

И.С. Тарасов
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

1. Введение. В настоящее время становится актуальной проблема расчётной оценки совместных процессов деформирования и разрушения для ответа на вопрос: где и в какой момент времени при заданной истории изменения нагрузки и температуры в теле впервые, возникнут макроскопические трещины и как эти трещины будут развиваться в дальнейшем? Поскольку процессы накопления повреждений тесно связаны с кинетикой НДС, то точность расчётных оценок прочности и ресурса конструктивных элементов будет зависеть от того, насколько данные уравнения состояния адекватно описывают кинетику НДС в заданных условиях эксплуатации. Такие параметры процесса вязкопластического деформирования, как длина и вид траектории деформирования, вид напряжённого состояния, история его изменения и другие, существенно влияют на скорости протекания процессов накопления повреждений. Можно сказать, что в настоящее время развитие уравнений состояния и, в частности, уравнений термовязкопластичности, должно определяться потребностями механики разрушения и должно быть направлено на описания основных эффектов, существенно влияющих на скорости процессов накопления повреждений. Цель исследований в данной области – не столько уточнение различных формулировок, необходимых для определения макроскопических деформаций по заданной истории нагружения, сколько стремление разобраться в основных закономерностях процессов определяющих и подготавливающих разрушение.

Исследование закономерностей вязкоупругопластического деформирования конструкционных материалов имеет принципиальное значение и для развития фундаментальных основ теории пластичности. Несмотря на общее значительное количество работ по исследованию закономерностей упругопластического деформирования материалов при сложном нагружении, большинство экспериментов выполнено для монотонных процессов по многозвенным ломанным и плоским криволинейным траекториям деформирования постоянной кривизны [1–6]. Экспериментов для сложных траекторий, включая плоские и пространственные траектории переменной кривизны и кручения, экспериментов на сложное циклическое деформирование материалов выполнено в настоящее время значительно меньше [5–7, 12, 13]. В то же время для проверки физической достоверности определяющих соотношений теории пластичности необходимо проведение расчётов по развитым модельным представлениям и сопоставление полученных численных результатов с экспериментальными данными на широком классе сложных траекторий деформирования произвольной кривизны и кручения при монотонных и циклических режимах нагружения.

Результаты таких исследований могут быть также использованы при конкретизации скалярных функций и функционалов, входящих в определяющие соотношения термовязкопластичности.

К настоящему моменту выполнено много экспериментальных исследований по циклическому одноосному деформированию конструкционных материалов. Эксперименты свидетельствуют о их сложном циклическом поведении. Например, при жёстком деформировании с постоянной амплитудой деформации, как правило, в начале наблюдается переходная стадия циклического упрочнения или разупрочнения материала, после которой для некоторых сталей наблюдается стационарирование петли гистерезиса. При изменении амплитуды вновь возникает переходная стадия, а затем ста-

ционирование петли происходит относительно нового значения [12, 13, 15–19]. Экспериментальные исследования показывают, что непропорциональное циклическое деформирование существенно отличается от пропорционального и эти процессы нельзя описать, пользуясь экспериментальными результатами одноосных или пропорциональных нагружений [12, 13, 17–19].

В работе [12] приведены результаты экспериментов по циклическому нагружению тонкостенных трубчатых образцов из стали 316 (растяжение – сжатие и знакопеременное кручение) по квадратной и круговой траекториям. Показано, что циклическое упрочнение для круговой и квадратной траектории превосходит упрочнение при одноосном-растяжении сжатии уже на 20-м цикле при той же амплитуде эквивалентных деформаций равной 0,1 %.

Аналогичные экспериментальные исследования показали [5, 13, 17], что материал почти не проявляющий свойства упрочнения при пропорциональном деформировании, заметно упрочняется при непропорциональном вследствие развития микроскопических механизмов преобразования структуры материала.

Эксперименты изложенные в [5, 6] пересчитывались с использованием математической модели термопластичности, описывающей основные эффекты сложного пластического деформирования металлов при монотонных и циклических непропорциональных путях термосилового нагружения [8].

2. Сравнение численных результатов с экспериментальными данными. Для более полного экспериментального обоснования и проверки физической достоверности определяющих соотношений теории пластичности необходима постановка экспериментов с максимально широким диапазоном изменения кривизны траектории в пределах одного опыта. Особый интерес представляют опыты по изучению процессов циклического деформирования материала и связанных с этим закономерностей изменения их скалярных и векторных свойств. Таким образом, постановка экспериментов по сложному циклическому нагружению материалов, численный анализ этих процессов является весьма актуальными.

Эксперименты были выполнены при нормальной температуре $T=20$ °C на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках, имеющих толщину стенки $h = 1$ мм, радиус срединной поверхности $R = 15$ мм и длину рабочей части $l = 6R = 90$ мм. Материал образцов сталь 40X16H9Г2С.

При проведении испытаний в пространстве напряжений на комплексе СН-ЭВМ [5, 6] диапазон изменения скоростей нагружения составлял $\dot{\epsilon} = 0,02 - 0,1$ МПа/с.

Образцы нагружались по заданной программе испытаний осевой силой P , внутренним давлением интенсивности q и крутящим моментом M . Компоненты тензоров напряжений и деформаций в рабочей части образца вычислялись по формулам:

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

$$\sigma = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22}), \quad e_{11} = \Delta l/l, \quad e_{22} = \Delta R/R, \quad e_{12} = \varphi R/2l$$

где φ – угол закручивания.

Физико-механические характеристики и материальные параметры модели термопластичности для стали 40X16H9Г2С приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Физико-механические параметры стали 40X16H9Г2С при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

K (МПа)	116789
G (МПа)	60220
E (МПа)	154162
α (1/град)	0,0000166
C_p^0 (МПа)	150
g_1 (МПа)	25500
g_2	300
a	15

Таблица 2

Значения модуля монотонного упрочнения q_1 (МПа) стали 40X16H9Г2С при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

χ	0	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,012	0,015	0,018	0,021	0,023	0,3	0,4
q_1	-3000	-500	200	600	700	800	900	950	1000	1000	1000	1000	985	750	0

Таблица 3

Значения модуля циклического упрочнения $Q_1(\rho_{\max})$ (МПа) стали 40X16H9Г2С при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

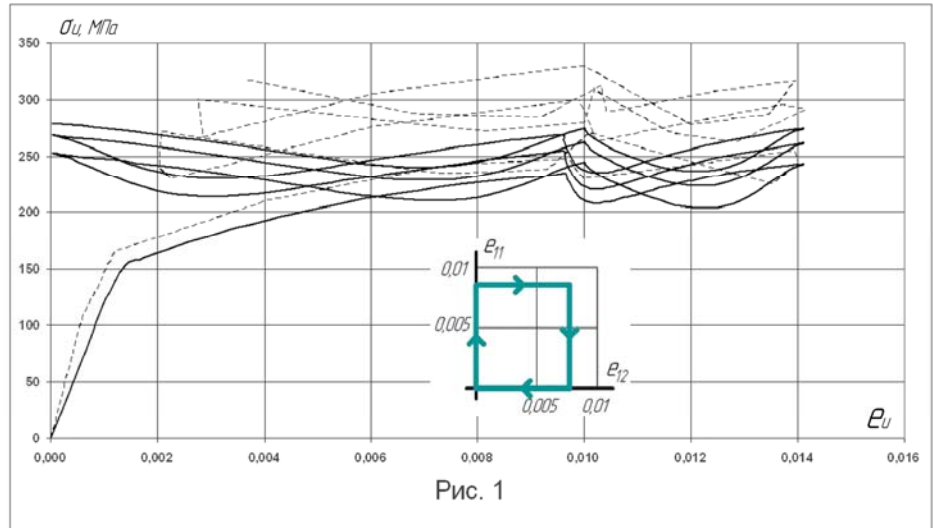
ρ_{\max}	0	32,09	50	54,5	66,38	73,6	81,4	96,1	100	104,5	112,8	147	150
Q_1	195,1	204,7	210,1	211,5	215	217,2	220,5	226,7	228,4	230,3	272,6	300	300

При численном моделировании экспериментальных процессов с использованием развитой модели термопластичности заданными являлись экспериментальные траектории деформаций (закономерности изменения компонент тензора деформаций $e_{ij}(t)$), а траектории напряжений получались в результате интегрирования определяющих соотношений термопластичности по заданной истории изменения e_{ij} («жёсткое нагружение»).

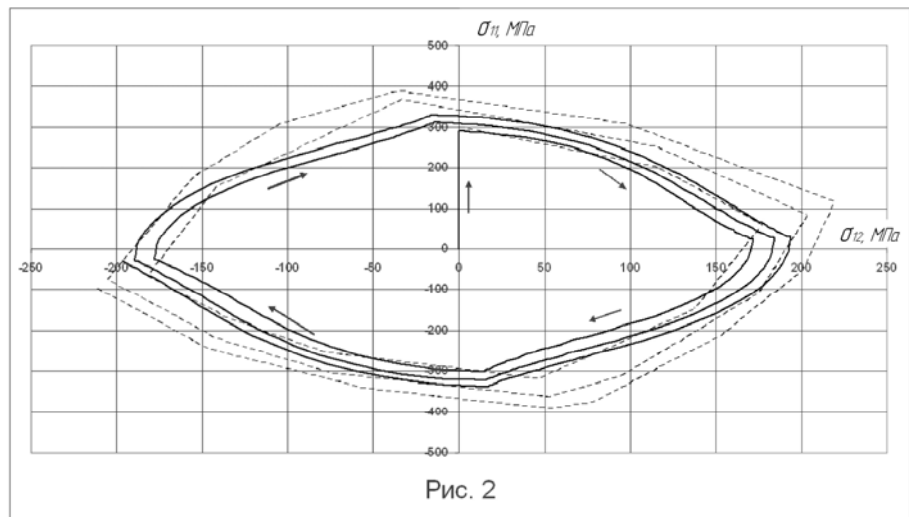
Полученные численные результаты сопоставлялись с экспериментальными данными.

Одним из вариантов упрочнения материалов является циклическое деформирование по замкнутым многозвенным ломаными траекториям. Причём достигаемая степень

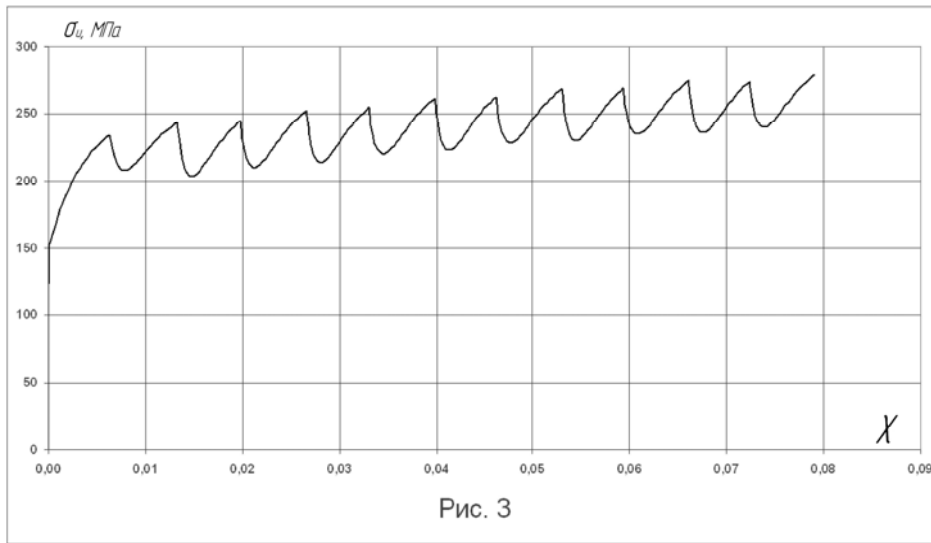
упрочнения материала, как показывают опыты [5], зависит не только от параметров процесса деформирования, но и от свойств самого материала. На рис. 1 показана диаграмма сложного деформирования материала (зависимость интенсивности тензора напряжений σ_u от интенсивности тензора деформаций e_u), а на рис. 2 траектория напряжений, соответствующая реализованной в пространстве деформаций четырёхзвенной замкнутой ломаной траектории деформирования. Осуществлено три полных цикла нагружения. Пунктирной линией отмечены опытные данные [5], а сплошной – численные результаты, полученные с помощью развитых определяющих соотношений. Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчётных данных.



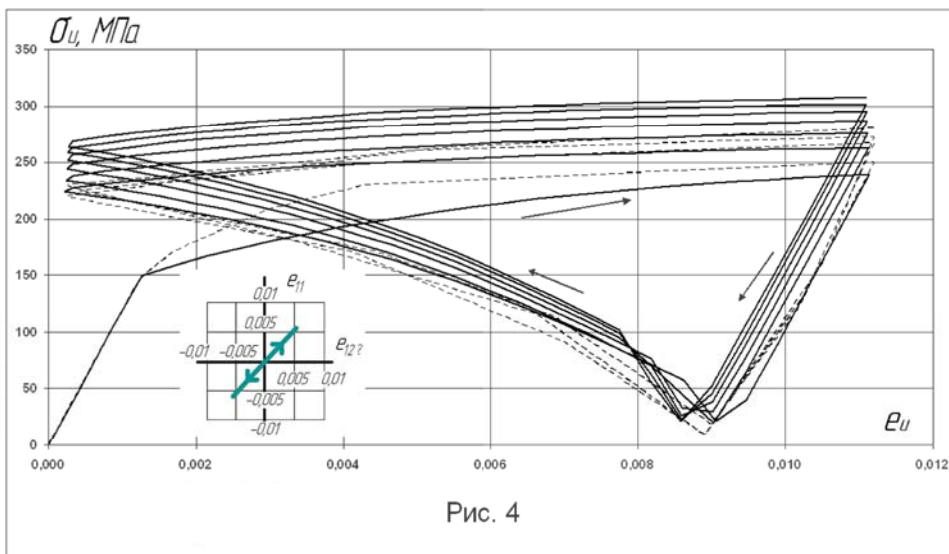
Как видно из рис. 1 в конце третьего цикла стабилизации параметров напряжённого состояния всё же не произошло. При этом в начале второго звена третьего цикла увеличения модуля вектора напряжений составило 34% по сравнению с его значением в начале второго участка первого этапа нагружения.

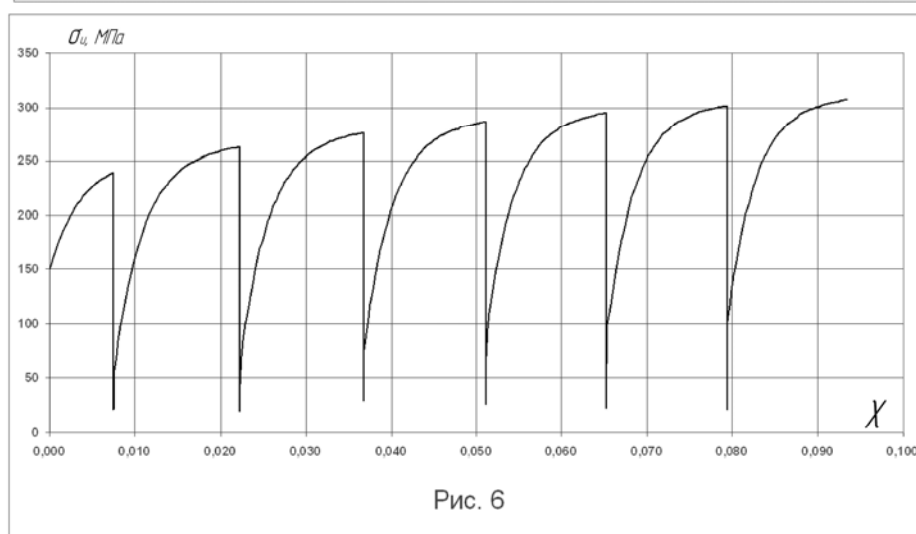
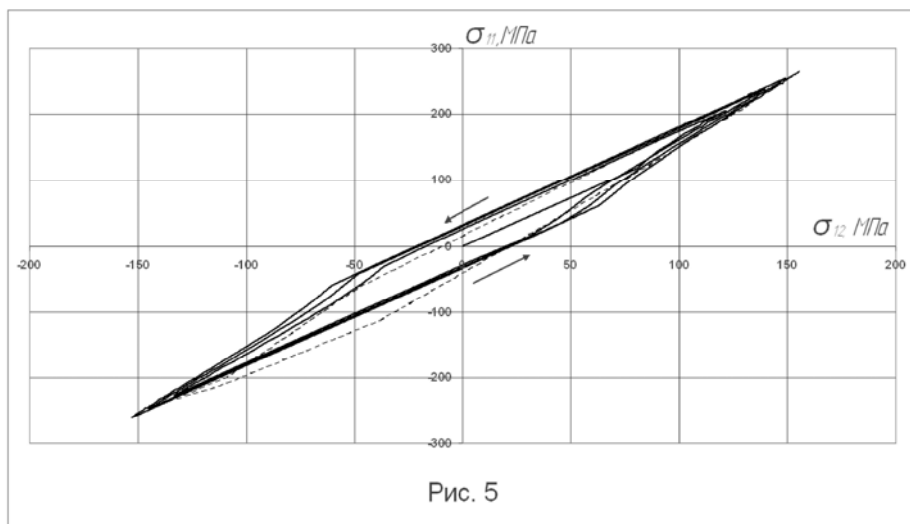


На рис. 3 представлена зависимость σ_u от длины траектории пластического деформирования материала χ .

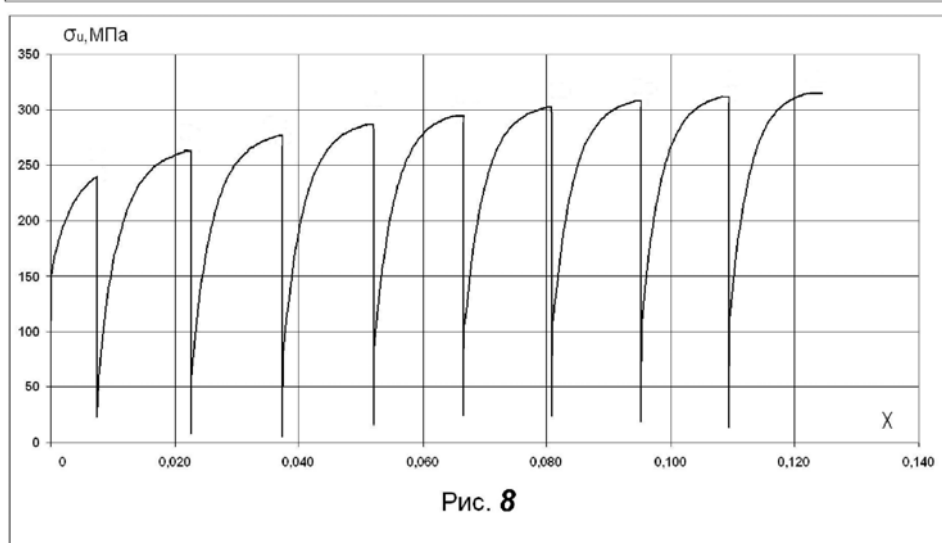
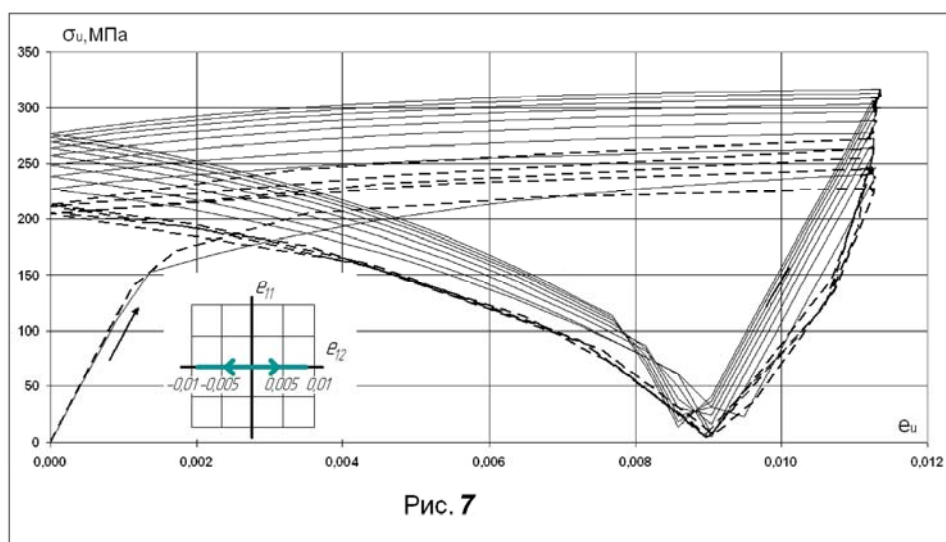


При пропорциональном деформировании данного материала с углом наклона 45° в плоскости $e_{11} - e_{12}$ (рис. 4–6) при аналогичном максимальном модуле вектора деформаций упрочнение после трёх циклов составило 12%. Причём, как видно из представленных рисунков во втором и третьем примерах стабилизация параметров напряжённого состояния происходит практически при в конце второго цикла нагружения.





В тоже время деформирование данного материала по замкнутым траекториям пропорционального деформирования (рис. 7,8) с углами излома 180° (знакопеременное кручение) приводит к существенно меньшему упрочнению. Сопоставление величин модуля вектора напряжений в одинаковых по значениям деформаций точкам на первом и четвёртом циклах показало, что упрочнение составило 17% (в два раза меньше чем в первом случае).



Таким образом, деформирование по плоским замкнутым траекториям непропорционального нагружения можно рекомендовать в качестве эффективного варианта упрочнения для конструкционных материалов.

4. Заключение. Представлен вариант математической модели для расчёта параметров процессов сложного пластического деформирования конструкционных материалов при монотонных и циклических путях комбинированного термосилового нагружения. Данная модель позволяет учитывать упрочнение материала при монотонном и циклическом непропорциональном деформировании материала. Проведена оценка адекватности определяющих соотношений термопластичности путём сопоставления результатов численных экспериментов с экспериментальными данными для траекторий непропорционального деформирования, которая подтвердила правильность моделирования процессов циклического упругопластического деформирования.

Список литературы:

[1] Дегтярев В.П. Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций. – М.: Машиностроение, 1967. – 131 с.

- [2] Жуков А.М. Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании. – Вопросы теории пластичности. – М.: АН СССР, 1961. – с. 30–57.
- [3] Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Кульчицкий Н.М. Экспериментальное исследование процессов деформирования стали по двухзвенным траекториям. – Проблемы прочности, 1988, с. 7–10.
- [4] Ohasi Y., Tanaka E. Plastic behavior of mild steel along orthogonal trilinear strain trajectory in three-dimensional vector space of strain deviator. – Transactions of the ASME, 1981, V. 103, № 4, p. 287–292.
- [5] Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л., Гаранников В.В. Экспериментальная пластичность. Книга 1. Процессы сложного деформирования. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2003. – 172 с.
- [6] Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л., Гаранников В.В. Экспериментальная пластичность. Книга 2. Процессы сложного нагружения. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2004. – 184 с.
- [7] Завахайко А.А., Можаровский Н.С. О характеристиках прочности и пластичности при сложных путях нагружения. – Проблемы прочности, 1992, с. 90–93.
- [8] Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 424 с.
- [9] Маковкин Г.А. Сравнительный анализ параметров непропорциональности сложного упругопластического деформирования. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – Н. Новгород: ННГУ, 1999, с. 30–36.
- [10] Коротких Ю.Г., Волков И.А., Гордлеева И.Ю. Моделирование процессов упругопластического деформирования сталей при сложном нагружении. Устойчивость, ползучесть при сложном нагружении. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2000, с. 60–65.
- [11] Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. – М.: Машиностроение, 1983. – 269с.
- [12] Охаси. Неупругое поведение стали 316 при многоосных непропорциональных циклических нагружениях при повышенной температуре. – Теоретические основы инженерных расчетов, 1985, Т. 107, № 2, с. 6–15.
- [13] Охаси. Пластическое деформирование нержавеющей стали типа 316 под действием несинфазных циклов по деформации. – Теоретические основы инженерных расчетов, 1985, №4, с. 61–73.
- [14] Соси. Модели разрушения при многоосной усталости. – Теоретические основы инженерных расчетов. – 1988. – № 9. – С. 9–21.
- [15] Исследование малоциклового прочностии при высоких температурах / под. ред. С.В. Серенсена // . – М.: Наука, 1975.
- [16] Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1984.
- [17] Лэмба. Пластичность при циклическом нагружении при непропорциональных траекториях. – Теор. основы расчетов, 1980, Т. 100, № 1, с. 108–126.
- [18] Макдауэлл. Экспериментальное изучение структуры определяющих уравнений для непропорциональной циклической пластичности. – Теоретические основы инженерных расчетов, 1985, №4, с. 98–111.
- [19] Бернанд-Конноли. Усталость коррозионностойкой стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации. – Теоретические основы инженерных расчетов, 1983, №3, с. 47–53.