

6. Greenwood J.A. Adhesion of elastic spheres. Proc. Roy. Soc. London A. 1997. Vol. 453. № 1961. Pp. 1277–1297.
7. Muller V.M., Yushchenko V.S., Derjagin B.V. On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane. J. Colloid and Interface Sci. 1980. Vol. 77. № 11. Pp. 91–101.
8. Tian H., Malsudina T. Effect of relative humidity on friction behaviour of the head/disk interface. IEEE Trans. Magnetics. 1992. Vol. 28. № 5. Pp. 2530–2532.
9. Radinowicz E. Friction and wear of materials. N. Y.: Wiley. 1965. 244 p.
10. Горячева И.Г. Механика трибологического взаимодействия. М.: Наука. 2001. 478 с.
11. Горячева И.Г. Дискретный контакт упругих тел при наличии адгезии. Изв. РАН. МТТ. 2003. № 2. С. 49–60.
12. Галин Д.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука. 1980. 303 с.
13. Горячева И.Г., Масловская Ю.Ю. Контактное взаимодействие упругих тел при наличии адгезии. ПНМ. 1999. Т. 63. Вып. 1. С. 128–137.
14. Makhovskaya Yu.Yu., Goryacheva I.G. The combined effect of capillary and elasticity in contact interaction. Tribology International. 1999. № 32. Pp. 507–515.
15. Горячева И.Г., Масловская Ю.Ю. Адгезионное взаимодействие упругих тел. ПНМ. 2001. Т. 65. Вып. 2. С. 279–289.
16. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир. 1999. 509 с.

Углублено и переиздано, 2006.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОПИСАНИЮ МИКРОРАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Э.Б. ЗАВОЙЧИНСКАЯ

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова,

Москва, Россия

Основные подходы механики разрушения конструктивного элемента базируются на изучении либо упруго-пластического деформирования в вершине трещины, либо вязкого разрушения материала. Однако есть основания предполагать, что первоначальной разрушению может являться развитие микротрещин в упругой зоне. Процесс развития микроразрушения при упругом деформировании предлагается описывать функцией плотности субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин в зависимости от процесса нагружения. По результатам диагностики развития трещин можно вычислять экспериментальные значения плотности трещин и определять вероятность микроразрушения конструктивного элемента.

1. Основные соотношения теории микроразрушения твердых тел

Начальная стадия процесса разрушения твердого тела под действием механического напряжения состоит в зарождении и росте субмикроскопических трещин длиной $(10^{-7} - 10^{-5})$ мм, их переходе в микроскопические трещины $(10^{-4} - 10^{-2})$ мм, дальнейший рост и слияние которых обуславливает появление коротких трещин $(5 \cdot 10^{-2} - 0.1)$ мм.

В качестве основного кинетического параметра процесса образования таких трещин принимается объемная плотность трещин ρ_z , $z = \text{sm, m, sh}$, в виде:

$$\rho_z = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta n_z}{\Delta V}, \quad z = \text{sm, m, sh}; \quad \sum_z \rho_z = \rho_l. \quad (1)$$

где $\rho_{\text{sm}}, \rho_m, \rho_{\text{sh}}$ — объемные плотности субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин соответственно; $\Delta n_{\text{sm}}, \Delta n_m, \Delta n_{\text{sh}}$ — изменение субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин соответственно в объеме ΔV твердого тела; ρ_l — предельное значение объемной плотности трещин, экспериментально определяемое физическими методами исследования структуры металла (рентгеноскопия, ультразвуковые исследования, электронная микроскопия и др.) и описываемое теорией дислокаций [1].

Процессы последовательного накопления плотностей субмикроскопических $\rho_{sm} = \rho_{sm}(t)$, микроскопических $\rho_m = \rho_m(t)$ и коротких $\rho_{sh} = \rho_{sh}(t)$ трещин на некотором интервале времени функционирования определяются процессом нагружения, начальным распределением дефектов кристаллической решетки и характерными базовыми значениями этих величин.

Здесь описываются хрупкие микроразрушения (когда разрушаются межзатомные связи внутри зерен (межзеренный скол) или на их границах (транскристаллитный скол)), которые определяются упругой составляющей деформаций. Экспериментально обнаружено, что в отличие от размеров субмикро- и микротрещин (которые в целом стабилизируются в процессе нагружения) их объемная плотность является чувствительной характеристикой напряженного состояния и характеризуется разрушением тела, связанное с их критической концентрацией. Концентрация микроскопических и коротких трещин на различных стадиях возникновения и развития меняется на несколько порядков. Исследования формирования и развития макротрещин проводятся в механике разрушения и здесь не рассматриваются. Изучаемые процессы в дальнейшем обуславливают ее рост.

1.1. В процессе проведения испытаний плоских образцов из малоуглеродистой стали ($\sigma_s = 21 \text{ кГ/мм}^2$, $\sigma_v = 38 \text{ кГ/мм}^2$ при симметричном изгибе [2] изучалась микроструктура материала методом фрактальной геометрии. Были выделены четыре стадии процесса усталостного разрушения материала. Первой стадии соответствует инкубационный период развития разрушения, который характеризуется зарождением и слиянием дислокаций, их движением с образованием линий скольжения, объединением этих линий в полосы скольжения, сдвигам материала по ним с образованием субмикроскопических трещин и их развитием до характерного значения плотности субмикроскопических трещин ρ_{sm}^{**} (см. рис.1, кривая I, фракталография I). На второй стадии происходит увеличение количества зерен, содержащих субмикроскопические трещины, упрощение структуры зерен, скользящих за пределы зерна и переход субмикро в микроскопические трещины с достижением плотности ρ_m , фракталография II). Третья стадия процесса разрушения характеризуется слиянием микроскопических трещин, появлением коротких трещин, плотность которых при дальнейшем нагружении достигает характерного значения ρ_{sh}^{**} (рис.1, кривая III, фракталография III). На стадии IV локализация интенсивного развития коротких трещин в некоторых зонах материала приводит к появлению макротрещин длиной (0,1-1) мм (рис.1, кривая IV, фракталография IV). Для каждой

стадий развития разрушения приведены фракталографии рельефа пространств трещин.

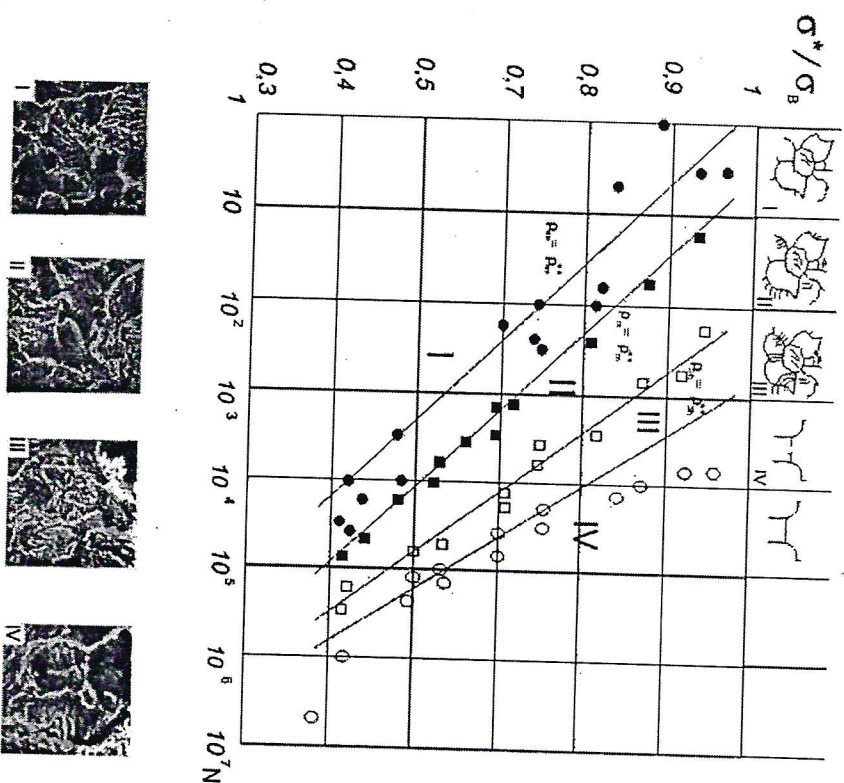


Рис. 1. Зависимость относительной амплитуды симметричных напряжений от числа циклов достижения характерных значений плотности субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин и фракталография микроструктуры малоуглеродистой стали.

На рис.1 представлена экспериментальная зависимость относительной амплитуды напряжений σ^*/σ_v от числа циклов N достижения характерных значений плотности трещин. Сплошными кружочками представлены результаты экспериментов, в которых плотность субмикроскопических трещин достигла значения $\rho_{sm} = \rho_{sm}^{**}$ (стадия I), сплошными квадратиками — плотность микроскопических трещин $\rho_m = \rho_m^{**}$ (стадия II), полыми кружочками — плотность ко-

ротких трещин равна $\rho_{sh} = \rho_{sh}^{**}$ (стадия III). Полыми кружочками представлены экспериментальные данные зависимости σ/σ_0 от угла наклона до образования макротрещин.

1.2. Для асимметричных предельных сдвигов вида

$$\tau(t) = \tau_m + \tau_a \sin \omega t, \quad (2)$$

где τ_m, τ_a — среднее значение и амплитуда сдвига, предполагается, что объемную плотность субмикроскопических $\rho_{sm} = \rho_{sm}(t)$, микроскопических $\rho_m = \rho_m(t)$ и коротких $\rho_{sh} = \rho_{sh}(t)$ трещин можно представить в виде сумм:

$$\rho_z(t) = \rho_{z,0}(t) + \rho_{z,a}(t), \quad z = sm, m, sh. \quad (3)$$

Рассмотрим постоянное нагружение вида: $\tau(t) = \tau_m h(t)$, где $h = h(t)$ — функция Хевисайда. По результатам экспериментов определим следующие предельные кривые: кривую длительной прочности $t_f = t_f(\tau_m)$ при разрушении материала, кривые $t_z = t_z(\tau_m)$, $z = sm, m, sh$, характерных значений объемной плотности субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин по результатам фрактографий микроструктуры материала при постоянном сдвиге соответственно.

Функцию плотности $\rho_{z,0} = \rho_{z,0}(t)$, $z = sm, m, sh$, субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин соответственно определим из следующих соотношений ($\lg(t \times t_z(\tau_m)) \leq \lg t_f(\tau_m)$):

$$\rho_{z,0}(t) = \begin{cases} \rho_z^* \left(1 - (2 - \Re(t)) \frac{[1 - \frac{t_z}{t_f}]}{[1 - \frac{t_z}{t_f}]} \right) & \text{при } t_b \geq \tau_m \geq \tau_s, \\ \rho_{z,s}(t) \left(1 - (2 - \Re(t)) \frac{[1 - \frac{t_z}{t_f}]}{[1 - \frac{t_z}{t_f}]} \right) & \text{при } \tau_s \geq \tau_m \geq \tau_{pr}, \\ 0 & \text{при } 0 \leq \tau_m \leq \tau_{pr} \end{cases}$$

$$(z = sm, m, sh),$$

$$\rho_{z,s} = \begin{cases} \rho_z^* \left(\Re \frac{\lg t_f(\tau_m)}{\lg t_f(\tau_s)} (t) - 1 \right) & \text{при } \lg(t \times t_z(t)) \leq \lg t_f(\tau_s), \\ \rho_z^* & \text{при } \lg(t \times t_z(t)) \geq \lg t_f(\tau_s), \end{cases} \quad (4)$$

$$\Re(t) = \exp \left(\frac{\ln 2 \times \lg(t \times t_z(\tau_m))}{\lg t_f(\tau_m)} \right),$$

где t_b, τ_s, τ_{pr} — пределы статической прочности, текучести и пропорциональности соответственно. Константы материала $\rho_z^*, z = sm, m, sh$ — предельные значения объемных плотностей субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин соответственно.

Теперь рассмотрим симметричный сдвиг: $\tau(t) = \tau_a \sin \omega t$. Из экспериментов имеем следующие функции материала: $N_f = N_f(\tau_a, \omega)$

— кривая усталостной прочности при разрушении материала, $N_z = N_z(\tau_a, \omega)$, $z = sm, m, sh$ — кривые характерных значений объемной плотности субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин по результатам фрактографий микроструктуры материала при симметричном сдвиге.

Функцию плотности $\rho_{z,a} = \rho_{z,a}(t)$ в выражении (3) найдем из выражений ($\lg(\omega t \times N_z(\tau_a, \omega)) \leq \lg N_f(\tau_a, \omega)$):

$$\rho_{z,a}(t) = \begin{cases} \rho_z^* \left(1 - (2 - \Re(t)) \frac{[1 - \frac{\omega t}{N_f}]}{[1 - \frac{\omega t}{N_f}]} \right) & \text{при } t_b \geq \tau_a \geq \tau_s, \\ \rho_{z,s}(t) \left(1 - (2 - \Re(t)) \frac{[1 - \frac{\omega t}{N_f}]}{[1 - \frac{\omega t}{N_f}]} \right) & \text{при } \tau_s \geq \tau_a \geq \tau_{-1}, \\ \rho_{z,-1}(t) \left(1 - (2 - \Re(t)) \frac{[1 - \frac{\omega t}{N_f}]}{[1 - \frac{\omega t}{N_f}]} \right) & \text{при } \tau_{-1} \leq \tau_a \leq \tau_{-s}, \\ 0 & \text{при } 0 \leq \tau_a \leq \tau_{-s}, \end{cases}$$

$$z = sm, m, sh,$$

$$\rho_{z,s} = \begin{cases} \rho_z^* \left(\Re \frac{\lg N_f(\tau_{-1}, \omega)}{\lg N_f(\tau_a, \omega)} (t) - 1 \right) & \text{при } \lg(\omega t \times N_z(\tau_a, \omega)) \leq \lg N_f(\tau_a, \omega), \\ \rho_z^* & \text{при } \lg(\omega t \times N_z(\tau_a, \omega)) \geq \lg N_f(\tau_a, \omega), \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho_{z,-1} = \begin{cases} \rho_z^* \left(\Re \frac{\lg N_f(\tau_{-1}, \omega)}{\lg N_f(\tau_{-1}, \omega)} (t) - 1 \right) & \text{при } \lg(\omega t \times N_z(\tau_{-1}, \omega)) \leq \lg N_f(\tau_{-1}, \omega), \\ \rho_{z,s} & \text{при } \lg(\omega t \times N_z(\tau_{-1}, \omega)) \geq \lg N_f(\tau_{-1}, \omega), \end{cases}$$

$$\Re(t) = \exp \frac{\ln 2 \times \lg(\omega t \times N_z(\tau_a, \omega))}{\lg N_f(\tau_a, \omega)},$$

где τ_{-1}, τ_{-s} — предел выносливости и циклический предел текучести материала соответственно.

Пусть нагружение представляется в виде ряда:

$$\tau(t) = \tau_m + \sum_{i=1}^I \tau_{a,i} \sin \omega_i t. \quad (6)$$

Тогда аналогично формуле (3) имеем:

$$\rho_z(t) = \rho_{z,0}(t) + \sum_{i=1}^I \rho_{z,a,i}(t, \omega_i), \quad z = sm, m, sh. \quad (7)$$

1.3. Обратимся к формулировке критерия разрушения. Предельным состоянием является достижение объемной плотности коротких

трещин заданного значения ρ_{sh}^* . Предельное уравнение, описывающее микроразрушение твердого тела для асимметричного нагружения вида (2), в диапазоне изменения его характеристик

$$T_s \geq T_m \geq T_{pr}, \quad T_{-1} \geq T_a \geq T_{-s}, \quad (8)$$

имеет вид:

$$\frac{T_m}{T_s} + \frac{T_a}{\tau(\omega t^*, t^*)} = P(\omega t^*, t^*), \quad (9)$$

причем

$$\begin{aligned} \tau(\omega t^*, t^*) &= \frac{T_{-1} - T_{-s} \left(R^{\frac{\lg t_f(T_m)}{\lg t_f(T_s)}} - 1 \right) (2 - R)}{(2 - N) \left(N^{\frac{\lg N_f(T_{-1}, \omega)}{\lg N_f(T_{-1}, \omega)}} - 1 \right) \left(1 - \frac{T_{pr}}{T_s} \right)}, \\ P(\omega t^*, t^*) &= 1 + \frac{1}{(2 - R) \left(R^{\frac{\lg t_f(T_m)}{\lg t_f(T_s)}} - 1 \right)}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \cdot \left(\left(N^{\frac{\lg N_f(T_{-1}, \omega)}{\lg N_f(T_{-1}, \omega)}} - 1 \right) \left(1 - \frac{T_{pr}}{T_s} \left(\frac{2 - N}{1 - \frac{T_{-1}}{T_{-s}}} - 1 \right) \right) + \right. \\ & \left. \left(2 - R^{\frac{\lg t_f(T_m)}{\lg t_f(T_s)}} \right) \left(1 - \frac{T_{pr}}{T_s} \right) \right), \end{aligned}$$

$$N = \exp \left(\frac{\ln 2 \cdot \lg(t^* \cdot t_{sh}(T_m))}{\lg t_f(T_m)} \right), \quad N = \exp \frac{\ln 2 \cdot \lg(\omega t^* \cdot N_{sh}(T_a, \omega))}{\lg N_f(T_a, \omega)},$$

Рассмотрим произвольное нагружение вида (6). Критерий разрушения по коротким трещинам с учетом выражения (3) приобретает следующий вид:

$$\frac{1}{\rho_{sh}^*} \left(\rho_{sh,0}(t^*) + \sum_{i=1}^I \rho_{sh,a_i}(t^*, \omega_i t^*) \right) = 1, \quad (11)$$

где $\rho_{sh,0}(t^*)$ определяется по формуле (4) и является линейной функцией T_m , функции $\rho_{sh,a_i}(t^*, \omega_i t^*)$ находятся из зависимости (5) и являются линейными функциями T_{a_i} .

С помощью выражений (4) рассмотрена взаимосвязь между общей плотностью коротких трещин и статическим нагружением при несократительной полноте хромоникелевого сплава [2-5]. Приведенная соотношения (5), исследована взаимосвязь между объемной плотностью коротких трещин и симметричным нагружением некоторых конструкционных сталей [2-5].

Вышеприведенное построение критериев разрушения материалов по субмикроскопическим, микроскопическим и коротким трещинам при произвольном нагружении позволяет сделать вывод о том, что только получение кривых длительной и циклической прочности по разрушению образцов является недостаточным как основа современной теории разрушения, а необходимо привлечение кривых характерных значений объемной плотности субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин.

2. О вероятностном анализе результатов диагностики микроразрушений твердых тел

Предположим, что экспериментально определены процессы изменения во времени плотности субмикроскопических $\rho_{sm}(t)$, микроскопических $\rho_m(t)$ и коротких $\rho_{sh}(t)$ трещин в теле под действием механического нагружения методами дефектоскопии, например, методом фототрафим микроструктуры с помощью электронных микроскопов, ультразвуковым, магнитным или радиационным методом дефектоскопии.

2.1. Метод ультразвуковой дефектоскопии основан на измерении ультразвуковым дефектоскопом интенсивности ультразвукового излучения. Ультразвуковой дефектоскоп представляет собой автоматизированный диагностический прибор, предназначенный для определения дефектов ультразвуковыми датчиками, которые устанавливаются нормально к поверхности тела или под различными углами с целью увеличения зоны контакта с телом, поверхность которого искривлена. В качестве источников ультразвуковых колебаний используют пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи. Пьезоэлектрический кристалл преобразователя (излучателя) располагает между электродами, на которые подается переменный ток ультразвуковой частоты. Излучатель вибрирует с частотой тока, при этом излучает ультразвук. Амплитуда излучения пропорциональна напряжению на электродах. После излучения датчиком ультразвукового импульса происходит отражение сигнала от различных поверхностей и дефектов в теле. Отраженные сигналы также фиксируются этим же датчиком. Диагностику дефектов в конструкции проводят по величине эхосигнала. О форме и ориентации дефекта относительно оси звукового поля судят по форме и высоте эхо-сигнала. Такие данные получают с помощью импульсной спектрометрии — анализом эхо-импульсов от дефектов как функции частоты и амплитуды импульсов датчика. Этот метод особенно эффективен при проверке различных элементов на расстоянии, когда неоднородности характеризуются большой протяженностью и направлены по нормали к звуковому лучу, для получения кор-

эионной карты повреждений, а также для обнаружения неглубоких производительно ориентированных трещин у поверхности тела.

В основе другого, магнитного метода дефектоскопии используется искривление линий магнитного поля около трещины или дефекта из-за местного изменения магнитной проницаемости. Магнитные дефектоскопы оснащены постоянными магнитами, которые создают в теле мощное магнитное поле, или источниками переменного или импульсного напряжения. Высокочувствительные индуктивные датчики, установленные между магнитными полюсами, регистрируют уклонение магнитного потока, изменяющийся из-за повышения магнитного сопротивления или преломления магнитных силовых линий вследствие наличия разлитых особенностей, дефектов, трещин и т.п., находящихся в теле. Для обнаружения поверхностных трещин используют магнитно-порошковый метод с применением магнитного порошка в виде черных, цветных или флюоресцирующих ферромагнитных частиц размером около 10 мкм, взвешенных в жидкой эмульсии или пастозной взвеси. Этот порошок притягивается на поверхность трещины и создавая действия больших градиентов магнитного поля в ее зоне, поставляет трещины длиной от 10^{-2} мм и шириной раскрытия от 10^{-3} мм (т.е. короткие трещины и макротрещины), а также подповерхностные нарушения сплошности на глубине до 0,3 мм.

Электронная дефектоскопия основана на сканировании поверхности разрушения электронным лучом высокой интенсивности и возбуждении электронов этого луча на трещинах вторичных электронов, которые дают изображение трещины. Этот метод позволяет измерить поверхностные трещины длиной от 0,1 мм (макротрещины).

В акустико-эмиссионном методе используют акустическую эмиссию, при которой в процессе нагружения тела регистрируется изменение упругих волн напряжений развивающихся трещинами вследствие локальной динамической перестройки дислокационной структуры тела. Акустические волны содержат информацию о происходящих физических процессах и распространяются на большие расстояния (на значительного заглушения). Применение акустической эмиссии позволяет определить инкубационный период развития микротрещин и контролировать процесс кинетики их роста.

Метод пропитки веществ используется для выявления поверхностных трещин при вытекании из них жидкости. Например, исследуемое тело погружается в горячее масло, затем его поверхность оплавляется и покрывается мелом. По мере выделения масла из трещины меловой поверхности тела образуется пятно.

Радиационная дефектоскопия обеспечивает фиксацию изображений трещин при просвечивании тела на рентгеновской пленке или

флюоресцирующем экране. Размеры дефектов определяют по распределению интенсивности просвечивания в виде поочередных на рентгеновской пленке. При радиометрическом контроле производят сканирование узким пучком излучения с фиксацией данных в цифровом виде.

Разрушения конструктивных элементов обусловлены стохастическими процессами развития во времени субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин в основном материале элемента, микротрещинных дефектов, коррозионных трещин, стресс-коррозионных трещин.

2.2. По результатам ультразвуковой диагностики вычислены плотности коротких трещин в конструктивном элементе при неоднородном напряженном состоянии $\rho_{sh,1}, \dots, \rho_{sh,y}, y = 1, \dots, Y$. Для этих значений из критерия разрушения по коротким трещинам (11) найдем множество предельных времен $t_{y,1}^*, y = 1, \dots, Y$.

Множеству значений плотностей коротких трещин $\rho_{sh,1}, \dots, \rho_{sh,z}, z = 1, \dots, Z$, обнаруживаемых средствами фрактальной микроструктур-критерия разрушения множество предельных времен $t_{x,2}^*, z = 1, \dots, Z$. И, наконец, по данным магнитной дефектоскопии определим множество значений $\rho_{sh,1}, \dots, \rho_{sh,x}, x = 1, \dots, X$, и соответствующее ему множество предельных времен $t_{x,3}^*, x = 1, \dots, X$.

Вероятность микроразрушений конструктивного элемента $P_{sh} = P_{sh}(t_r)$ определяется суммой вероятностей микроразрушения обнаруживаемых ультразвуковой дефектоскопией, магнитной дефектоскопией и методом фрактальной микроструктуры, в течение заданного времени (теорема сложения вероятностей для несовместных событий):

$$P_{sh}(t_r) = \left\{ \sum_{y=1}^Y \frac{P_{y,1}(t_r)}{1 - P_{y,1}(t_r)} + \sum_{z=1}^Z \frac{P_{z,2}(t_r)}{1 - P_{z,2}(t_r)} + \sum_{x=1}^X \frac{P_{x,3}(t_r)}{1 - P_{x,3}(t_r)} \right\} \cdot \prod_{y=1}^Y [1 - P_{y,1}(t_r)] \prod_{z=1}^Z [1 - P_{z,2}(t_r)] \prod_{x=1}^X [1 - P_{x,3}(t_r)], \quad (12)$$

где $P_{y,1}(t_r)$ — вероятность появления коротких трещин плотности $\rho_{sh,y}, y = 1, \dots, Y$, обнаруживаемых ультразвуковым обследованием, в течение t_r ; $P_{z,2}(t_r)$ — вероятность появления коротких трещин плотности $\rho_{sh,z}, z = 1, \dots, Z$, обнаруживаемых в конструктивном элементе то микроскопа, в течение срока его эксплуатации t_r ; $P_{x,3}(t_r)$ — вероятность появления коротких трещин плотности $\rho_{sh,x}, x = 1, \dots, X$, в конструктивном элементе, обнаруживаемых магнитным методом дефектоскопии, в течение срока эксплуатации t_r ; t_r — срок эксплуатации конструктивного элемента.

Предполагается, что вероятность появления коротких трещин плотности $\rho_{sh}(t_r)$ в течение срока эксплуатации t_r однозначно определяется повреждением $\pi = \pi(t)$, при этом $\pi = \frac{\rho_{sh}(t_r)}{\rho_{sh}^*}$ [3,5]:

$$P_{y,1}(t_r) = \varphi\left(\pi\left(\frac{\rho_{sh,y}(t_r)}{\rho_{sh}^*}\right)\right), \quad P_{z,2}(t_r) = \varphi\left(\pi\left(\frac{\rho_{sh,z}(t_r)}{\rho_{sh}^*}\right)\right), \\ P_{x,3}(t_r) = \varphi\left(\pi\left(\frac{\rho_{sh,x}(t_r)}{\rho_{sh}^*}\right)\right). \quad (13)$$

В качестве функции $\varphi = \varphi(t_r)$ для описания вероятности появления коротких трещин в течение срока службы конструктивного элемента t_r выберем распределение Пуассона в такой форме:

$$\varphi = \frac{\rho_{sh}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh}}{\rho_{sh}^*}\right). \quad (14)$$

Таким образом, вероятность микроразрушений конструктивного элемента $P_{sh} = P_{sh}(t_r)$ с привлечением выражений (13) и (14) определяется по следующему соотношению:

$$P_{sh}(t_r) = \left\{ \sum_{y=1}^Y \frac{\frac{\rho_{sh,y}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,y}}{\rho_{sh}^*}\right)}{1 - \frac{\rho_{sh,y}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,y}}{\rho_{sh}^*}\right)} + \sum_{z=1}^Z \frac{\frac{\rho_{sh,z}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,z}}{\rho_{sh}^*}\right)}{1 - \frac{\rho_{sh,z}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,z}}{\rho_{sh}^*}\right)} + \right. \\ \left. + \sum_{x=1}^X \frac{\frac{\rho_{sh,x}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,x}}{\rho_{sh}^*}\right)}{1 - \frac{\rho_{sh,x}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,x}}{\rho_{sh}^*}\right)} \right\} \cdot \prod_{y=1}^Y \left[1 - \frac{\rho_{sh,y}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,y}}{\rho_{sh}^*}\right) \right] \cdot \\ \cdot \prod_{z=1}^Z \left[1 - \frac{\rho_{sh,z}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,z}}{\rho_{sh}^*}\right) \right] \cdot \prod_{x=1}^X \left[1 - \frac{\rho_{sh,x}}{\rho_{sh}^*} \exp\left(-\frac{\rho_{sh,x}}{\rho_{sh}^*}\right) \right]. \quad (15)$$

Представленный подход позволяет учитывать значение объемных плотностей коротких трещин, вычисленных по результатам диагностики развития трещин в конструктивном элементе различными методами.

Литература

1. Zavoitchinskaya E. About an approach to an estimation of time of short crack origin at quasiperiodic complex loading – Physical aspects of fracture. Cargèse (Corsica), France, NATO Advanced Study Institute, 5-17 June, 2000.
2. Завойчинская Э.Б., Кудко И.А. Введение в теорию процессов разрушения твердых тел. М.: МГУ, 2004г. 168 с.
3. Завойчинский В.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопровода (Часть 1). Контроль. Диагностика. № 5 (95) 2006. 15-23 с.

4. Завойчинский В.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование. М.: Недра, 1992. 271 с.
5. Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании. М.: ООО ИРЦ Газпром, 2002. 160 с.
6. Завойчинская Э.Б., Завойчинский В.И. Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов (в четырех частях). Справочник. Инженерный журнал. Изд-во «Машиностроение». № 5, 1998, часть 1, с. 48-52; № 6, 1998, часть 2, с. 41-47; № 1, 1999, часть 3, с. 31-40; № 4, 1999, часть 4, с. 47-51.