сопоставимо с разбросом экспериментальных данных. Следует также отметить, что материальные параметры и скалярные функции модели термопластичности [4], определенные из экспериментов по растяжению-сжатию лабораторных образцов, совпадают с соответствующими параметрами, определенными из экспериментов на знакопеременное кручение [6] (величина отклонения составляет не более 5%), что говорит об однозначности определения материальных параметров и правильности моделирования сложного пластического деформирования конструкционных сталей.

## 2. Моделирование напряженного состояния образца при изломе траекторий деформирования

На рис. 1 представлена программа деформирования тонкостенных трубчатых образцов из стали 45 с площадкой текучести [3] в векторном пространстве деформаций на плоскости  $e_{11} \sim e_{12}$ . Излом траекторий деформирования по лучам типа веера происходил под углом  $90^\circ$  (траектория 2),  $143^\circ$  (траектория 3),  $153^\circ$  (траектория 4),  $180^\circ$  (траектория 5).

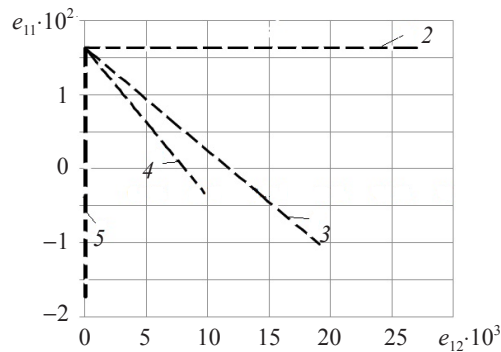


Рис. 1

После излома траектории под углом  $90^\circ$  образец подвергался кручению, после излома траекторий под углами  $143^\circ$ ,  $153^\circ$  — сложной упругой разгрузке после растяжения с кручением, а после излома траектории под углом  $180^\circ$  — чистому знакопеременному нагружению с упругой разгрузкой. Угол излома  $0^\circ$  соответствовал диаграмме растяжения материала. На базе теории пластического течения с трансляционно-изотропным упрочнением численно построены траектории напряжений по заданным экспериментальным траекториям деформаций (см. рис. 1). На рис. 2 представлен соответствующий отклик в пространстве напряжений  $\sigma_{11} \sim \sigma_{12}$ . На рис. 3 представлены диаграммы сложного пластического деформирования материала  $\sigma_{ii} - e_{ii}$ , где  $e_{ii}$  — интенсивность деформаций. Здесь штриховыми линиями обозначены результаты эксперимента, а сплошными линиями — результаты расчета.

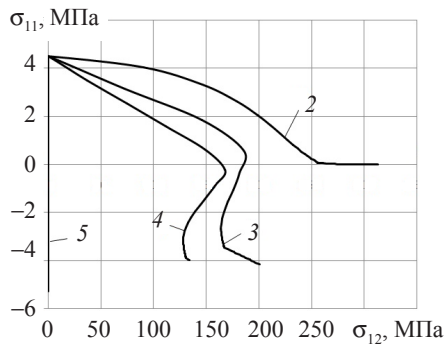


Рис. 2

онно-изотропным упрочнением численно построены траектории напряжений по заданным экспериментальным траекториям деформаций (см. рис. 1). На рис. 2 представлен соответствующий отклик в пространстве напряжений  $\sigma_{11} \sim \sigma_{12}$ . На рис. 3 представлены диаграммы сложного пластического деформирования материала  $\sigma_{ii} - e_{ii}$ , где  $e_{ii}$  — интенсивность деформаций. Здесь штриховыми линиями обозначены результаты эксперимента, а сплошными линиями — результаты расчета.

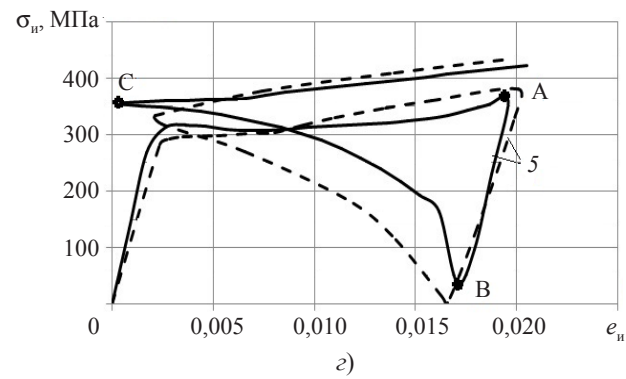
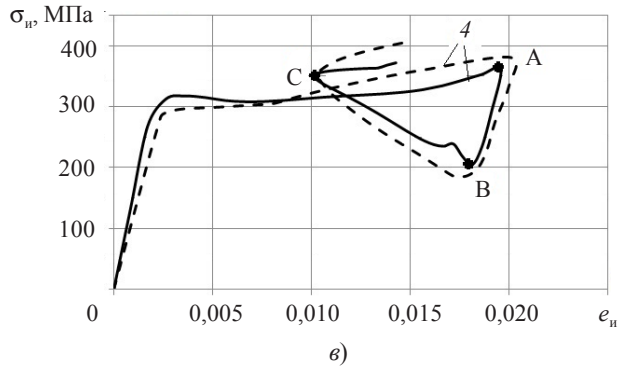
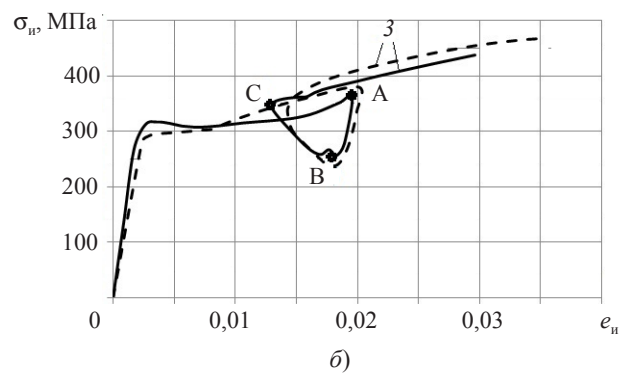
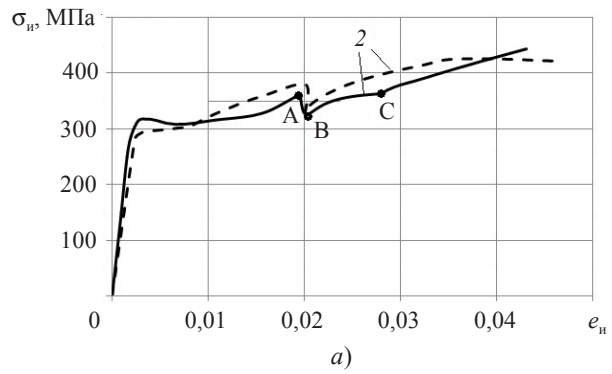


Рис. 3

Для расчета использовались физико-механические характеристики и материальные параметры стали 45 с площадкой текучести, приведенные в таблицах 1, 2.

После излома траекторий при соответствующих уровнях напряжений имели место «нырки» на диаграммах (точки А, В, С на рис. 3), величина которых зависит от угла излома траектории деформирования. Ниспадающая часть «нырка» соответствует сложной упругой разгрузке до минимального значения напряжений, при котором происходит «протыкание» поверхности текучести и возникают вторичные пластические деформации. На восходящей ветке нырка продолжается упругая разгрузка по механизму растяжения-сжатия, но происходит активное пластическое деформирование по механизму кручения, что и является причиной прекращения частичной упругой разгрузки материала.

Видно качественное и приемлемое для инженерных расчетов количественное совпадение опытных и модельных представлений для плоских траекторий деформирования типа веера по теории пластического течения с трансляционно-изотропным упрочнением [4], что говорит о правильности моделирования процесса сложного нагружения материала.

#### *Список литературы*

1. *Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л., Гаранников В.В.* Экспериментальная пластичность. Процессы сложного деформирования. Книга 1. Тверь: ТГТУ, 2003. 172 с.
2. *Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л., Гаранников В.В.* Экспериментальная пластичность. Процессы сложного нагружения. Книга 2. Тверь: ТГТУ, 2004. 184 с.
3. *Зубчанинов В.Г.* Устойчивость и пластичность. В 2 т. Т. 2. Пластичность М.: Физматлит, 2008. 336 с.
4. *Волков И.А., Коротких Ю.Г.* Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
5. *Волков И.А., Коротких Ю.Г., Шишулин Д.Н.* Принципы и методы определения скалярных материальных параметров теории пластического течения с кинематическим и изотропным упрочнением // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3, №3. С. 46–57.
6. *Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н.* Моделирование процесса упругопластического деформирования стали 45 по двухзвенным ломаным траекториям // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т, 2014. Вып. 76. Ч. 2. С. 77–85.

#### *References*

1. *Zubchaninov V.G., Okhlopkov N.L., Garannikov V.V.* Eksperimentalnaya plastichnost. Protssesy slozhnogo deformirovaniya. Kniga 1. Tver: TGTU, 2003. 172 s.
2. *Zubchaninov V.G., Okhlopkov N.L., Garannikov V.V.* Eksperimentalnaya plastichnost. Protssesy slozhnogo nagruzheniya. Kniga 2. Tver: TGTU, 2004. 184 s.
3. *Zubchaninov V.G.* Ystoichivost i plastichnost. V 2 t. T. 2. M.: Fizmatlit, 2008. 336 s.
4. *Volkov I.A., Korotkikh Yu.G.* Uravnenia sostoynia vazkouprugoplasticheskikh sred s povrejdeniyami. M.: Fizmatlit, 2008. 424 s.
5. *Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Shishulin D.N.* Principy i metody opredelenia skalnykh parametrov teorii plasticheskogo techeniya s kinematischeskim i isotropnym uprochneniem // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. 2010. T. 3, №3. S. 46–57.
6. *Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S., Shishulin D.N.* Modelirovanie processa uprugoplasticheskogo deformirovaniya stali 45 po dvuchzvennykh lomanykh traektoriyam // Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhvuz. sb. / Nizhegorod. un-t, 2014. Vyp. 76. Ch. 2. S. 77–85.

**SIMULATION A PROCESSES OF COMPLEX PLASTIC DEFORMATION STEEL 45  
ON TWO-LINK BROKEN TRAJECTORIES OF FAN**

**Korotkikh Yu.G., Volkov I.A., Volkov A.I., Tarasov I.S.**

The results of analyzing the deformation process along "fan-type" two-part broken trajectories (tension with twisting), using the flow theory with translational-isotropic hardening, are presented. The results of the theoretical analyses are compared with experimental ones. Qualitative and applicable for engineering analyses quantitative agreement between experimental results and the results of modeling is achieved.

*Keywords:* modeling, plasticity, complex loading, two-tier deformation path, flow theory, material parameters, basic experiment.