

Численное исследование влияния многоосности нагружения и параметров процесса деформирования на усталостную долговечность металлов

Ю. Г. Коротких, И. А. Волков, И. Ю. Гордлеева

Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Проанализированы известные экспериментальные данные о влиянии многоосности нагружения и вида траектории деформирования на процесс накопления повреждений при усталости. С позиции механики поврежденной среды развит вариант определяющих соотношений, описывающих процессы упругопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлы и их сплавы) при многоосных непропорциональных путях малоциклового нагружения. Модель поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных составных частей: соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учетом влияния процесса разрушения; уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений; критерия прочности поврежденного материала. С целью качественной оценки определяющих соотношений проведен численный эксперимент по построению поверхностей равной поврежденности. Расчетные данные сравниваются с экспериментальными.

Исследовано влияние многоосности напряженного состояния и вида траектории деформирования на долговечность металлов при малоциклового усталости. Показано, что развитый вариант определяющих соотношений поврежденной среды правильно отражает основные эффекты циклического упругопластического деформирования и накопления повреждений при многоосном напряженном состоянии и произвольных траекториях деформирования материала.

Ключевые слова: континуальная модель, упругопластическое поведение, поврежденность, разрушение.

Введение. Ввиду трудностей проведения экспериментальных исследований по изучению процессов накопления повреждений при сложном напряженном состоянии известно лишь небольшое количество экспериментальных данных о влиянии многоосности напряженного состояния и параметров процесса деформирования на усталостную долговечность металлов. Более подробно эта проблема обсуждалась в [1]. Основные выводы, которые следуют из анализа проблемы, таковы:

преобразование структуры материала в условиях одноосного, двухосного и трехосного пропорционального нагружения имеет отличия, особенно при непропорциональном нагружении;

применение в качестве эквивалентных критериев Мизеса или Треска не корректно. Эти критерии неконсервативны и их практическое использование может привести к опасным переоценкам прочности;

двухосные напряженные состояния могут уменьшать усталостную долговечность на порядок;

непропорциональное нагружение снижает усталостную долговечность до четырехкратного уровня по сравнению с пропорциональным нагружением в фазе той же интенсивности.

Установлено, что наиболее опасным двухосным нагружением является нагружение со сдвигом фаз изменения компонент напряжения, равным 90° [2, 3]. В случае совместного растяжения–сжатия и знакопеременного кручения при одинаковой амплитуде деформации работа напряжений на пластических деформациях за цикл нагружения при сдвиге по фазе 90° превышает аналогичную работу при синфазном нагружении примерно в два раза.

В [4] приведена поверхность разрушения для бериллия, полученная при двухосном растяжении по различным лучевым путям нагружения. Поверхность на плоскости σ_1, σ_2 имеет вид эллипса с главной осью, являющейся биссектрисой прямого угла между положительными направлениями σ_1 и σ_2 .

Данные о малоциклового усталости стали X18H10T [5] показывают, что при одной и той же интенсивности полных деформаций увеличение расогласования фаз до 90° снижает усталостную долговечность по сравнению с синфазным нагружением в пять–восемь раз в зависимости от размаха интенсивности деформации.

Экспериментальное исследование малоциклового усталости сплава “Инконель 718” и сталей SAE 1045, AISI 304 по различным траекториям деформирования при одинаковой интенсивности амплитуды деформаций свидетельствует о том [6], что пластическая деформация не является параметром, определяющим величину усталостного повреждения. При противофазном нагружении (траектории деформаций за цикл – квадрат или круг) отмечен наибольший повреждающий эффект, примерно в десять раз уменьшающий долговечность по сравнению с синфазным пропорциональным деформированием.

Анализ результатов исследований малоциклового усталости для непропорциональных путей деформирования (знакопеременное кручение и осевое растяжение–сжатие) [7] показал:

- значительное влияние траектории деформирования на усталостную долговечность;
- отсутствие влияния полуциклов сжатия на долговечность;
- неконсервативность оценки долговечности с использованием эквивалентного критерия по Мизесу;
- необходимость интегрирования процесса накопления усталостных повреждений в пределах цикла нагружения и недостаточность учета только истории изменения амплитудных значений деформаций;
- отсутствие влияния средней деформации;
- значительное влияние на долговечность шаровой компоненты тензора напряжений;
- необходимость использования для описания процесса накопления повреждений соотношений теории вязкопластичности, адекватно описывающих эффекты непропорционального нагружения.

Влияние траектории деформирования на усталостную долговечность стали 304 исследовалось в работе [8]. Установлено существенное влияние вида траектории на усталостную долговечность. При чистом циклическом кручении долговечность приблизительно в три раза больше, чем при растя-

жении–сжатии с той же интенсивностью амплитуды деформаций. Показано, что теории накопления повреждений, согласно которым повреждение определяется как некоторый интеграл вдоль траектории деформирования, точнее описывают экспериментальные результаты, чем теории, основанные на амплитудных значениях деформаций.

Современные методологии, рекомендуемые Министерством энергетики США для оценки долговечности элементов конструкций, работающих в условиях нестационарных термосиловых нагрузений, анализируются в [9]. На основе анализа экспериментальных данных и их сопоставления с расчетными долговечностями по различным методикам сделаны следующие выводы:

для более точного расчета кинетики напряженно-деформированного состояния и процесса накопления повреждений необходимо применять современные теории термовязкопластичности типа [10];

использование эквивалентных напряжений по Мизесу может привести к завышению долговечности по сравнению с реальной примерно в три раза;

для надежной оценки долговечности необходимо применять современные эволюционные уравнения накопления повреждений типа [4] и проводить интегрирование по реальному процессу деформирования;

при расчетной оценке долговечности следует учитывать реальные процессы деформирования и свойства материала конкретной плавки.

В настоящей работе для оценки усталостной долговечности при многоосных непропорциональных нагружениях с позиции механики поврежденной среды развит вариант определяющих соотношений, описывающих процесс образования и роста микроповреждений, способных с течением времени развиться в макротрещины.

Определяющие соотношения механики поврежденной среды. Развита в работе модель поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных составных частей:

соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учетом влияния процесса разрушения;

уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;

критерия прочности поврежденного материала.

При формулировке определяющих соотношений тензоры напряжений σ_{ij} , деформаций ε_{ij} и их приращения разложим на шаровые $\sigma_m, \Delta\sigma_m, \varepsilon_m, \Delta\varepsilon_m$ и девиаторные $S_{ij}, \Delta S_{ij}, e_{ij}, \Delta e_{ij}$ составляющие.

Связь между тензорами напряжений и деформаций в упругой области устанавливается с помощью закона Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_m &= 3K[e_m - \alpha(T - T_0)]; \quad S_{ij} = 2Ge_{ij}^e; \quad e_{ij}^e = e_{ij} - e_{ij}^p; \\ \Delta\sigma_m &= 3K[\Delta e_m - \Delta(\alpha T)] + \frac{\Delta K}{K}\sigma_m; \quad \Delta e_{ij} = 2G\Delta e_{ij}^e + \frac{\Delta G}{G}S_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

где G – модуль сдвига, K – модуль объемного сжатия и α – коэффициент линейного теплового расширения матрицы материала являются функциями

температуры T , а на заключительных стадиях процесса разрушения – зависят от уровня накопленной поврежденности.

Для описания эффектов монотонного и циклического деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность текучести:

$$F_1 = a_{ij}a_{ij} - R^2; \quad a_{ij} = S_{ij} - c_{ij}, \quad (2)$$

где R – текущий радиус поверхности текучести; c_{ij} – координаты ее центра.

Введем поверхность циклической памяти с радиусом r_p для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений:

$$F_2 = c_{ij}c_{ij} - r_p^2 = 0. \quad (3)$$

Закономерности циклического деформирования в рамках рассматриваемого варианта соотношений упругопластичности описываются с помощью эволюционных уравнений для R , c_{ij} и r_p .

Уравнение для эволюции радиуса поверхности текучести R принимается в виде

$$R = R^0 + \sum_m (\Delta R)_m; \quad (4)$$

$$\Delta R = \bar{q}_1 \Delta x H(F_2) + q_2 (\bar{Q} - R) \Delta x \Gamma(F_2) + q_3 \Delta T.$$

Здесь

$$\bar{q}_1 = \frac{q_1^c A \psi_1 + (1-A) q_1^n}{A \psi_1 + (1-A)}; \quad \bar{Q} = \frac{Q^c A \psi_2 + (1-A) Q^n}{A \psi_2 + (1-A)};$$

$$0 \leq \psi_i \leq 1 \quad (i=1, 2); \quad H(F_2) = \begin{cases} 1, & F_2 = 0 \wedge c_{ij} \dot{c}_{ij} \geq 0; \\ 0, & F_2 \leq 0 \vee c_{ij} \dot{c}_{ij} < 0; \end{cases}$$

$$\Gamma(F_2) = 1 - H(F_2); \quad \Delta x = \left(\frac{2}{3} \Delta e_{ij}^p \Delta e_{ij}^p \right)^{1/2}; \quad A = 1 - \cos^2 \theta;$$

$$\cos \theta = n_{ij}^s n_{ij}^a; \quad n_{ij}^s = \dot{S}_{ij} / (\dot{S}_{mn} \dot{S}_{mn})^{1/2}; \quad n_{ij}^a = a_{ij} / (a_{mn} a_{mn})^{1/2},$$

где q_1^n – модуль изотропного упрочнения при пропорциональном (лучевом) нагружении; q_1^c – модуль изотропного упрочнения при $\theta = \pi/2$; $q_2(\bar{Q} - R)$ – модуль циклического упрочнения при переходных циклических процессах.

Соотношение (4) описывает изменение локальной анизотропии пластического упрочнения в зависимости от параметра A (отклонения вектора догрузки в точке нагружения от нормали к поверхности текучести).

Уравнение для смещения поверхности текучести основано на гипотезе Ильюшина, заключающейся в том, что упрочнение зависит от истории деформирования лишь на некоторой ближайшей части траектории (запаздывание векторных свойств). Эволюция внутренней переменной c_{ij} , описывающей анизотропию процесса пластического деформирования, принимается в виде

$$\begin{cases} c_{ij} = c_{ij}^0 + \sum_m (\Delta c_{ij})_m; \\ \Delta c_{ij} = f(x)[g_1 \Delta e_{ij}^p - g_2 c_{ij} \Delta \xi] - g_3 c_{ij} \langle \Delta T \rangle; \\ g_3 = \frac{\partial g_1}{g_1 \partial T} - \frac{\partial g_2}{g_2 \partial T}; \quad f(x) = 1 + \alpha[1 - \exp(-fx)], \end{cases} \quad (5)$$

где g_1, g_2 и g_3 – модули анизотропного упрочнения. Введение функции $f(x)$ позволяет дополнительно корректировать эволюцию переходных циклических процессов.

Для описания эволюции поверхности памяти необходимо сформулировать эволюционное уравнение

$$\begin{cases} r_p = r_p^0 + \sum_m (\Delta r_p)_m; \\ \Delta r_p = \frac{(\Delta c_{ij} \Delta c_{ij}) H(F_2)}{(c_{mn} c_{mn})^{1/2}} - g_3 r_p \langle \Delta T \rangle. \end{cases} \quad (6)$$

Компоненты тензора приращения пластических деформаций определяются из условия градиентности вектора скорости пластических деформаций к поверхности текучести в точке нагружения:

$$\Delta e_{ij}^p = \lambda a_{ij}, \quad (7)$$

где λ – коэффициент пропорциональности, определяемый из условия прохождения новой поверхности текучести в конце этапа нагружения через конец приращения напряжений [11].

На заключительной стадии процесса накопления повреждений, когда на макроуровне начинают проявляться эффекты разупрочнения, наблюдается заметное влияние поврежденности на упругопластическое поведение материала. В первом приближении это влияние может быть учтено введением эффективных напряжений

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{(1 - \omega_{ij})^n}, \quad (8)$$

где n – экспериментально определяемый параметр материала.

Аналогично определяется эффективная внутренняя переменная

$$\tilde{c}_{ij} = \frac{c_{ij}}{(1 - \omega_{ij})^n}. \quad (9)$$

Для описания процесса накопления повреждений вводим тензор поврежденности ω_{ij} , учитывающий анизотропию развития повреждений [12]. В настоящее время достигнуты значительные успехи в моделировании процесса накопления повреждений на базе гипотезы изотропии с помощью скалярной меры поврежденности.

Тогда

$$\omega_{ij} = \int_0^t \dot{\omega}_{ij} dt; \quad \dot{\omega}_{ij} = \dot{\omega} t_{ij}, \quad (10)$$

где ω – осредненная по направлениям изотропная мера поврежденности; t_{ij} – некоторый единичный тензор, устанавливающий распределение поврежденности по направлениям в зависимости от параметров напряженно-деформированного состояния. Не рассматривая процессы “залечивания” при сжатии, в качестве t_{ij} можно использовать, например, тензор

$$t_{ij} = \left\langle \frac{\sigma_{ij}}{(\sigma_{mn} \sigma_{mn})^{1/2}} \right\rangle. \quad (11)$$

Эволюционное уравнение для ω запишем в виде

$$\dot{\omega} = \frac{m+1}{n+1} f(\beta) Z^m (1 - \omega)^{-n} \langle \dot{Z} \rangle; \quad (12)$$

$$Z = \frac{W - W_0}{W_f - W_0}; \quad \langle \dot{Z} \rangle = \frac{\langle \dot{W} \rangle}{W_f - W_0}; \quad \dot{W} = c_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p,$$

где W_0 – значение W в конце фазы зарождения микроповреждений; W_f – критическое значение W ; m, n, r – экспериментально определяемые параметры материала; $f(\beta)$ – функция параметра $\beta = \sigma_m / \sigma_i$ (σ_i – интенсивность напряжений), учитывающая влияние объемности напряженного состояния на процесс накопления повреждений.

Примем

$$f(\beta) = h^r; \quad (13)$$

$$h = 1 + \frac{3(1-2\nu)}{(1+\nu)} \beta; \quad r = \begin{cases} r_1, & \beta < 0; \\ r_2, & \beta \geq 0. \end{cases}$$

При интегрировании (12) для произвольного процесса нагружения и изменения температуры T получим

$$\omega = 1 - (1 - y)^{1/(n+1)}; \quad y = BZ;$$

$$B = \left[(m+1) \int_0^Z f(\beta) Z^m \langle dZ \rangle / Z^{m+1} \right]^{1/(n+1)}. \quad (14)$$

Согласно приведенным уравнениям (12), (14), каждому процессу, зависящему от истории деформирования, на плоскости $\omega \sim W$ ($\omega \sim Z$) соответствует своя кривая развития поврежденности, и при изменении режима нагружения происходит переход с одной кривой на другую (принцип нелинейного суммирования повреждений [10, 11]).

На фазовой плоскости $\omega \sim y$ существует единая обобщенная кривая развития поврежденности, однако скорость движения по ней зависит от текущих параметров процесса деформирования и изменения T . Введение обобщенной энергетической переменной позволяет установить эквивалентность различных процессов поврежденности (для разных видов напряженных состояний и разных историй деформирования) и их соответствие известным экспериментальным данным.

Критерий прочности поврежденного материала представим в виде*

$$x\sigma_i + (1-x)\sigma_1 \geq \psi; \quad (15)$$

$$\chi_0(T) \leq \chi \leq \chi_f(T), \quad \chi_0(T) = \chi(\omega = \omega_0, T), \quad \chi_f(T) = \chi(\omega = \omega_f, T);$$

$$\psi_0(T) \leq \psi \leq \psi_f(T), \quad \psi_0(T) = \psi(\omega = \omega_0, T), \quad \psi_f(T) = \psi(\omega = \omega_f, T),$$

где σ_1 – главное растягивающее напряжение; χ и ψ – экспериментально определяемые функции материала, что является в настоящее время трудной задачей. Для этого необходимо иметь возможность реализации в экспериментах напряженных состояний, разрушение при которых происходило бы без наличия развитых пластических деформаций (напряженных состояний, близких к трехосному равномерному растяжению).

Поэтому в практических расчетах в качестве критерия образования макротрещины принимается критерий потери устойчивости процесса на-

* **От редакции.** Критерий вида (15) впервые предложен, физически и экспериментально обоснован в Институте проблем прочности НАН Украины.

1. Лебедев А. А. Обобщенный критерий длительной прочности // Термопрочность материалов и конструктивных элементов. – Киев, 1965. – Вып. 3. – С. 69 – 76.
2. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. О форме предельной поверхности механического критерия прочности // Прикл. механика. – 1968. – 4, вып. 3. – С. 45 – 50.
3. Лебедев А. А. О возможном совмещении условий пластичности и хрупкого разрушения // Там же. – Вып. 8. – С. 85 – 93.
4. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 216 с.

копления повреждений, когда производная $\partial\omega / \partial y$ достигает своего критического значения при

$$\frac{\partial\omega}{\partial y} = \left(\frac{\partial\omega}{\partial y} \right)_f. \quad (16)$$

Таким образом, совместное решение уравнений (1)–(16) позволяет определить момент образования макротрещины в элементарном объеме материала с учетом его поврежденности.

Сопоставление результатов численных экспериментов, проведенных на базе развитого варианта уравнений механики поврежденной среды, с экспериментальными данными и известными теоретическими решениями показало качественное и количественное соответствие расчетных траекторий деформирования действительным траекториям для процессов простого и сложного нагружения, монотонного и циклического нагружения, неизотермического нагружения [2, 10, 11, 13–15], малоциклового усталости при одноосных испытаниях [15].

Ниже на базе имеющейся экспериментальной информации [1–8] дана оценка применимости уравнений (1)–(16) для описания процессов малоциклового усталости при многоосных непропорциональных нагружениях.

Анализ результатов. С целью качественной оценки применимости развитого варианта определяющих соотношений проведен численный эксперимент по построению поверхностей равной поврежденности по различным траекториям монотонного деформирования (рис. 1). Точки поверхности соответствуют относительной накопленной энергии разрушения W_f до определенного значения критического параметра поврежденности ω_f по лучам $\beta = \text{const}$, где $W_f = W / W_\tau$ ($W = \int c_{ij} de_{ij}^p$ – накопленная энергия разрушения к моменту, когда $\omega = \omega_f$; W_τ – энергия разрушения для чистого кручения). Из каждого расчета выбиралась энергия, соответствующая значениям параметра $\omega_f = 0,01; 0,1; 0,2$. Расчет выполнялся до значения $\omega_f = 0,2$.

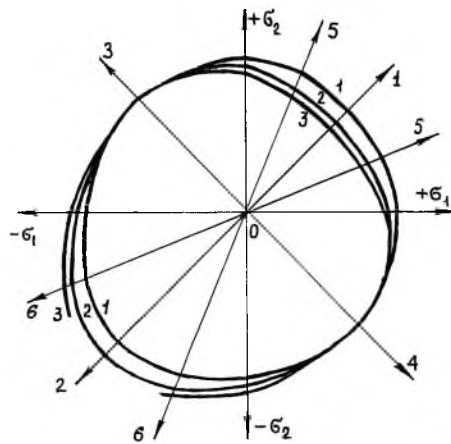


Рис. 1. Поверхности равной поврежденности, построенные по различным лучам монотонного деформирования: $+\sigma_1$ и $+\sigma_2$ – одноосное растяжение (1 – двухосное растяжение; 2 – двухосное сжатие; 3 и 4 – чистое кручение); $-\sigma_1$ и $-\sigma_2$ – одноосное сжатие (5 – двухосное растяжение, $\sigma_2 = \sigma_1 / 2$; 6 – двухосное сжатие, $\sigma_2 = \sigma_1 / 2$).

Из рис. 1 видно, что построенные поверхности равной поврежденности качественно описывают экспериментальные данные [4]. Также можно заметить, что при невысоких уровнях поврежденности ($\omega_f = 0,01$) поверхность имеет форму окружности с радиусом $W_f = 1$, однако с его увеличением она вытягивается в сторону двухосного сжатия и становится более приплюснутой при двухосном растяжении, что также подтверждается экспериментом и результатами теоретического анализа [11].

Рассмотрим пример численного исследования влияния многоосности напряженного состояния и вида траектории нагружения (непропорциональности циклического нагружения) на усталостную долговечность материала (нержавеющая сталь 12X18Н10Т при $T = 20^\circ\text{C}$).

Цель исследования заключалась в изучении таких вопросов:

влияние вида траектории деформирования на скорость накопления повреждений;

определение эквивалентности различных процессов деформирования по какому-либо признаку.

Исследовались различные виды жесткого нагружения (рис. 2). Расчет для каждого вида нагружения проводился до $\omega_f = 0,8$. Для сравнения результатов расчетов между собой принимались следующие критерии:

- 1) одинаковая амплитуда интенсивности деформаций;
- 2) одинаковая амплитуда компонент деформаций;
- 3) одинаковая работа за цикл.

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и табл. 1, 2, где цифры 1–10 соответствуют видам траекторий деформирования на рис. 2.

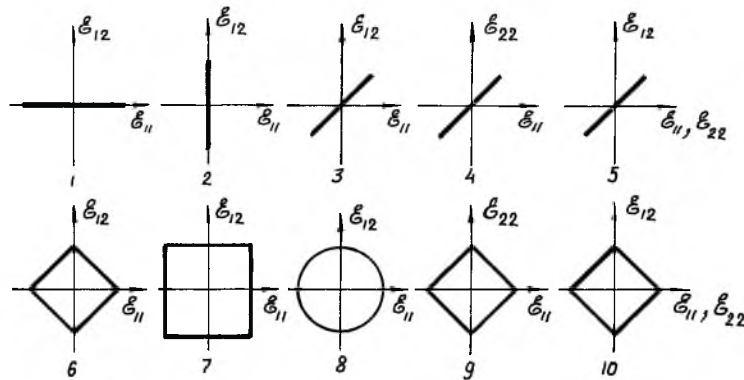


Рис. 2. Траектории жесткого циклического нагружения: пропорциональное симметричное нагружение (1 – одноосное растяжение–сжатие; 2 – одноосное знакопеременное кручение; 3 – одноосное растяжение–сжатие со знакопеременным кручением; 4 – двухосное растяжение–сжатие; 5 – двухосное растяжение–сжатие со знакопеременным кручением) и непропорциональное нагружение со сдвигом фаз 90° (6, 7, 8 – соответственно траектории деформирования в виде ромба, квадрата, окружности; 9, 10 – то же в виде ромба для другого пространства деформаций).

Согласно критерию 1, наибольшая долговечность $N_f = 4455$ цикл наблюдается при знакопеременном кручении, а наименьшая $N_f = 1047$ цикл – для траектории в виде окружности. Число циклов до разрушения в условиях одноосного растяжения–сжатия в соответствии с этим критерием прибли-

зительно вдвое меньше, чем при чистом кручении. Суммарная площадь петель гистерезиса отличается не более чем на 20%, степень пластичности материала (длины траектории пластического деформирования) – значительно. Максимальные интенсивности напряжений практически не отличаются. Влияние непропорциональности нагружения на долговечность при усталости можно наблюдать при сравнении результатов для траекторий 4 и 9 (двухосное растяжение–сжатие в фазе и противофазе соответственно). Усталостная долговечность материала при деформировании по траектории 9 примерно в два раза меньше, чем по траектории 4, а степень пластичности меньше в 1,5 раза. Такая же картина качественно наблюдается для траекторий 3 и 6, а также 5 и 10 (табл. 1). Наиболее повреждающими являются траектории нагружения 8 (непропорциональное нагружение по траектории с постоянно меняющейся кривизной) и 9 (ромб), а долговечности для различных видов нагружения могут отличаться в четыре раза (рис. 3), что качественно соответствует известным экспериментальным данным [1–3, 8]. Интересно заметить, что трехосное нагружение (двухосное растяжение–сжатие со знакопеременным кручением) имеет меньший повреждающий эффект за счет крутильных нагрузок по сравнению с двухосным растяжением–сжатием, причем как для синфазного, так и противофазного нагружения.

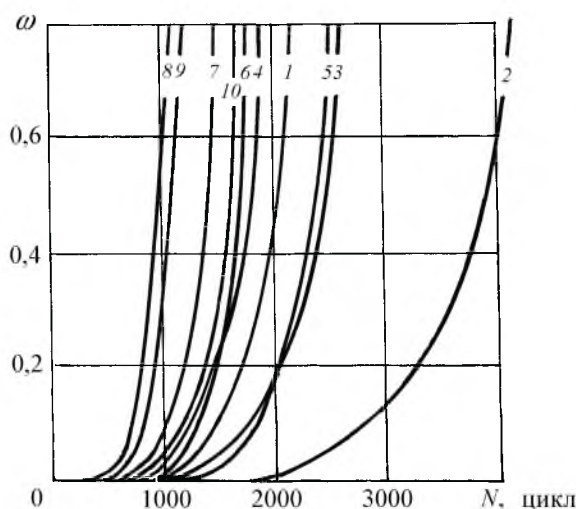


Рис. 3. Зависимость уровня накопленной поврежденности от числа циклов до разрушения для различных траекторий жесткого циклического нагружения.

Для критерия 2 по аналогии с критерием 1 наибольшая долговечность достигнута при циклическом кручении, наименьшая (примерно в пять раз) – при двухосном циклическом растяжении–сжатии с кручением. Наиболее повреждающими оказались траектории 5 и 10. При непропорциональном нагружении получена бóльшая долговечность, чем при пропорциональном, что даже качественно противоречит экспериментальным данным [1–3, 8].

Анализ результатов расчетов усталостной долговечности для рассмотренных выше критериев показал, что они не могут служить критериями

эквивалентности процессов накопления повреждений, так как долговечности при различных траекториях нагружения могут отличаться в несколько раз при одинаковых интенсивностях и амплитудах деформаций.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчетов на усталостную долговечность стали 12Х18Н10Т по критерию $\varepsilon_i^{\max} = 0,007$

Траектория	$\varepsilon_{ij}, \%$	x	$W_0,$ МДж/см ³	N_0	$W_{sf},$ МДж/см ³	$W_f,$ МДж/см ³	N_f
1	$\varepsilon_{11} = 0,60$	20	895	941	11268	1979	2203
2	$\varepsilon_{12} = 0,50$	42	902	1910	11417	1996	4455
3	$\varepsilon_{11} = 0,25; \varepsilon_{12} = 0,45$	36	913	1678	11474	1995	3870
4	$\varepsilon_{11} = 0,60; \varepsilon_{22} = 0,30$	21	889	925	11279	1983	2183
5	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 0,20; \varepsilon_{12} = 0,40$	31	903	1420	11231	1963	3289
6	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = 0,48$	21	1006	894	9930	1992	1819
7	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = 0,37$	38	783	594	9710	1985	1506
8	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = 0,50$	31	752	397	8267	1985	1047
9	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 0,51$	15	916	525	9221	1909	1135
10	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{12} = 0,32$	9	946	845	10072	1890	1778

Примечание. Здесь и в табл. 2: ε_{ij} – тип и уровень деформации; x – степень пластичности материала; W_0 и N_0 – энергия и число циклов, соответствующие окончанию фазы зарождения повреждений; W_{sf} – суммарная площадь петель гистерезиса; W_f и N_f – энергия и число циклов до разрушения соответственно.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчетов на усталостную долговечность стали 12Х18Н10Т по критерию $\Delta W = c_{ij} \Delta \varepsilon_{ij}^p = 0,921$ МДж/см³

Траектория	$\varepsilon_{ij}, \%$	x	$W_0,$ МДж/см ³	N_0	$W_{sf},$ МДж/см ³	$W_f,$ МДж/см ³	N_f
1	$\varepsilon_{11} = 0,60$	20	895	941	11268	1979	2203
2	$\varepsilon_{12} = 0,68$	39	559	597	9713	1988	2237
3	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = 0,44$	29	695	761	10190	1987	2246
4	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 0,33$	19	886	930	10611	1958	2093
5	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = \varepsilon_{22} = 0,30$	23	788	829	10231	1898	2137
6	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = 0,44$	22	1091	1203	10773	1994	2263
7	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = 0,31$	49	1112	1355	11854	1993	2430
8	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{12} = 0,35$	48	1226	1521	11338	1997	2477
9	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 0,40$	15	1231	1357	11931	1943	2226
10	$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{12} = 0,30$	19	1049	1115	10774	1902	2131

Согласно критерию 3, процессы накопления повреждений полагали эквивалентными, если за один цикл изменения деформаций $\Delta W = c_{ij} \Delta \varepsilon_{ij}^p$ одинакова. Из этого условия подбирались соответствующие амплитуды деформаций. Анализ результатов свидетельствует (табл. 2), что подобранные таким образом процессы действительно являются эквивалентными (расхождение в долговечностях не более 10%). В то же время длина траектории пластического деформирования до разрушения изменяется в гораздо боль-

ших пределах (более чем в три раза). Наименьшая длина пластического деформирования соответствует траектории 9, наибольшая – траекториям 7 и 8. Это говорит о том, что степень пластичности материала не может быть критерием эквивалентности процессов при малоциклового усталости.

Сравнение значений работы до разрушения при разных амплитудах деформаций, например при одноосном растяжении–сжатии, показывает, что при практически одинаковой работе $W = \int c_{ij} de_{ij}^p$ работа $W_{sf} = \int S_{ij} de_{ij}^p$ (суммарная площадь петель гистерезиса до разрушения) значительно изменяется (от 7575 МДж/см³ при $\varepsilon_{11} = 0,018$ до 11268 МДж/см³ при $\varepsilon_{11} = 0,006$) – увеличивается с уменьшением амплитуды деформаций. Поэтому влияние этой работы также не может быть критерием эквивалентности процессов.

Таким образом, сравнение результатов численных исследований с известными экспериментальными данными свидетельствует о том, что введение в эволюционное уравнение (12) функции влияния объемности напряженного состояния $f(\beta)$ для варианта соотношений механики поврежденной среды позволяет описать основные эффекты циклического упругопластического деформирования и накопления повреждений при многоосных напряженных состояниях и произвольных траекториях деформирования материала, а также удовлетворительно оценить долговечность конструктивных узлов машиностроительных объектов, работающих в условиях термосилового нагружения.

Резюме

Проаналізовано відомі експериментальні дані про вплив складного навантаження і виду траєкторії деформування на процес накопичення пошкоджень при втомі. Виходячи з позиції механіки пошкоджень середовища, розвинуто варіант визначальних співвідношень, що описують процеси пружнопластичного деформування і накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах (метали та їх сплави) при складних непропорційних шляхах малоциклового навантаження. Модель пошкоджень складається з трьох взаємозв'язаних складених частин: співвідношень, що визначають пружнопластичну поведінку матеріалу з урахуванням впливу процесу руйнування; рівнянь, що описують кінетику накопичення пошкоджень; критерію міцності пошкодженого матеріалу.

Для якісної оцінки визначальних співвідношень проведено числовий експеримент щодо побудови поверхностей рівної пошкоженості.

Досліджено вплив складного напруженого стану та виду траєкторії деформування на довговічність металів за малоциклової втоми. Показано, що розвинутий варіант визначальних співвідношень пошкодженого середовища описує основні ефекти циклічного пружнопластичного деформування і накопичення пошкоджень при складному напруженому стані та вільних траєкторіях деформування матеріалу.

1. *Beaver P. W.* Biaxial fatigue and fracture of metals: Review // *Metals Forum*. – 1985. – **8**, No. 1. – P. 14 – 29.
2. *Garud Y. S.* A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings // *Trans. ASME, Ser. D, J. Engng. Mater. Technol.* – 1981. – **103**, No. 2. – P. 118 – 125.
3. *Kanazawa K., Miller K. J., and Brown M. W.* Low cycle fatigue under out-of-phase loading conditions // *Trans. ASME, Ser. D, J. Basic Engng.* – 1977. – **99**, No. 3. – P. 32 – 39.
4. *Bodner S. R. and Lindholm U. S.* An incremental criterion for time-dependent failure of materials // *Ibid.* – 1976. – **98**, No. 2. – P. 51 – 58.
5. *Можаровский Н. С., Шукаев С. Н.* Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения // *Пробл. прочности*. – 1988. – № 10. – С. 47 – 54.
6. *Socie D.* Multiaxial fatigue damage models // *Trans. ASME, Ser. D, J. Engng. Mater. Technol.* – 1987. – **109**, No. 4. – P. 293 – 298.
7. *Jordan E. U., Brown M. W., and Miller K. J.* Fatigue under severe nonproportional loading // *ASTM STP 853*. – ASTM, Philadelphia, 1985. – P. 569 – 585.
8. *Wu Han C. and Yang C. C.* On the influence of strain-path in multiaxial fatigue failure // *Trans. ASME, Ser. D, J. Engng. Mater. Technol.* – 1987. – **109**, No. 2. – P. 107 – 115.
9. *Corum J. M. and Sartory W. K.* Assessment of current high-temperature design methodology based on structures failure tests // *J. Pressure Vessel Technol.* – 1987. – **109**, No. 2. – P. 160 – 169.
10. *Chaboche J. L.* Continuous damage mechanics – a tool to describe phenomena before crack initiation // *Nuclear Engng. Desing.* – 1981. – **64**. – P. 233 – 247.
11. *Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г.* Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 1999. – 228 с.
12. *Коротких Ю. Г., Волков И. А., Гордлеева И. Ю.* Моделирование эволюции накопления повреждений с учетом анизотропии процесса // *Прикладная механика и технологии машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред. В. И. Ерофеева, С. И. Смирнова и Г. К. Сорокина*. – Н. Новгород: Интелсервис, 1997. – Ч. 3. – С. 52 – 55.
13. *Маковкин Г. А.* Обоснование применимости модели пластичности с комбинированным упрочнением для процессов сложного нагружения материалов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Н. Новгород, 1992. – 20 с.
14. *Коротких Ю. Г., Маковкин Г. А., Сбитнев В. А.* Моделирование эффектов локальной анизотропии упрочнения в рамках модели пластичности с комбинированным упрочнением // *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физ.-мех. процессов: Межвуз. сб.* – М.: Т-во науч. изд. КМК. – С. 23 – 31.

15. *Коротких Ю. Г., Бех О. И.* Уравнения механики поврежденной среды для циклических неизотермических процессов деформирования металлов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. – Горький, 1989. – С. 28 – 37.

Поступила 10. 02. 2000