

УДК 539.3

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ЭВОЛЮЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ<sup>\*)</sup>

**Ю.Г. Коротких, И.А. Волков, И.С. Тарасов, М.Н. Фомин**

*Волжская государственная академия водного транспорта,  
Нижний Новгород*

Для оценки прочности и ресурса ответственных инженерных объектов развита модель поврежденной среды, состоящая из трех взаимосвязанных составных частей: соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала; кинетических уравнений накопления повреждений и критерия прочности поврежденного материала. В целях качественной и количественной оценки применимости эволюционного уравнения накопления повреждений проведено исследование влияния вида траектории деформирования на усталостную долговечность конструкционных сталей. Показано, что развитый вариант определяющих соотношений адекватно отражает основные эффекты циклического упругопластического деформирования и процессы малоциклового усталости металлов при многоосных напряженных состояниях и сложных траекториях деформирования.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, пластичность, поврежденность, разрушение, траектория деформирования, малоцикловая усталость, накопление повреждений, долговечность, ресурс.

### 1. Введение

Обоснование гарантируемой безопасной эксплуатации ответственных инженерных объектов (ядерных энергетических установок, объектов химической, газовой, нефтяной отрасли и др.) в течение длительного срока службы (40–60 лет) при коэффициенте использования ~ 90% требует на всех жизненных этапах этих объектов достоверной информации об истории и характере эксплуатационных воздействий на конструктивные элементы, о деградационных процессах в конструкционных материалах, об изменениях их физико-механических и прочностных характеристик при длительной эксплуатации.

Внезапные прочностные отказы конструктивных элементов являются следствием неконтролируемых процессов деградации начальных прочностных характеристик конструкционных материалов в результате накопления повреждений под воздействием физических полей различной природы.

---

<sup>\*)</sup> Выполнено в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Программы государственной поддержки ведущих научных школ России (проект НШ-4807.2010.8) и при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-08-00266-а).

Ввиду локальности деградационных процессов ресурс конструктивных элементов определяется ресурсом их опасных зон с наибольшими темпами деградационных процессов, параметры которых могут сильно отличаться из-за различия свойств конструкционных материалов, конструктивных особенностей, эксплуатационных условий, технологии изготовления и т.д.

Для контролирования состояния материала опасных зон применяются прямые методы неразрушающего контроля и косвенные, основанные на непосредственном анализе эксплуатационных параметров контролируемого узла (например, вибродиагностирование), на построении вероятностных прогнозных моделей и на прямом математическом моделировании процессов накопления повреждений в каждой опасной зоне по фактической истории ее нагружения [1].

Современные методы неразрушающего контроля состояния материала ввиду трудности или невозможности доступа к контролируемым зонам в процессе эксплуатации объекта могут эффективно применяться лишь на стадиях изготовления и монтажа и частично при проведении плановых ремонтов или продлении назначенных сроков службы. Их разрешающая способность позволяет обнаруживать уже зародившиеся усталостные трещины определенной длины и глубины (порядка нескольких миллиметров). Новые физические методы неразрушающего контроля (спектрально-акустические методы, метод вдавливания индентора) позволяют количественно оценить объемную долю рассеянных в материале дефектов по косвенным эффектам (затуханию акустических волн или изменению параметров процесса вдавливания индентора) только в доступных для расположения датчиков местах и требуют проведения предварительного экспериментального тестирования на эксплуатационные условия нагружения контролируемой зоны.

Методы, основанные на построении вероятностных моделей оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса, наталкиваются на существенные трудности при применении их к малосерийным и уникальным инженерным объектам. Как показывает опыт эксплуатации, даже однотипное оборудование, как правило, работает в существенно различных условиях эксплуатации, что вызывает значительные трудности в сборе представительной статистической информации о наработках на отказ. Поэтому индивидуальные значения вероятностей безотказной работы или риска отказов для такого оборудования имеют условный характер.

Решение этой проблемы возможно только при реализации методологии эксплуатационного мониторинга ресурса [1, 2], одной из основных задач которого является контролирование в процессе эксплуатации объекта индивидуального выработанного ресурса каждой опасной зоны наиболее нагруженных конструктивных элементов, индивидуальной поврежденности материала этих зон по известной фактической истории их деформирования на базе математического моделирования процессов деградации с использованием современных моделей и методов механики поврежденной среды и механики разрушения [3–14].

Полученные путем моделирования расчетные значения поврежденности материала в доступных зонах должны корректироваться путем периодического неразрушающего контроля современными физическими методами состояния материала доступных зон при остановках или ремонтах объекта.

В работах [3, 15, 16] с современных позиций механики поврежденной среды развита математическая модель, описывающая процессы накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при много-

осных непропорциональных путях комбинированного термосилового нагружения.

Ниже в целях качественной и количественной оценки эволюционного уравнения накопления повреждений проведено исследование вида траектории деформирования на усталостную долговечность конструкционных нержавеющих сталей при пропорциональном и непропорциональном механическом нагружении.

## 2. Эволюционные уравнения накопления усталостных повреждений

Многолетние экспериментальные и теоретические исследования накопления усталостных повреждений в конструкционных материалах позволяют сделать вывод о том, что усталость охватывает три значительно отличающиеся друг от друга области циклического нагружения [4–6]:

- многоцикловую усталость (МнЦУ) при квазиупругой работе материала (пластические деформации в пределах допуска 0,002), соответствующую долговечностям при симметричном циклическом одноосном нагружении  $10^5$ – $10^8$  циклов;
- малоцикловую усталость (МЦУ) при нестационарном упругопластическом деформировании материала, соответствующую долговечностям, меньшим  $10^4$  циклов при симметричном циклическом одноосном нагружении;
- переходную область, соответствующую долговечностям  $10^4$ – $10^5$  циклов, где одновременно действуют оба механизма.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные усталостной долговечности мартенситно-старящей стали с 18% Ni [4] в логарифмических координатах «пластическое деформирование – число циклов до разрушения» (рис. 1,а) и «упругая деформация – число циклов до разрушения» (рис. 1,б) для получения кривой, отражающей соотношение между полной деформацией и усталостной долговечностью (1 – общая кривая усталостной долговечности, 2 – кривая МнЦУ, 3 – кривая МЦУ).

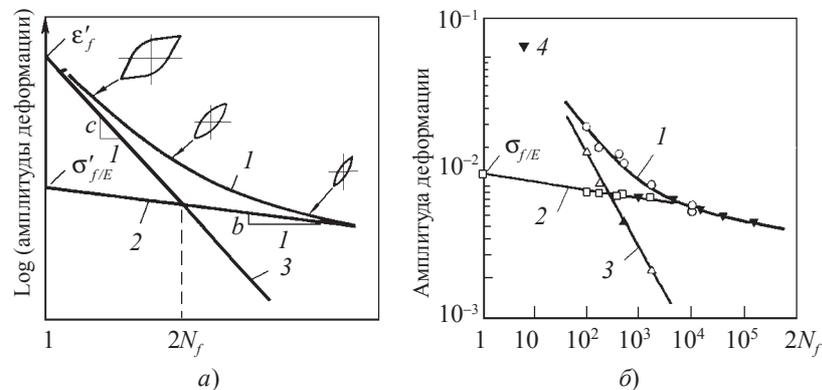


Рис. 1

Модель поврежденной среды, развитая в работах [3, 15, 16], состоит из трех взаимосвязанных составных частей:

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

При разработке адекватных математических моделей накопления усталостных повреждений необходимо:

- ввести адекватную физическую меру поврежденности материала, которая

поддается измерению физическими неразрушающими методами контроля состояния материала;

- ввести меру наработки материала, адекватную данному физическому процессу деградации и справедливую для любого характера нагружения данной критической зоны;

- учесть многоосность напряженно-деформированного состояния и вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций;

- учесть нелинейный характер процесса накопления повреждений и нелинейное суммирование повреждений при изменении режима нагружения данной зоны материала;

- установить принцип эквивалентности процессов накопления повреждений при различных видах нагружения зоны материала;

- установить связь между параметрами процессов деформирования и накопления повреждений в данной зоне материала.

В [5] показано, что процесс накопления усталостных повреждений до образования макроскопической трещины состоит из двух стадий:

- стадии зарождения и роста, при которой поры не взаимодействуют друг с другом, влияние поврежденности на физико-механические характеристики материалов отсутствует (продолжительность фазы характеризуется количеством циклов  $N_a$ );

- стадии развития поврежденности путем слияния образовавшихся микропор в макроскопические трещины, при которой наблюдается прогрессирующее влияние поврежденности на физико-механические характеристики материалов (продолжительность стадии характеризуется количеством циклов  $(N_f - N_a)$ ).

Суммируя приведенные выше результаты, постулируем, что общая структура эволюционного уравнения накопления повреждений в элементарном объеме материала при малоцикловом нагружении может быть представлена в виде [11, 17]:

$$\dot{\omega} = f_1(\theta) f_2(\beta) f_3(\omega) f_4(z) \langle \dot{z} \rangle, \quad \omega = \int_0^t \dot{\omega} dt, \quad (1)$$

где  $f_1(\theta)$  описывает влияние кривизны траектории деформирования;  $f_2(\beta)$  – влияние объемности напряженного состояния;  $f_3(\omega)$  – влияние уровня накопленной поврежденности;  $f_4(z)$  – влияние накопленной относительной энергии  $W$ , затраченной на образование дефектов.

Конкретизируя данное соотношение, считаем, что структура эволюционного уравнения накопления повреждений при малоцикловом нагружении имеет вид [4–6]:

$$\dot{\omega} = \frac{\alpha + 1}{r + 1} f(\beta) Z^\alpha (1 - \omega)^{-r} \langle \dot{Z} \rangle; \quad (2)$$

$$Z = \frac{W - W_a}{W_f - W_a}, \quad \langle \dot{Z} \rangle = \begin{cases} \dot{Z} & \text{при } \dot{Z} > 0, \\ 0 & \text{при } \dot{Z} \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\langle \dot{Z} \rangle = \frac{\langle \dot{W} \rangle}{W_f - W_a}, \quad \dot{W} = \rho_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p, \quad (4)$$

$$f(\beta) = \exp(-k\beta), \quad (5)$$

$$\omega = \frac{V}{V_f}, \quad 0 \leq \omega \leq \omega_f \leq 1, \quad (6)$$

$$W = \int \rho_{ij} de_{ij}^p. \quad (7)$$

В формулах (2)–(7) используются обозначения:  $V$  – текущая объемная доля дефектов,  $V_f$  – критическая объемная доля, соответствующая образованию в данном объеме материала макроскопической трещины (полной потере несущей способности материала в данном элементарном объеме);  $W_f$  – значение энергии  $W$  тензора «микронапряжений» (координат центра поверхности текучести)  $\rho_{ij}$  на пластических деформациях, соответствующей образованию макроскопической трещины, а  $W_a$  – значение  $W$  в конце фазы зарождения микродефектов при МЦУ (параметры материала);  $\alpha, r, k$  – материальные параметры, зависящие от температуры  $T$ ;  $f(\beta)$  – функция параметра объемности напряженного состояния  $\beta = \sigma/\sigma_u$ ;  $W = \int_0^t \dot{W} dt$  – энергия, идущая на образование рассеянных усталостных повреждений при МЦУ.

Интегрирование уравнения (2) для некоторого заданного процесса нагружения и изменения температуры  $T$  дает уравнение:

$$\omega = 1 - [1 - Y^{\alpha+1}]^{1/(r+1)}, \quad (8)$$

$$Y = AZ, \quad A = \left[ (\alpha+1) \int_0^Z f(\beta) Z^\alpha \frac{\langle dZ \rangle}{Z^{(\alpha+1)}} \right]^{1/(\alpha+1)}. \quad (9)$$

Для регулярных процессов, когда можно выделить регулярные циклы, параметр  $Y$  выражается через относительное число циклов нагружения:

$$Y = \frac{N}{N_f}, \quad (10)$$

а уравнение (8) принимает вид:

$$\omega = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\alpha+1} \right]^{1/(r+1)}. \quad (11)$$

При  $\alpha = r = 0$  из уравнения (11) получаем широко известное правило линейного суммирования повреждений:

$$\omega = \sum \frac{N}{N_f} = 1. \quad (12)$$

Согласно приведенным уравнениям, каждому процессу, характеризующему индивидуальными историями деформирования и изменения температуры  $T$ , на плоскости переменных  $\omega \sim W$  соответствует своя кривая развития поврежденности, и при изменении режима нагружения происходит переход с одной кривой на другую (принцип нелинейного суммирования повреждений).

На фазовой плоскости  $\omega \sim Y$  процессу МЦУ соответствует единая обобщенная кривая развития поврежденности, однако скорость движения по этой кривой зависит от текущих параметров процессов деформирования и изменения  $T$ .

Введенная обобщенная энергетическая переменная  $Y$  позволяет установить эквивалентность различных процессов поврежденности между собой (для различных

видов напряженных состояний, различных температур и различных историй деформирования) и их эквивалентность экспериментальным данным.

### 3. Численные результаты

В работе [18] проведены экспериментальные исследования влияния вида траектории деформирования на усталостную долговечность стали 08X18H10T при совместном действии знакопеременного кручения и одноосного растяжения–сжатия.

В экспериментах варьировались:

– амплитуда интенсивности пластической деформации

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

– угол вида деформированного состояния

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

– угол сдвига фаз  $\theta$  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  $\Delta e_u^p$  (%), угла вида деформированного состояния  $\psi$  (град) и угла сдвига фаз  $\theta$  (град):

$$\begin{aligned} \ln N_f = & 9,9658 - 6,83\Delta e_u^p + 1,71 \cdot 10^{-2}\psi - 6,367 \cdot 10^{-5}\psi^2 - 1,5839 \cdot 10^{-2}\theta + \\ & + 8,41 \cdot 10^{-5}\theta^2 + 2,66 \cdot 10^{-2}\Delta e_u^p\theta + 3,133 \cdot 10^{-5}\psi^2\theta - 2,4 \cdot 10^{-3}\psi\theta + \\ & + 1,372 \cdot 10^{-5}\psi\theta^2 - 2,04 \cdot 10^{-7}\psi^2\theta^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Анализ экспериментальной информации показал значительное влияние  $\psi$  и  $\theta$  на усталостную долговечность [18]:

– теоретические оценки усталостной долговечности по экспериментальным результатам при одноосном растяжении–сжатии или знакопеременном кручении с использованием уравнений типа Коффина–Мэнсона и критерия эквивалентности амплитуды интенсивности деформации  $\Delta e_u^p$  могут привести к существенным ошибкам в неконсервативную сторону;

– для непропорционального нагружения при одинаковой амплитуде интенсивности пластических деформаций долговечность может быть меньше в 4–6 раз долговечности при пропорциональном нагружении (одноосном растяжении–сжатии или знакопеременном кручении);

– формулировка критерия эквивалентности на базе энергетического подхода позволяет адекватно описать влияние непропорциональности нагружения на усталостную долговечность металлов.

Для стали 08X18H10T с учетом экспериментальных данных [19] уравнение (13) было скорректировано так, чтобы оно описывало усталостную кривую при одноосном растяжении–сжатии, а именно был изменен свободный первый член и коэффициент при  $\Delta e_u^p$ :

$$\begin{aligned} \ln N_f = & 10,50 - 7,50\Delta e_u^p + 1,71 \cdot 10^{-2}\psi - 6,367 \cdot 10^{-5}\psi^2 - 1,5839 \cdot 10^{-2}\theta + \\ & + 8,41 \cdot 10^{-5}\theta^2 + 2,66 \cdot 10^{-2}\Delta e_u^p\theta + 3,133 \cdot 10^{-5}\psi^2\theta - 2,4 \cdot 10^{-3}\psi\theta + \\ & + 1,372 \cdot 10^{-5}\psi\theta^2 - 2,04 \cdot 10^{-7}\psi^2\theta^2. \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 2 штриховыми линиями показаны экспериментальные кривые усталости, полученные согласно регрессионному уравнению (14).

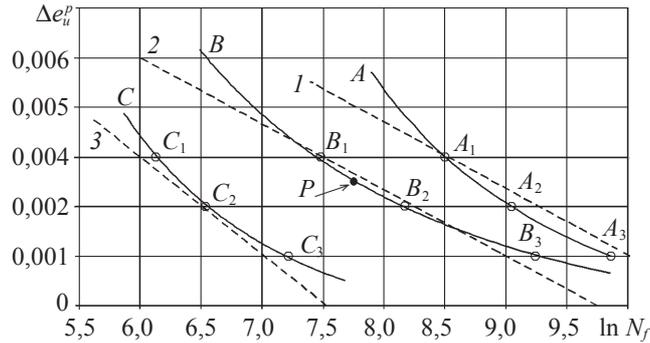


Рис. 2

Усталостная долговечность при одноосном растяжении–сжатии (прямая 2) описывается уравнением (15) (первые два члена уравнения (14)):

$$\ln N_f = 10,50 - 7,50\Delta e_u^p. \quad (15)$$

Видно, что регрессионная зависимость (15) не описывает экспериментальные данные при амплитуде интенсивности пластических деформаций  $\Delta e_u^p > 0,004$ .

Прямая 1 на рис. 2 соответствует знакопеременному кручению ( $\theta = 0$ ,  $\psi = 90^\circ$  в уравнении (14)):

$$\ln N_f = 11,52 - 7,50\Delta e_u^p. \quad (16)$$

Прямая 3 на рис. 2 (траектория типа «квадрат») соответствует усталостной долговечности при одновременном действии одноосного растяжения–сжатия с амплитудой  $\Delta e_{11}^p$  и знакопеременного кручения с амплитудой  $\Delta e_{12}^p = (2/\sqrt{3})\Delta e_{11}^p$  и сдвигом фаз на  $90^\circ$  ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\psi = 45^\circ$  в уравнении (14)):

$$\ln N_f = 8,041 - 5,106\Delta e_u^p.$$

Для оценки применимости предложенного эволюционного уравнения накопления повреждений [3] и исследования влияния траектории деформирования на малоцикловую усталостную долговечность конструкционных сталей были проведены расчеты 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  $T = 20^\circ\text{C}$ . Расчетные результаты сравнивались с имеющимися опытными данными [18, 19]. Для определения материальных параметров эволюционного уравнения накопления повреждений использовалась точка P на усталостной кривой B для одноосного растяжения–сжатия, указанная на рис. 2 стрелкой. Материальные параметры эволюционного уравнения накопления повреждений

(2) для стали 08Х18Н10Т при  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  приведены в таблице (работа разрушения  $W_a = W_a(\rho_{\max})$  МДж/м<sup>3</sup>,  $W_f = 3685$  МДж/м<sup>3</sup>,  $\alpha = 1$ ,  $k = 1$ ,  $r = 0,3$ ).

Таблица

$\rho_{\max}$ , МПа	0	15	30	41	51	65	69	72	74	76	78
$W_a$ , МДж/м <sup>3</sup>	1270	1270	1270	1270	1230	1046	945	492	202	60	0

Результаты расчетов, их сравнения с имеющимися опытными данными приведены на рис. 2–6.

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

На рис. 3–5 показаны зависимости величины поврежденности  $\omega$  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 трех рассматриваемых траекторий деформирования.

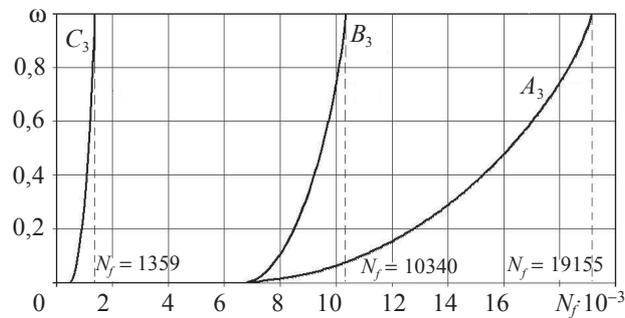


Рис. 3

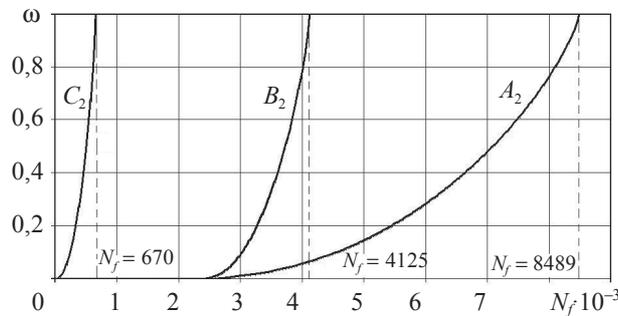


Рис. 4

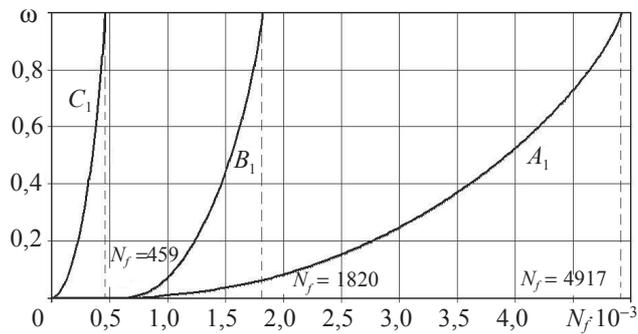


Рис. 5

На рис. 6 представлена единая обобщенная кривая накопления усталостных повреждений для данного материала при МЦУ.

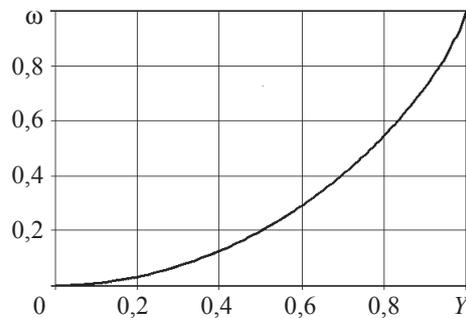


Рис. 6

Результаты расчетной и экспериментальной информации показывают, что:

- при известных параметрах уравнений термопластичности по одной экспериментальной точке  $P$  на усталостной кривой (см. рис. 2) определяются материальные параметры эволюционных уравнений накопления повреждений (4)–(7), с помощью которых кривые малоциклового усталости для различных траекторий деформирования восстанавливаются расчетным путем с высокой точностью;

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

- регрессионные зависимости типа (13) или (14) не описывают экспериментальные данные в области «малых» и «больших» долговечностей ( $\Delta e_u^{P^*} < \Delta e_u^P < \Delta e_u^{P^{**}}$ ), поэтому формулами (13) и (14) 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  $\Delta e_u^P$  долговечность уменьшается по сравнению с одноосным растяжением–сжатием более чем в 6 раз, а при знакопеременном кручении – более чем в 14 раз.

#### 4. Заключение

Проведена оценка адекватности эволюционных уравнений накопления повреждений модели поврежденной среды путем сопоставления результатов численных

расчетов с известными из литературы опытными данными по малоцикловой усталостной долговечности при многоосных напряженных состояниях и произвольных траекториях деформирования, которая подтверждает правильность моделирования процессов сложного циклического упругопластического деформирования и усталостной долговечности конструкционных материалов (металлов и их сплавов).

Анализ полученных численных результатов, их сравнения с имеющимися опытными данными позволяет сделать выводы:

– уравнения термопластичности и накопления усталостных повреждений (2)–(9) позволяют с необходимой для инженерной практики точностью рассчитывать малоцикловую усталостную долговечность конструкционных сталей при многоосных напряженных состояниях и произвольных траекториях деформирования;

– интенсивность полной или пластической деформации, длина траектории пластического деформирования не являются критериями эквивалентности для процессов малоцикловой усталости и для непропорциональных нагружений приводят к завышению расчетной долговечности по сравнению с фактической;

– критерий эквивалентности для процессов малоцикловой усталости – это энергетический параметр  $U$  в уравнениях (2)–(9), который является внутренним временем процесса накопления усталостных повреждений для различных процессов нагружения (см. рис. 6).

#### Литература

1. Митенков, Ф.М. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков и [др.] – М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
2. Митенков, Ф.М. К вопросу о создании эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, Ю.Г. Коротких // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – №4. – С. 105–116.
3. Волков, И.А. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
4. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, подтверждение / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
5. Ellyin, F. An energy-based fatigue failure criterion / F. Ellyin, D. Kujawski // Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials. – 1986. – V. 11, EAMS. – P. 591–601.
6. Троценко, В.Г. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Г. Троценко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 342 с.
7. Пежина. Моделирование закритического поведения и разрушения диссипативного твердого тела / Пежина // Теор. основы инженерных расчетов. – 1984. – Т. 106, №4. – С. 107–117.
8. Бойл, Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести / Дж. Бойл, Дж. Спенс. – М.: Мир, 1986. – 360 с.
9. Chaboche, J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation / J.L. Chaboche // Engineering Design. – 1981. – 64. – P. 233–247.
10. Гаруд. Новый подход к расчету усталости при многоосных нагружениях / Гаруд // Теор. основы инженерных расчетов. – 1981. – Т. 103, №2. – С. 41–51.
11. Боднер. Критерии приращения повреждений для зависящего от времени разрушения материалов / Боднер, Линдхолм // Теор. основы инженерных расчетов. – 1976. – №2. – С. 51–53.
12. Романов, А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении / А.Н. Романов. – М.: Наука, 1988. – 279 с.
13. Леметр. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов / Леметр // Теор. основы инженерных расчетов. – 1985. – Т. 107, №1. – С. 90–97.

14. *Соси*. Модели разрушения при многоосной усталости / Соси // Теор. основы инженерных расчетов. – 1988. – №9. – С. 9–21.
15. *Волков, И.А.* Моделирование сложного пластического деформирования и разрушения металлов при многоосном непропорциональном нагружении / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // ПМТФ. – 2009. – №5. – С. 193–205.
16. *Волков, И.А.* Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, №1. – С. 5–19.
17. *Охаси*. Пластическое деформирование стали типа 316 под действием несинфазных циклов по деформации / Охаси, Юнака, Оока // Теор. основы инженерных расчетов. – 1985. – №4. – С. 61–73.
18. *Можаровский, Н.С.* Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения / Н.С. Можаровский, С.И. Шукаев // Проблемы прочности. – 1988. – №10. – С. 47–54.
19. *Казаков, Д.А.* Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций / Д.А. Казаков, С.А. Капустин, Ю.Г. Коротких. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1994. – 225 с.

[11.02.2010]

#### **THE VALIDATION OF THE APPLICABILITY OF THE EVOLUTION EQUATION OF DAMAGE ACCUMULATION FOR ASSESSING LOW-CYCLE FATIGUE OF METALS**

**Yu.G. Korotkikh, I.A. Volkov, I.S. Tarasov, M.N. Fomin**

To evaluate strength and service life of engineering objects, a model of a damaged medium consisting of three interconnected parts (relations determining the elastoplastic behavior of the material, kinetic equations of damage accumulation, and a strength criterion of the damaged material) is developed. In order to assess qualitatively and quantitatively the applicability of the evolution equation of damage accumulation, the effect of the deformation path type on the fatigue life of structural steels is investigated. The developed version of the determining relations is shown to adequately describe the main effects of cyclic elastoplastic deformation and the processes of low-cycle fatigue of metals for multiaxial stressed states and complex deformation paths.

*Key words:* stressed-strained state, plasticity, damage, failure, deformation path, low-cycle fatigue, damage accumulation, durability, service life.