ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57282— 2016

Расчеты и испытания на прочность

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛИ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Общие требования

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2016

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 132 «Техническая диагностика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2016 г. № 1773-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. №162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, 2016

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и сокращения 1
4 Общие положения 2
5 Основные уравнения термопластичности 2
6 Рекомендуемые расчетные модели 4
7 Базовые эволюционные уравнения накопления повреждений в конструкционных материалах . . . 6
8 Критерий окончания стадии развития рассеянных микроповреждений 8

Введение

В процессе эксплуатации многие элементы конструкций работают в условиях малоцикловой усталости. На стадии до зарождения и развития макротрещины выделяют период, связанный с изменением структуры, зарождением и накоплением рассеянных микроповреждений.

В последние годы для решения задач, связанных с расчетом поврежденности материала, успешно развивается новая дисциплина — механика поврежденной среды, в рамках которой предложен ряд подходов к расчету поврежденности.

К настоящему времени сформулированы базовые уравнения термопластичности, предназначенные для описания основных эффектов, учет которых необходим для адекватного моделирования процессов накопления усталостных повреждений и расчета поврежденности на стадии до образования макродефекта в конструктивных элементах ответственных технических объектов при термосиловых нестационарных нагружениях.

Настоящий стандарт разработан с целью обеспечения методической основы применения методов механики поврежденной среды для расчета эксплуатационной поврежденности материала деталей и конструктивных элементов, подвергаемых малоцикловым воздействиям при сложных термосиловых нагружениях.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Расчеты и испытания на прочность

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛИ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Общие требования

Calculation and strength testing.
Determination of damage under low-cycle fatigue of steel. General requirements

Дата введения — 2017—10—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие требования к расчетному методу определения величины накопленной эксплуатационной поврежденности стальных конструктивных элементов, подвергаемых малоцикловым усталостным воздействиям.

Регламентируемый настоящим стандартом метод позволяет на основании подходов механики поврежденной среды сделать оценку уровня эксплуатационной поврежденности в зоне контроля при известных параметрах усталостных воздействий.

Номенклатура объектов, поврежденность материала которых может быть определена в соответствии с регламентируемым методом, устанавливается в техническом задании на контроль.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 25.505 Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении

ГОСТ 25859 Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены термины и определения по ГОСТ 25.505, ГОСТ 25859.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

МНЦУ — многоцикловая усталость;

МПС — механика поврежденной среды;

МЦУ — малоцикловая усталость.

Издание официальное

4 Общие положения

4.1 Рекомендуемый настоящим стандартом алгоритм расчета поврежденности при МЦУ базируется на использовании уравнений термопластичности, описывающих основные эффекты, учет которых необходим для адекватного моделирования процессов усталостной поврежденности материала конструктивных элементов при термосиловых нестационарных нагружениях.

4.2 Учитывают следующие процессы, протекающие в материале при накоплении повреждений:

- монотонное и циклическое упрочнение при пропорциональном и непропорциональном нагружении с учетом переходных циклических процессов и стабилизированного циклического поведения материала;
- изменение локальной анизотропии пластического деформирования (изменение модуля упрочнения) в результате вращения главных площадок тензора деформаций при изломе траектории деформирования (изменение направления нагружения);
- неизотермическое пластическое деформирование материала при различных законах изменения температуры и механической деформации;
- прогрессирующее изменение прочностных и жесткостных характеристик материала в процессе накопления усталостных повреждений на второй стадии развития рассеянных по объему повреждений до образования макротрещины.

5 Основные уравнения термопластичности

5.1 Тензоры напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij} раскладывают на шаровую (гидростатическую) σ, e и девиаторную компоненты (σ'_{ij}) и (e'_{ij}).

5.2 Принимают, что компоненты девиатора тензора деформаций e'_{ij} и их приращений $\Delta e'_{ij}$ являются суммой упругих e'^{e}_{ij} и пластических e'^{p}_{ij} компонент:

$$e'_{ij} = e'^{e}_{ij} + e'^{p}_{ij}, \tag{1}$$

$$\Delta e'_{ij} = \Delta e'^{e}_{ij} + \Delta e'^{p}_{ij}. \tag{2}$$

5.3 Материал считают пластически несжимаемым:

$$3e^{p}_{ii} = e^{p}_{11} + e^{p}_{22} + e^{p}_{ee} \equiv 0, \tag{3}$$

$$\Delta e^{p}_{ii} \equiv 0. \tag{4}$$

5.4 Величина упругого изменения объема описывается соотношением:

$$\frac{\Delta V}{V} = 3e = 3e^{e} = e^{e}_{11} + e^{e}_{22} + e^{e}_{33} = e_{ii}. \tag{5}$$

5.5 Рассматривают упругоизотропные среды, характеризуемые зависящими от температуры T модулем упругости Юнга $E(T)$, коэффициентом Пуассона $\nu(T)$, объемным модулем упругости $K(T)$ и объемным модулем сдвига $G(T)$.

5.6 Анизотропию упругих свойств, вызванную процессом накопления повреждений, не учитывают.

5.7 Связь между напряжениями (σ_{ij}) и упругими составляющими тензора деформаций (e^{e}_{ij}) устанавливают на базе уравнений термоупругости:

$$\sigma = 3K[e - \alpha(T - T_0)], \tag{6}$$

$$\Delta\sigma = 3K[\Delta e - \Delta(\alpha T)] + \frac{\Delta K}{K}\sigma, \tag{7}$$

$$\sigma'_{ij} = 2Ge'^{e}_{ij}, \tag{8}$$

$$\Delta\sigma'_{ij} = 2G\Delta e'^{e}_{ij} + \frac{\Delta G}{G}e'^{e}_{ij}, \tag{9}$$

где α — коэффициент линейного расширения, являющийся функцией температуры.

5.8 На основании гипотезы кинематического и изотропного упрочнения поверхность текучести F_p в пространстве девиаторов напряжений представляют сферой с радиусом C_p и координатами центра ρ_{ij} (тензор микронапряжений):

$$F_p = (\sigma'_{ij} - \rho_{ij})(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}) - C_p^2 = 0 \quad (10)$$

или

$$(S_{ij}S_{ij})^{1/2} - C_p = 0;\ S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}. \quad (11)$$

5.9 Согласно ассоциированному закону течения считают, что

$$\Delta e_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F_p}{\partial \sigma'_{ij}} = \lambda S_{ij}. \quad (12)$$

5.10 Принимают, что радиус поверхности текучести изменяется в зависимости от приращения $\Delta\chi$ длины дуги χ траектории пластического деформирования и приращения температуры следующим образом:

$$\Delta C_p = \bar{q}_\chi \Delta\chi H(F_\rho) + q_T \Delta T + a_u(\bar{Q}_s - C_p)\Delta\chi\Gamma(F_\rho) + \Delta C_{0T}, \quad (13)$$

где $C_p = C_{p0} + \sum\Delta C_p$,

$$\bar{q}_\chi = \frac{q_c A\psi_1 + (1-A)q_k}{\psi_1 A + (1-A)}, \quad (14)$$

$$\bar{Q}_s = \frac{Q_c A\psi_2 + (1-A)Q}{\psi_2 A + (1-A)}, \quad (15)$$

$$F_\rho = \rho_{ij}\rho_{ij} - \rho_{\max}^2 = 0, \quad (16)$$

$$\Gamma(F_\rho) = 1 - H(F_\rho),\ \Delta\chi = \left\langle \frac{2}{3}\Delta e_{ij}^p \Delta e_{ij}^p \right\rangle^{1/2}, \quad (17)$$

где $H(F_\rho) = \begin{cases} 1 \text{ при } F_p = 0 \text{ и } \rho_{ij}\Delta\rho_{ij} \geq 0, \\ 0 \text{ при } F_p < 0 \text{ и } \rho_{ij}\Delta\rho_{ij} < 0, \end{cases}$

$$\chi_m = \sum\Delta\chi H(F_\rho),\ \chi = \sum\Delta\chi, \quad (18)$$

$$A = 1 - \cos^2\theta,\ \cos\theta = n_{ij}^e n_{ij}^s,\ n_{ij}^e = \frac{\Delta e'_{ij}}{(\Delta e'_{ij}\Delta e'_{ij})^{1/2}},\ n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij}S_{ij})^{1/2}}. \quad (19)$$

5.11 В уравнении (13) первый член описывает изотропное упрочнение в результате монотонного пластического деформирования ($H(F_\rho) = 1$ и $\Gamma(F_\rho) = 0$), второй член — изменение радиуса поверхности текучести при изменении температуры, третий член описывает циклическое упрочнение материала ($H(F_\rho) = 0$ и $\Gamma(F_\rho) = 1$), последний член описывает восстановление (возврат) радиуса поверхности текучести в условиях высокотемпературной выдержки (отжига).

5.12 Модуль изотропного упрочнения $\bar{q}_\chi$ (14) учитывает изменение изотропного упрочнения материала в зависимости от направления деформирования в данной точке траектории M — угла θ между вектором приращения девиатора деформации ($\Delta e'_{ij}$), имеющим направляющие косинусы n_{ij}^e, и нормалью к поверхности текучести в точке M, определяемой направляющими косинусами n_{ij}^s.

5.13 При пропорциональном нагружении $\theta = 0$, $\cos\theta = 1$, $A = 0$, $\bar{q}_\chi = q_\chi$, где q_χ — модуль изотропного упрочнения материала при одноосном растяжении образца.

5.14 При непропорциональном нагружении с углом $\theta = \frac{\pi}{2}$ (вектор $\Delta e'_{ij}$ перпендикулярен нормали к поверхности текучести в точке нагружения) $A = 1$, $\bar{q}_\chi = q_c$, где q_c — модуль упрочнения при нагружении по касательной к поверхности текучести («нейтральное» нагружение).

5.15 В формуле (15) для циклического изотропного упрочнения при циклическом пропорциональном нагружении $\theta = 0$ и $\bar{Q}_s = Q$ и при циклическом непропорциональном нагружении $\theta = \frac{\pi}{2}$, $Q_s = Q_c$,

ψ_1 и ψ_2 ($0 \le \psi_1 \le 1$, $0 \le \psi_2 \le 1$) — параметры, позволяющие корректировать влияние модулей q_χ, q_c, Q и Q_c на изотропное упрочнение материала.

5.16 При стационарном циклическом деформировании материала с постоянной амплитудой деформации и $T = const$ ($\rho_{max} = const$, $C_p(F_\rho) = 0$, $\Gamma(F_\rho) = 1$, $\overline{Q}_s = const$) радиус поверхности текучести C_p стремится к $\overline{Q}_s = const$ и параметры петли гистерезиса стремятся к своему стационарному значению, определяемому значением Q_s, которое зависит от текущих значений T и ρ_{max}.

5.17 Эволюционное уравнение для изменения координат центра поверхности текучести (тензора ρ_{ij}) имеет вид:

$$\Delta\rho_{ij} = g_1\Delta e^p_{ij} - g_2\rho_{ij}\Delta\chi - g_T\rho_{ij} < \Delta T > + g_{0T}\rho_{ij}, \quad (20)$$

где g_1 и g_2 — модули кинематического упрочнения, являющиеся функциями температуры. Модуль g_1 определяет перемещение центра поверхности текучести в результате приращения тензора пластических деформаций Δe^p_{ij}, модуль g_2 — его постепенную релаксацию (при $\Delta e^p_{ij} \equiv 0$ координаты центра ρ_{ij} стремятся к своему начальному нулевому значению).

5.18 Модуль g_T описывает изменение координат центра поверхности текучести в связи с повышением температуры T:

$$g_T = \frac{\Delta g_1}{g_1\Delta T} - \frac{\Delta g_2}{g_2\Delta T} > 0, \quad (21)$$

$$g_T = 0 \text{ при } \Delta T \le 0, \quad (22)$$

$$\Delta\rho_{max} = \frac{(\rho_{ij}\Delta\rho_{ij})H(F_\rho)}{(\rho_{ij}\rho_{ij})^{1/2}} - g_2\rho_{max}\Delta\chi - g_T\rho_{max} < \Delta T > - g_{0T}\rho_{max}. \quad (23)$$

5.19 Соотношения (16, 17, 23) определяют изменение радиуса поверхности текучести и позволяют автоматически отделить циклическое нагружение от монотонного с помощью операторов $H(F_\rho)$ и $\Gamma(F_\rho)$.

6 Рекомендуемые расчетные модели

6.1 Изотропное упрочнение

6.1.1 При $g_1 = g_2 = g_T = g_{0T} \equiv 0$ в (20) и $\rho_{ij} \equiv 0$ имеет место случай чисто изотропного нелинейного упрочнения, описываемого уравнением (13), (при этом $H(F_\rho) \equiv 1$ и циклическое упрочнение также не учитывают).

6.1.2 Если в (14) и (15) $\psi_1 \equiv 0$ и $\psi_2 \equiv 0$, то изменение изотропного и кинематического упрочнения при непропорциональном деформировании не учитывают: $\overline{q}_\chi = q_\chi$, а $\overline{Q}_s = Q$ (кинематическое и изотропное упрочнение, соответствующее диаграмме одноосного растяжения материала).

6.1.3 Если $q_\chi \equiv const$, то описывают линейное изотропное упрочнение.

6.1.4 Если $q_\chi \equiv 0$, то описывают идеально пластический материал с постоянной поверхностью текучести $C_p \equiv C_{p0}$.

6.2 Кинематическое упрочнение

6.2.1 При $q_\chi = q_c = q_T = a_ц \equiv 0$ в (13) имеет место случай чисто кинематического нелинейного упрочнения, описываемого уравнением (20).

6.2.2 Если $g_2 \equiv 0$ и $g_1 = const$, имеет место случай линейного кинематического упрочнения.

6.3 Модель J.L.Chaboche (CHAB)

6.3.1 Основные уравнения модели CHAB имеют вид:

- уравнение поверхности текучести:

$$F = \left[\frac{3}{2}(S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij})\right]^{1/2} - R = 0; \quad (24)$$

- уравнение для изменения радиуса поверхности текучести:

$$R = k + R_0\hat{\varepsilon}^p + R_\infty(1 - e^{-b\hat{\varepsilon}^p}), \tag{25}$$

$$\Delta R = R_0\Delta\hat{\varepsilon}^p + R_\infty be^{-b\hat{\varepsilon}^p}\Delta\hat{\varepsilon}^p = (R_0 + R_\infty be^{-b\bar{e}^p})\Delta\hat{e}^p; \tag{26}$$

- уравнение для эволюции центра поверхности текучести

$$\Delta\alpha_{ij} = \frac{2}{3}C_i\Delta e_{ij}^p - \gamma_i\alpha_{ij}\Delta\hat{\varepsilon}^p + \frac{1}{C_i}\frac{\partial C_i}{\partial T}\Delta\alpha_{ij}, \tag{27}$$

$$S_{ij} = \sigma'_{ij};\ \alpha_{ij} = \rho_{ij};\ \Delta\hat{\varepsilon}^p = \Delta\chi;\ \hat{\varepsilon}^p = \chi;\ R = \sqrt{\frac{3}{2}C_p};\ k = \sqrt{\frac{3}{2}C_{p0}}. \tag{28}$$

Примечание — Уравнения (24 — 28) являются частным случаем уравнений (8 — 23) и описывают нелинейное кинематическое и изотропное упрочнение без учета циклического упрочнения при

$$q_\chi = (R_0 + R_\infty be^{-b\bar{\varepsilon}^p}),\ \frac{3}{2}C_1 = g_1,\ \gamma_1 = g_2,\ i = 1. \tag{29}$$

6.3.2 Следует учитывать, что упрочнение при монотонном деформировании носит как кинематический, так и изотропный характер; радиус поверхности текучести может как возрастать (упрочнение), так и убывать (разупрочнение).

6.3.3 Модуль упрочнения зависит от направления вектора догрузки в точке нагружения на поверхности текучести (от угла θ между векторами S_{ij} и Δe_{ij}).

6.3.4 При непропорциональном циклическом нагружении возникает дополнительное циклическое упрочнение по сравнению с пропорциональным циклическим нагружением с той же интенсивностью амплитуды деформаций.

6.3.5 Переходные нестационарные циклические процессы в основном зависят от изотропной части упрочнения.

6.3.6 Изотропное упрочнение (эволюция радиуса поверхности текучести C_p) состоит из трех типов: монотонное, циклическое пропорциональное, циклическое непропорциональное.

6.3.7 Параметры стабилизированной петли гистерезиса в основном не зависят от места стабилизации петли, предыдущей истории циклического деформирования и определяются интенсивностью амплитуды деформаций (величиной ρ_{max} в (23) и параметрами непропорционального циклического нагружения (углом θ и параметром A).

6.3.8 Закономерности циклического деформирования в стабилизированной петле в основном определяются анизотропной частью упрочнения (эволюцией ρ_{ij}); закономерности анизотропного упрочнения для монотонных и циклических процессов могут быть различны.

6.3.9 При жестком циклическом нагружении и начальной анизотропии по амплитуде напряжений в полуциклах растяжения и сжатия наблюдается релаксация средних напряжений цикла до нуля за конечное число циклов (релаксация средних значений ρ_{ij}).

6.3.10 Закономерности циклического деформирования описывают при помощи эволюционных уравнений (13 — 23) для ΔC_p и $\Delta\rho_{ij}$.

6.3.11 На второй стадии процесса накопления рассеянных по объему усталостных повреждений наблюдается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала. В первом приближении это влияние может быть учтено на базе концепции деградирующего континуума введением эффективных напряжений

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{1 - \omega} \tag{30}$$

или эффективных модулей упругости

$$\tilde{E} = E(1 - \omega),\ \tilde{G} = G(1 - \omega),\ \tilde{K} = K(1 - \omega). \tag{31}$$

6.3.12 Эффективную внутреннюю переменную $\tilde{\rho}_{ij}$ определяют следующим образом:

$$\tilde{\rho}_{ij} = \frac{\rho_{ij}}{1 - \omega}. \tag{32}$$

6.3.13 Должна быть скорректирована упругая область допустимых состояний материала, определяемая поверхностью текучести. Зависимость поверхности текучести от накопленной поврежденности определяет развитие процессов пластичности поврежденного материала:

$$\tilde{C}_p = C_p\left(1 - \frac{\omega_p}{\omega_{pf}}\right) \geq 0, \tag{33}$$

где $\omega_{pf} \approx 0{,}8$.

7 Базовые эволюционные уравнения накопления повреждений в конструкционных материалах

7.1 За физическую меру поврежденности материала ω принимают относительную объемную долю дефектов в эталонном элементарном объеме материала:

$$\omega = \frac{V}{V_f},\ \Delta\omega = \frac{\Delta V}{V_f},\ \omega = \sum\Delta\omega;\ 0 \leq \omega \leq \omega_f \leq 1, \tag{34}$$

где 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).

7.2 В качестве характеристики, коррелирующей с энергией, затраченной на образование дефектов при нестационарном упругопластическом деформировании, используют работу W_p тензора микронапряжений ρ_{ij} на пластических деформациях e_{ij}^p:

$$W_p = \int \rho_{ij} de_{ij}^p. \tag{35}$$

7.3 В инженерных расчетах в качестве эквивалентных напряжений или деформаций, как правило, рекомендуется выбирать интенсивности соответствующих тензоров:

$$\sigma_u = (\sigma'_{ij}\,\sigma'_{ij})^{1/2},\ e_u = (e'_{ij}\,e'_{ij})^{1/2}, \tag{36}$$

или максимальные касательные (приведенные) напряжения

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2},\ e_{max} = \frac{e_1 - e_3}{2}. \tag{37}$$

7.4 Следует учитывать существенное влияние на усталостную долговечность жесткости напряженного состояния, характеризуемого интенсивностью тензора напряжений σ_u и его шаровой (гидростатической) компонентой σ:

$$\sigma = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\sigma_{ii}}{3}. \tag{38}$$

7.5 В качестве параметров жесткости напряженного состояния используют параметр β или функции от β:

$$\beta = \frac{\sigma}{\sigma_u}, \tag{39}$$

$$k = \left[1 + \frac{3(1-2\nu)}{(1+\nu)}\beta^2\right]. \tag{40}$$

7.6 В области малоцикловой усталости при одноосном растяжении — сжатии скорость накопления усталостных повреждений связана с накопленной в данном объеме материала энергией W_p, затраченной на образование дефектов, экспоненциальной зависимостью:

$$\dot{\omega} = f(\sigma, T)\exp W_p(\sigma_u^2). \tag{41}$$

7.7 Следует учитывать, что при непропорциональном циклическом нагружении критерии (36), (37) и критерий эквивалентных деформаций или интенсивности деформаций e_u

$$e_u = (e'_{ij}\, e'_{ij})^{1/2} = \left[(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)\right]^{1/2} \tag{42}$$

не являются критериями эквивалентности и могут привести к неконсервативным оценкам.

7.8 В рамках подходов МПС процесс накопления усталостных повреждений до образования макроскопической трещины считается состоящим из двух стадий:

- стадии зарождения и роста пор, при которой поры не взаимодействуют друг с другом; влияние поврежденности на физико-механические характеристики материалов отсутствует, продолжительность первой стадии характеризуется количеством циклов N_a;
- стадии развития поврежденности путем слияния образовавшихся микропор в микроскопические трещины, при которой наблюдается прогрессирующее влияние поврежденности на физико-механические характеристики материалов; продолжительность стадии характеризуется количеством циклов ($N_f - N_a$).

7.9 Продолжительность первой стадии (число циклов N_a) тем больше, чем меньше амплитуда деформаций.

7.10 Если перестроить кривые $\omega\left(\frac{N}{N_f}\right)$ в кривые $\omega\left(\frac{N-N_a}{N_f-N_a}\right)$, т.е. рассматривать процесс накопления повреждений только на второй стадии, то эти кривые сольются в одну обобщенную кривую, характеризующую процесс накопления усталостных повреждений для всех амплитуд.

7.11 Общую структуру эволюционных уравнений накопления усталостных повреждений в элементарном объеме материала следует представлять в виде:

$$d\omega = \psi_\omega \frac{(\alpha + 1)}{(r + 1)} f(\beta) z^\alpha (1 - \omega)^{-r} dz \tag{43}$$

или

$$\Delta\omega = \psi_\omega \frac{(\alpha + 1)}{(r + 1)} f(\beta) z^\alpha (1 - \omega)^{-r} \Delta z, \tag{44}$$

$$z = z_p + z_e,\ dz = dz_p + dz_e, \tag{45}$$

$$z_p = \frac{W_p - W_a}{W_{pf} - W_a},\ z_e = \frac{W_e - W_y}{W_{ef} - W_y}, \tag{46}$$

$$\langle \dot{z}_p \rangle = \frac{\langle \dot{W}_p \rangle}{\langle W_{pf} - W_a \rangle},\ \langle \dot{z}_e \rangle = \frac{\langle \dot{W}_e \rangle}{\langle W_{ef} - W_y \rangle}, \tag{47}$$

$$\begin{aligned} W_p &= \int \langle \rho_{ij}\, de^p_{ij} \rangle,\ \Delta W_p = \langle \rho_{ij} \Delta e^p_{ij} \rangle, \\ W_e &= \int \langle \sigma_{ij}\, de'^e_{ij} \rangle,\ \Delta W_e = \langle \sigma_{ij} \Delta e'^e_{ij} \rangle, \end{aligned} \tag{48}$$

где W_a — значение W_p в конце первой стадии процесса накопления усталостных повреждений, W_y — значение W_e, соответствующее пределу усталости, W_{pf} и W_{ef} — значения энергий, соответствующие образованию макроскопической трещины с характерным размером ~ 1 мм, когда процессы МЦУ и МНЦУ развиваются изолированно, α и r — параметры материала.

7.12 В области МЦУ $z_e << z_p$, $z \approx z_p$.

7.13 В области МНЦУ $z_p = 0$, $z = z_c$.

7.14 В переходной области z определяется выражением (45).

7.15 Выражение для поврежденности имеет вид:

$$\omega = 1 - \left\{1 - (\alpha + 1) \int_0^z \psi_\omega f(\beta) z^\alpha dz\right\}^{\frac{1}{1+r}} \tag{49}$$

или

$$\omega = 1 - \left\{1 - (\alpha + 1) \sum_1^n \psi_{\omega k} f_k(\beta) z_k^\alpha \langle \Delta z_k \rangle\right\}^{\frac{1}{1+r}}. \tag{50}$$

7.16 Другое выражение для поврежденности

$$\omega = 1 - \left[1 - y^{\alpha+1}\right]^{\frac{1}{r+1}}, \tag{51}$$

где $y = Az$,

$$A = \left(\frac{(\alpha+1)\int_0^z \psi_\omega f(\beta) z^\alpha dz}{z^{(\alpha+1)}}\right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \tag{52}$$

или

$$A = \left(\frac{(\alpha+1)\sum_1^n \psi_{\omega k} f_k(\beta) z_k^\alpha <\Delta z_k>}{z^{(\alpha+1)}}\right)^{\frac{1}{\alpha+1}}. \tag{53}$$

7.17 Для лучевых путей изотермического нагружения ($\psi_{\omega k} = 1$, $f_k(\beta_k) = const$, $\beta_k = const$, $T_k = const$)

$$A = f_k(\beta_k),\ y = f_k(\beta_k) z. \tag{54}$$

7.18 При чистом кручении ($f_k(\beta_k) = 1$, $\beta_k = 0$):

$$y_{кр} = z_{кр} = \frac{W - W_{акр}}{W_{pf} - W_{акр}}, \tag{55}$$

$$\omega = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{1-m}}\right]^{\frac{1}{\beta+1}}. \tag{56}$$

Примечание — Уравнение (56) справедливо для частного случая регулярного циклического нагружения (растяжение — сжатие). Для этого случая в уравнении (51) параметр y может быть выражен через отработанное количество циклов:

$$y = \frac{N}{N_f}. \tag{57}$$

Уравнение для регулярного циклического нагружения (56) является частным случаем уравнения (51).

8 Критерий окончания стадии развития рассеянных микроповреждений

8.1 В качестве критерия окончания стадии развития рассеянных микроповреждений (образования макротрещины) может быть принят критерий потери устойчивости процесса накопления повреждений, когда производная $\partial\omega/\partial y$ достигает своего критического значения

$$\frac{\partial\omega}{\partial y} = \left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)_f. \tag{58}$$

8.2 При выполнении критерия (58) дальнейшее развитие процесса поврежденности зависит от любых случайных факторов, и контролировать этот процесс невозможно.

8.3 Условие (58) при одноосном растяжении — сжатии приблизительно соответствует значению

$$\omega = \omega_f \approx 0{,}8. \tag{59}$$

8.4 В зависимости от свойств материала и многоосности напряженного состояния, учитываемого функцией $f(\beta)$, ω_f может принимать значения от 0,2 до 0,8. Кроме того, материал может быть разрушен при некотором напряженном состоянии в упругой области после некоторой истории деформирования в пластической области, в результате которой была накоплена поврежденность $\omega < \omega_f$. Для учета этого обстоятельства необходимо сформулировать силовой критерий прочности

$$\Phi(\sigma_{ij}, \omega, T) < 0. \tag{60}$$

8.5 При $\omega = 0$ критерий (60) соответствует начальной предельной поверхности неповрежденного усталостью материала, а при $\omega = \omega_f$ — предельной поверхности полностью поврежденного материала. Промежуточным значениям ω соответствуют промежуточные поверхности (60).

8.6 Конкретизация силового критерия прочности

8.6.1 Разрушение материала наступает при условии

$$(1 - \chi)\sigma_u + \chi\sigma_1 \geq A, \tag{61}$$

где $\chi_0(T) \leq \chi \leq \chi_f(T)$, $\chi_0(T) = \chi(T, \omega = 0)$, $\chi_f(T) = \chi(T, \omega = \omega_f)$, $A_0(T) = A(T, \omega = 0)$, $A_f(T) = A(T, \omega = \omega_f)$, $0 \leq \chi \leq 1$.

8.6.2 Предельное соотношение (61) учитывает изменяющуюся в процессе накопления повреждений роль σ_1 и σ_u: при $\omega \to \omega_f$, $\chi \to \chi_f \leq 1$, что соответствует возрастанию роли главного растягивающего напряжения σ_1.

8.6.3 Образовавшаяся трещина при выполнении условия (61) перпендикулярна направлению σ_1.

УДК 620.172.1:620.179.16:006.354 ОКС 77.040.10 Т59

Ключевые слова: поврежденность, малоцикловая усталость, эволюционные уравнения, термопластичность, тензор напряжений, поверхность текучести, упрочнение

Редактор *Н.Г. Копылова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *А.А. Ворониной*

Сдано в набор 01.12.2016. Подписано в печать 07.12.2016. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,68. Тираж 28 экз. Зак. 3047.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru