

УДК 539.3

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЁННОЙ СРЕДЫ ПРИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ И НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

© Александр Николаевич Бородой, Иван Андреевич Волков,
Иван Сергеевич Тарасов

Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород, Россия.

pmptmygat@yandex.ru

Аннотация. Для оценки напряжённно-деформированного состояния (НДС) и усталостной долговечности ответственных инженерных объектов (ОИО) в [1–3] развита модель повреждённой среды (МПС) состоящая из трёх взаимосвязанных составных частей: соотношений, определяющих упругопластическое поведение материалов, кинетических уравнений накопления повреждений и критерия прочности повреждённого материала. В целях качественной и количественной достоверности определяющих соотношений МПС при пропорциональных и непропорциональных режимах малоциклового нагружения проведена их оценка, путём численного моделирования кинетики НДС и разрушения рабочей части трубчатых лабораторных образцов при различных режимах изменения компонент тензора деформаций и температуры («жесткое» нагружение) и последующим сопоставлением результатов расчёта с экспериментальными данными, полученными для тех же режимов деформирования. Показано, что разработанный вариант определяющих соотношений МПС адекватно отражает основные эффекты упругопластического деформирования и процессы малоциклового усталости материалов и конструкций.

Ключевые слова: напряжённно-деформированное состояние, пластичность, разрушение, накопление повреждений, малоцикловая усталость, долговечность, ресурс.

1. Тенденция развития конструкций и аппаратов современного машиностроения характеризуется увеличением их рабочих параметров, снижением металлоемкости за счет оптимального проектирования и применения новых высокопрочных материалов, значительным ростом удельного веса нестационарных режимов нагружения. Значительно увеличиваются требования к надежности и длительности безаварийной эксплуатации как конструкций в целом, так и отдельных ее элементов. Указанные тенденции привели к тому, что в настоящее время одной из актуальных задач проектирования и эксплуатации конструкций и аппаратов новой техники является задача надежной оценки их ресурса, диагностики выработанного и прогноза остаточного ресурса в процессе эксплуатации. Особенно эта задача актуальна для ответственных инженерных объектов (ОИО) срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, нефтехимическое оборудование, магистральные газо- нефтепроводы и т.п.) Как правило, эксплуатационные условия работы ОИО характеризуются многопараметрическими нестационарными знакопеременными термосиловыми нагрузками, воздействиями внешних полей, приводящими к деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов и, в конечном итоге, исчерпанию ресурса конструктивных узлов объекта.

Классические методы предсказания усталостной долговечности при помощи полуэмпирических формул (правил), основанные на стабилизированном анализе процесса деформирования и связывающие параметры петель упругопластического деформирования с количеством циклов до разрушения требуют большого количества экспериментальной информации и справедливы только для узкого класса режимов нагружения.

В последние годы для решения таких задач успешно развивается новая дисциплина – механика поврежденной среды (МПС). МПС изучает процессы развития микродефектов, механическое поведение поврежденных материалов посредством описания влияния распределенных микродефектов при помощи определенных механических параметров и образование макроскопических трещин (процессы накопления повреждений), сочетая насколько это возможно на современном уровне знаний, точки зрения материаловедения и механики сплошной среды. Существующая на сегодняшний день практика использования уравнений МПС для различных механизмов исчерпания ресурса позволяет утверждать, что такой подход достаточно эффективен для практических приложений оценки ресурса ОИО, и с его помощью можно достаточно корректно оценивать процесс исчерпания ресурса конструктивных элементов и узлов несущих конструкций.

В работах [1–3] с современных позиций МПС развита математическая модель циклического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при многоосных напряжённых состояниях и произвольных сложных траекториях малоциклового нагружения.

Ниже проведена оценка адекватности развитого варианта определяющих соотношений МПС, используемый для оценки усталостной долговечности элементов конструкций при пропорциональных и непропорциональных режимах малоциклового нагружения.

2. Модель поврежденной среды развита [1–3] состоит из трёх взаимосвязанных частей:

- соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учётом зависимости от процесса разрушения;
- уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критерия прочности поврежденного материала.

Оценка достоверности определяющих соотношений МПС проводилась путём численного моделирования кинетики НДС и разрушения рабочей части трубчатых лабораторных образцов при различных режимах изменения компонент тензора деформаций и температуры («жёсткое» нагружение) и последующим сопоставлением результатов расчёта с экспериментальными данными, полученными для тех же режимов деформирования.

Программа оценки достоверности включала:

- моделирование процессов циклического пропорционального и циклического непропорционального деформирования по плоским многозвенным траекториям различного вида;
- моделирование процессов накопления повреждений при пропорциональных и непропорциональных режимах малоциклового нагружения.

В [4, 5] изложены результаты экспериментальных исследований процессов монотонного и циклического деформирования конструкционных материалов по различным траекториям нагружения, включая плоские и пространственные, многозвенные ломаные и криволинейные траектории произвольной кривизны и кручения, которые использовались в настоящей работе для оценки адекватности определяющих соотношений термопластичности при малоцикловом нагружении. Экспериментальные результаты получены лабораторией механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета на автоматизированном расчётно-экспериментальном комплексе СН–ЭВМ под руководством профессора В.Г. Зубчанинова.

Эксперименты выполнялись при нормальной температуре $T = 20^{\circ}\text{C}$ 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. Марки сталей, из которых изготовлены образцы, применяемые в экспериментах: 12X18H10T, 9X2, Сталь 45, 30ХГСА, 40X16H9Г2С и др.

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:

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

$$\sigma = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22}), \quad e_{11} = \Delta l/l, \quad e_{22} = \Delta R/R, \quad e_{12} = \varphi R/2l, \quad e_{33} = \frac{-\nu}{1-\nu}(e_{11} + e_{22})$$

(плоское напряжённое состояние),

где φ – угол закручивания.

Опыты на простое нагружение показали [4, 5]: при значениях модуля вектора деформаций больших 0,5% коэффициент поперечной деформации ν приближается к значению 0,5, что позволило при обработке экспериментальных данных считать материалы условно несжимаемыми и использовать в расчётах для компонент векторов напряжений и деформаций в пятимерном пространстве А.А. Ильюшина соотношения:

$$\mathcal{E}_1 = \sqrt{3}/2 e_{11}, \quad \mathcal{E}_2 = \sqrt{2}(e_{22} + e_{11}/2), \quad \mathcal{E}_3 = \sqrt{2}e_{12}, \quad \mathcal{E}_4 = \mathcal{E}_5 = 0$$

$$\mathcal{S}_1 = \sqrt{3}/2 (\sigma_{11} - \sigma_{22}/2), \quad \mathcal{S}_2 = \sigma_{22}/\sqrt{2}, \quad \mathcal{S}_3 = \sqrt{2}\sigma_{12}, \quad \mathcal{S}_4 = \mathcal{S}_5 = 0.$$

Ниже приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований образцов из стали 40X16H9Г2С (см. табл. 2.1–2.3), деформируемых по замкнутым многозвенным траекториям при малоцикловом нагружении.

Таблица 2.1. Физико-механические характеристики сталей 40X16H9Г2С и 08X18H10Т.

Физико-механические характеристики и параметры модели при $T = 20^0 C$		
	сталь 40X16H9Г2С	сталь 08X18H10Т
K , (МПа)	116789	172920
G , (МПа)	60220	78700
E , (МПа)	154162	199000
α , (1/град)	0,0000166	0,0000166
C_p^0 , (МПа)	150	184,5
g_1 , (МПа)	25500	23236
g_2	300	358,6
a	15	0

Таблица 2.2 Модуль монотонного упрочнения сталей 40X16H9Г2С и 08X18H10Т.

Модуль монотонного упрочнения q_1 , (МПа) материала стали при $T = 20^0 C$		
	сталь 40X16H9Г2С	сталь 08X18H10Т
χ_1	q_1 , (МПа)	q_1 , (МПа)
0	-3000	-17000
0,003	-500	-4000
0,004	200	-2233,34
0,006	600	1300
0,007	700	1300
0,008	800	1300
0,009	900	1300
0,01	950	1261,67
0,012	1000	1185
0,015	1000	1159
0,018	1000	1117
0,021	1000	1107
0,023	985	1101,16

0,3	750	292,08
0,4	0	0

Таблица 2.3. Модуль циклического упрочнения сталей 40X16H9Г2С и 08X18H10Т.

Модуль циклического упрочнения $Q_1(\rho_{\max})$, (МПа) материала стали при $T = 20^0C$			
сталь 40X16H9Г2С		сталь 08X18H10Т	
ρ_{\max}	Q_1	ρ_{\max}	Q_1
0	195,1	0	184
32,09	204,7	10	178,5
50	210,1	20	173
54,5	211,5	30	171
66,38	215	40	169
73,6	217,2	50	174
81,4	220,5	60	183
96,1	226,7	70	200
100	228,4	80	217
104,5	230,3	90	243,5
112,8	272,6	100	270
147	300	110	270
150	300	200	270

При численном моделировании данных экспериментальных процессов с использованием развитых определяющих соотношений упругопластичности заданными являлись экспериментальные 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.

На рис. 1 показана диаграмма сложного деформирования материала (зависимость интенсивности тензора напряжений σ_u от интенсивности тензора деформаций e_u) для режима нагружения (рис. 1), 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 [4, 5], а сплошной – численные результаты, полученные с помощью развитых определяющих соотношений (точками отмечены экспериментальные и теоретические значения начала каждого из звеньев). Видно качественное и количественное совпадение опытных и расчётных данных.

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

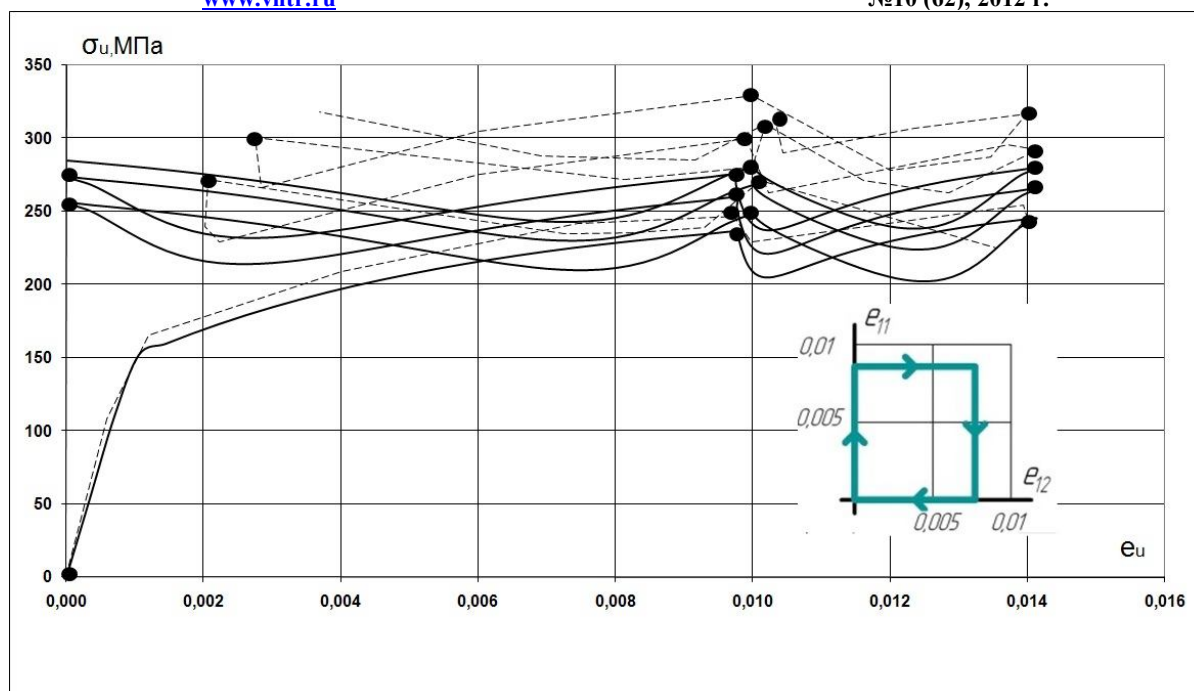


Рис. 1

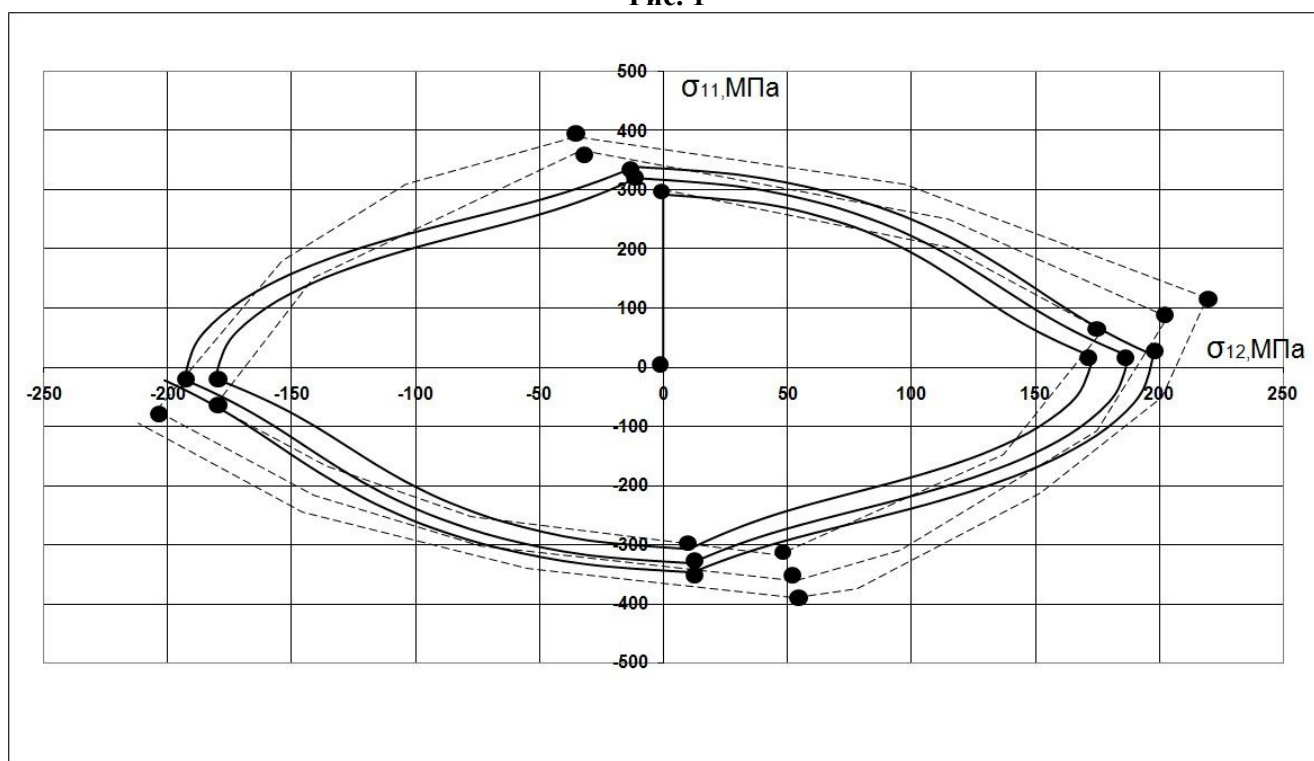


Рис. 2

В тоже время деформирование данного материала по замкнутым траекториям пропорционального деформирования (рис. 3) с углами излома 180° (знакопеременное кручение – рис. 3) 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).

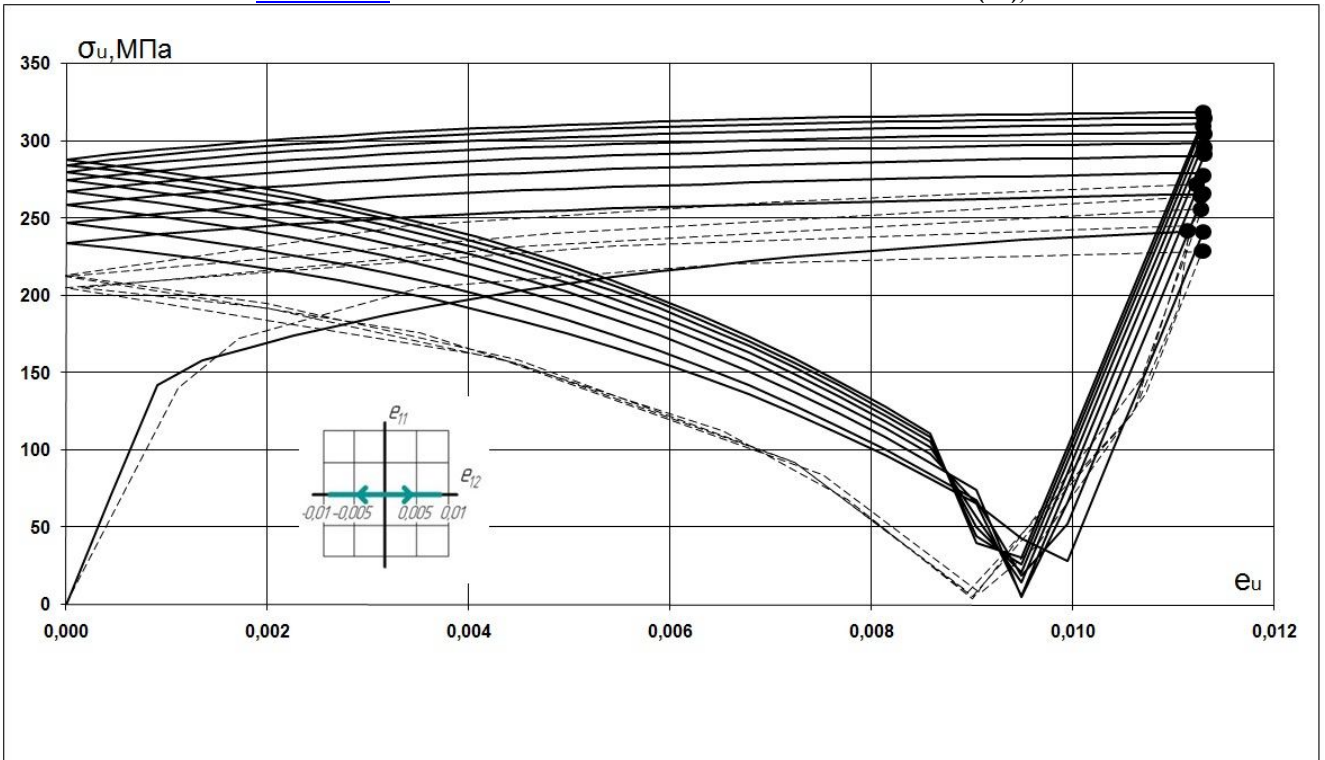


Рис. 3

При пропорциональном деформировании с углом наклона 45° в плоскости $e_{11} - e_{12}$ (рис. 4) при аналогичном максимальном модуле вектора деформаций упрочнение после трёх циклов составило 12% (см. рис. 4, 5). Причём, как видно из представленных рисунков во втором и третьем примерах стабилизации параметров напряжённого состояния происходит практически в конце второго цикла нагружения.

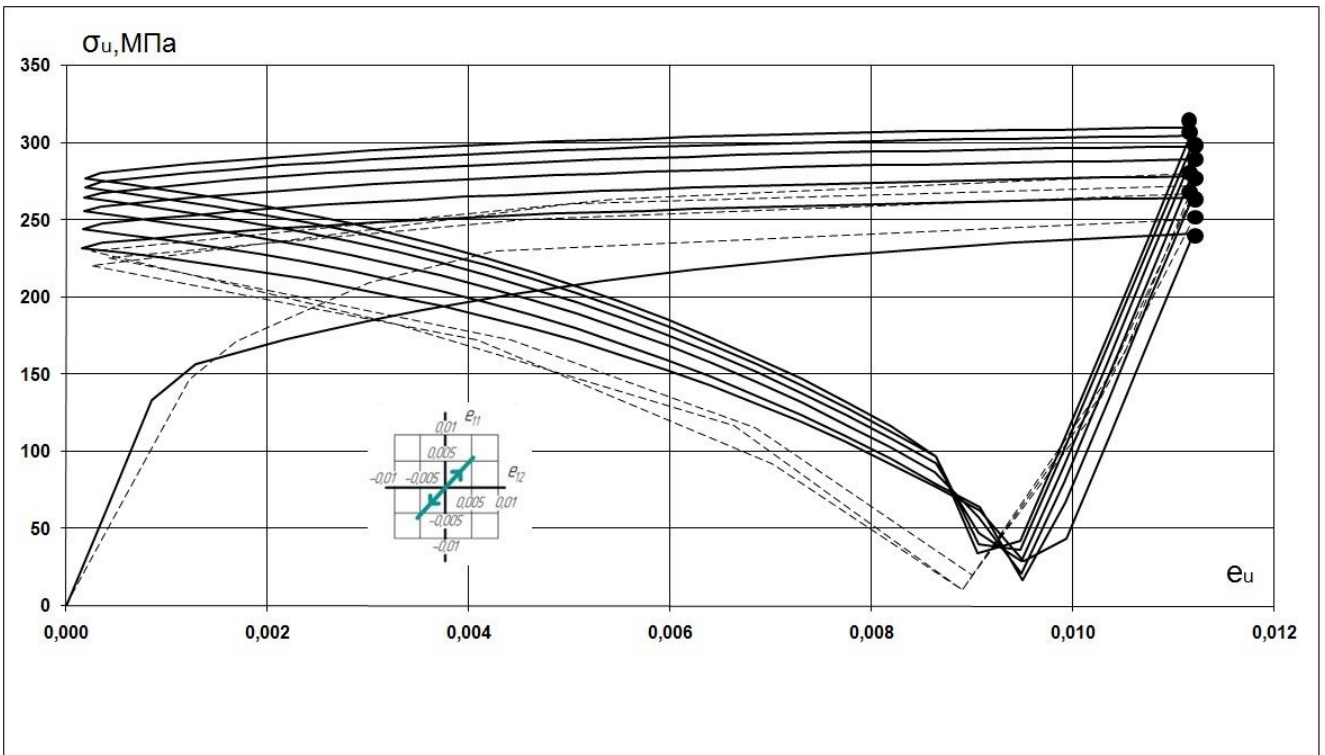


Рис. 4

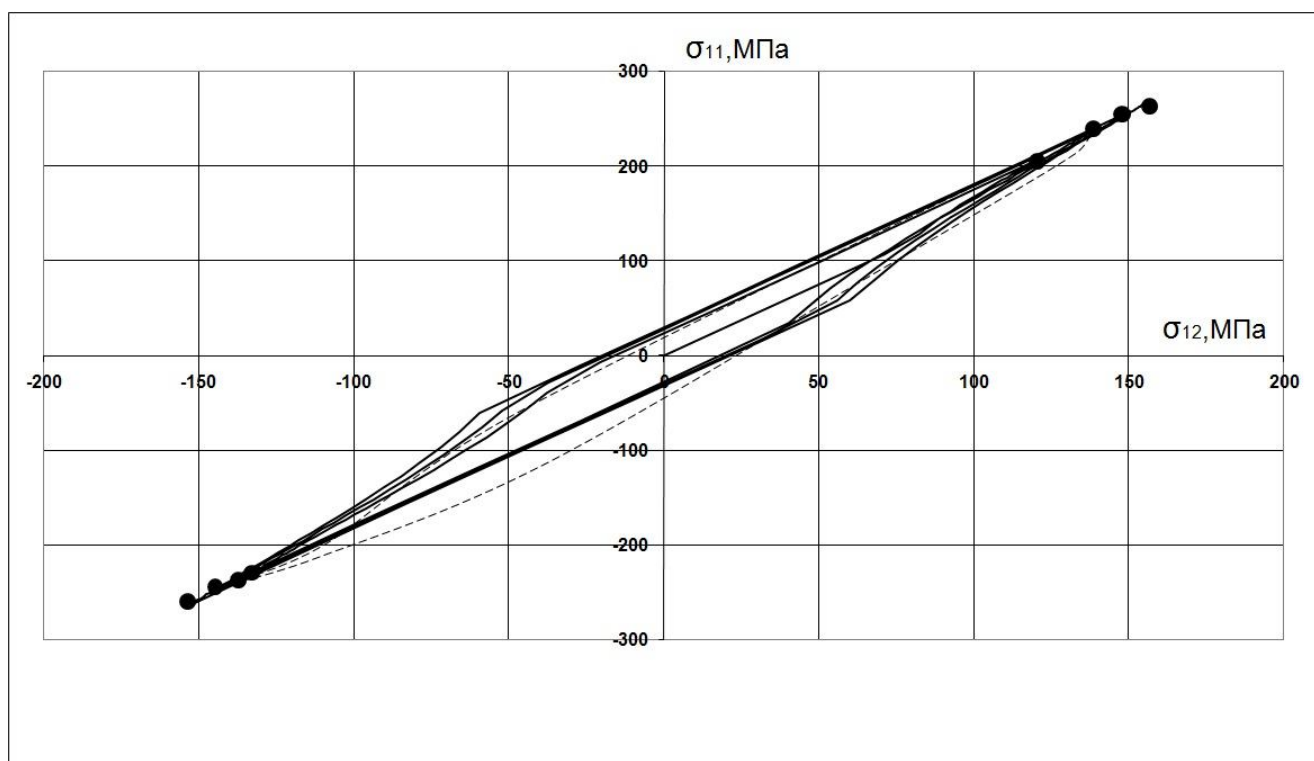


Рис. 5

Таким образом, проведённые численные исследования процесса деформирования по плоским замкнутым траекториям пропорционального и непропорционального нагружения показало качественное и количественное совпадение опытных и расчётных данных.

В следующем примере [6] проведён численный анализ экспериментальных данных по исследованию траекторий деформирования на усталостную долговечность стали 08X18H10T при совместном действии знакопеременного кручения и одноосного растяжения-сжатия [6].

В экспериментах варьировались:

– амплитуда интенсивности пластической деформации

$$\Delta e_u^p = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{\Delta e_{ij}^p \Delta e_{ij}^p}} = \sqrt{(\Delta e_{11}^p)^2 + \frac{4}{3} (\Delta e_{12}^p)^2};$$

– угол вида деформированного состояния

$$\psi = \arctg\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta e_{12}^p}{\Delta e_{11}^p}\right);$$

– угол сдвига фаз θ между амплитудой осевой деформации и деформации кручения (при $\theta = 0$ – пропорциональное нагружение, при $\theta = 90^\circ$ осевая и сдвиговая деформация меняются в противофазе).

Обработка экспериментальных результатов с помощью регрессионного анализа позволила получить уравнение регрессии зависимости числа циклов N_f до образования усталостной трещины от амплитуды интенсивности пластической деформации Δe_u^p (%), угла вида деформированного состояния ψ (град) и угла сдвига фаз θ (град):

$$\begin{aligned} \ln N_f = & 10.50 - 7.50 \Delta e_u^p + 1.71 \cdot 10^{-2} \psi - 6.367 \cdot 10^{-5} \psi^2 - 1.5839 \cdot 10^{-2} \theta + \\ & + 8.41 \cdot 10^{-5} \theta^2 + 2.66 \cdot 10^{-2} \Delta e_u^p \theta + 3.133 \cdot 10^{-5} \psi^2 \theta - 2.4 \cdot 10^{-3} \psi \theta + \\ & + 1.372 \cdot 10^{-5} \psi \theta^2 - 2.04 \cdot 10^{-7} \psi^2 \theta^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Для оценки применимости предложенного эволюционного уравнения накопления повреждений и исследования влияния траектории деформирования на малоцикловую

усталостную долговечность конструкционных сталей были проведены расчёты процессов упругопластического деформирования и усталостной долговечности тонкостенных трубчатых образцов, выполненных из стали 08X18H10T, при различных заданных законах изменения осевой деформации e_{11} и деформации кручения e_{12} при температуре $T = 20^\circ\text{C}$. Расчётные результаты сравнивались с имеющимися опытными данными [1, 6]. Для определения материальных параметров эволюционного уравнения накопления повреждений использовалась точка P на усталостной кривой B для одноосного растяжения-сжатия, указанная на рис. 3.18 стрелкой.

На рис. 3.18 представлены кривые усталости $\Delta e_p = \Delta e_p(\ln N_f)$ для различных траекторий деформирования (одноосное растяжение-сжатие, кручение, траектория «квадрат»). Штрихпунктирными прямыми 1, 2 и 3 отмечены полученные экспериментальные регрессионные зависимости числа циклов N_f до образования макроскопической трещины от амплитуды интенсивности пластических деформаций Δe_u^p при одноосном растяжении-сжатии, знакопеременном кручении и деформировании по траектории типа «квадрат» соответственно. Сплошными линиями A , B и C отмечены соответствующие расчётные кривые усталостной долговечности. Точками A_i , B_i , C_i ($i=1,2,3$) на рис. 3.18 показаны результаты расчётов усталостной долговечности при одинаковой амплитуде интенсивности пластических деформаций Δe_u^p для трёх рассматриваемых траекторий деформирования.

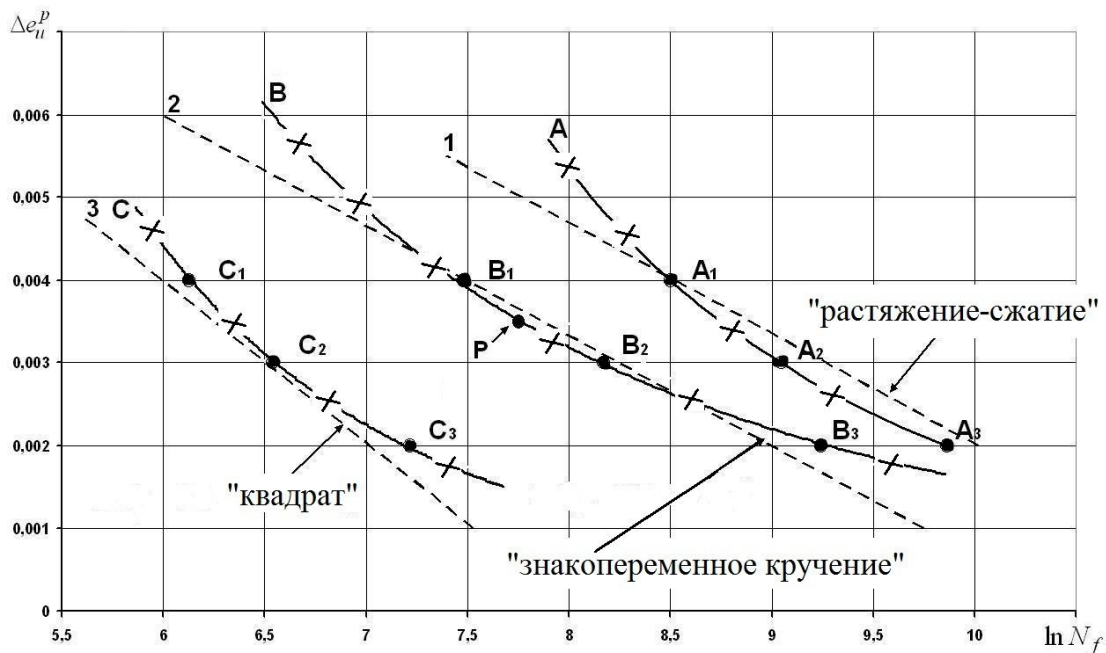


Рис. 6

На рис. 7–9 показана зависимость величины повреждённости ω от числа циклов нагружения N при одинаковой амплитуде пластических деформаций $A_i = B_i = C_i = \Delta e_u^p = 0,002$; $0,003$ и $0,004$ ($i=1,2,3$) соответственно для трёх рассматриваемых траекторий деформирования.

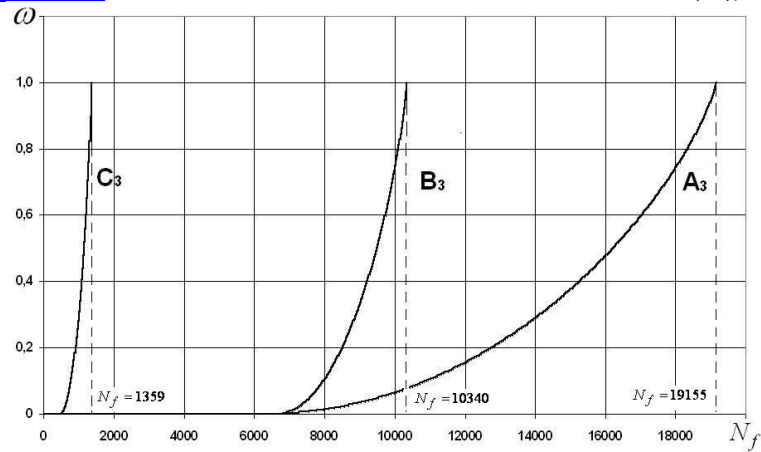


Рис. 7

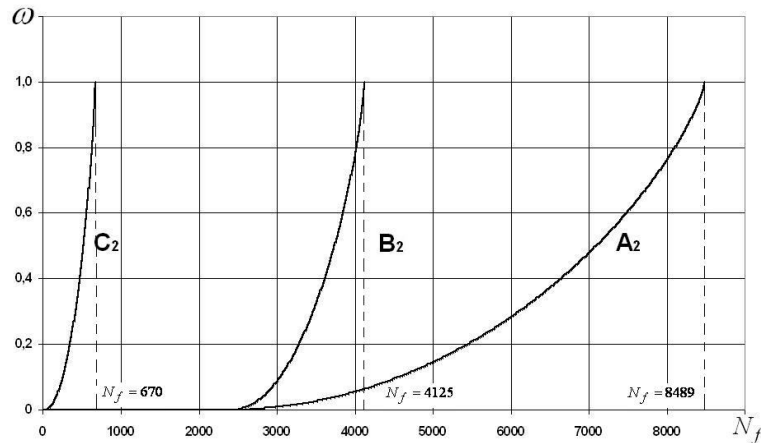


Рис. 8

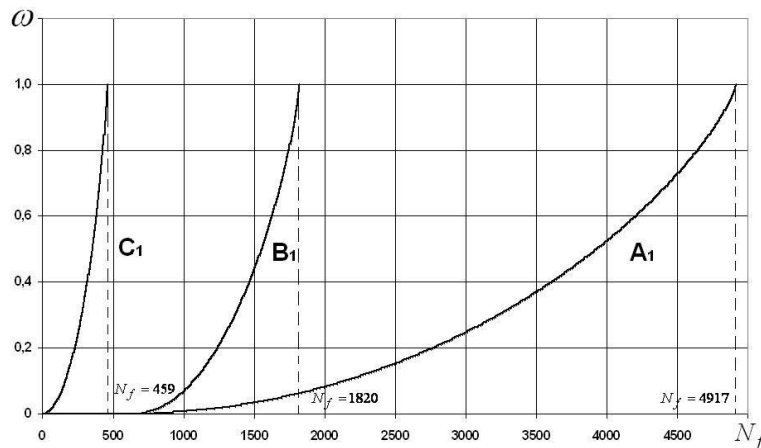


Рис. 9

Результаты расчётной и экспериментальной информации показывают, что:

- при известных параметрах уравнений термопластичности по одной экспериментальной точке P на усталостной кривой определяются материальные параметры эволюционных уравнений накопления повреждений, с помощью которых кривые малоциклового усталости для различных траекторий деформирования восстанавливается расчётным путём с высокой точностью;

- вид кривых усталости носит сильно нелинейный характер (даже в логарифмических координатах вид кривой усталости существенно отличается от линейного);

- регрессионные зависимости типа (1) не описывают экспериментальные данные в области «малых» и «больших» долговечностей ($\Delta e_u^{p*} < \Delta e_u^p < \Delta e_u^{p**}$), поэтому формулой (1) для оценки усталостной долговечности нужно пользоваться с осторожностью;

– при совместном действии одноосного растяжения–сжатия и знакопеременного кручения (траектория типа «квадрат») при одной и той же амплитуде пластических деформаций Δe_u^p долговечность уменьшается по сравнению с одноосным растяжением–сжатием более чем в 6 раз, а при знакопеременном кручении более чем в 14 раз;

– интенсивность полной или пластической деформации, длина траектории пластического деформирования не являются критериями эквивалентности для процессов малоциклового усталости и для непропорциональных нагружений приводят к значительному завышению расчётной долговечности по сравнению фактической.

3. Заключение. Математическая модель МПС, описывающая процессы сложного пластического деформирования и накопления повреждений в материалах и конструкциях при произвольных режимах малоциклового нагружения [1–3] позволяет учесть:

– монотонное и циклическое упрочнение, а также эффекты циклической памяти материала при пропорциональном и непропорциональном деформировании, включая переходные циклические процессы и стабилизированное циклическое поведение материала;

– локальную анизотропию пластического деформирования при изломе траектории деформаций;

– нелинейное суммирование повреждений при изменении условий нагружения и от отдельных механизмов.

Проведена оценка достоверности определяющих соотношений термопластичности и эволюционных уравнений накопления повреждений путем сопоставления результатов численных расчётов с известными из литературы опытными данными по малоциклового усталостной долговечности, которые подтверждают правильность моделирования процессов циклического упругопластического деформирования и усталостной долговечности конструкций при малоциклового нагружении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00204-а)

Литература

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. 424 с.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Моделирование сложного пластического деформирования и разрушения металлов при многоосном непропорциональном нагружении. Журнал ПМТФ. Новосибирск: Изд-во Наука, 2009. №5. С. 193–205.
3. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании. Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. Т. 2, №1. С. 5–19.
4. Зубчанинов, В.Г.. Экспериментальная пластичность. Процессы сложного деформирования. Книга 1 / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гаранников – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.
5. Зубчанинов, В.Г. Экспериментальная пластичность. Процессы сложного нагружения. Книга 2 / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гаранников – Тверь: ТГТУ, 2004. – 184 с.
6. Можаровский НС, Шукаев СИ. Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения. - Проблемы прочности, № 10, 1988, с.47-54.

Поступила: 23.08.12.