



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 539.4

Э.Б. ЗАВОЙЧИНСКАЯ, канд. физ.-мат. наук
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

ПРОЦЕСС МИКРОРАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Представлена математическая модель объемного микроразрушения металлов, учитывающая закономерности процессов образования и развития субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин при сложном напряженном состоянии. Ее основными понятиями являются понятия приведенной длины трещин и вероятности микроразрушения при достижении приведенной длины трещин характерных значений. Модель базируется на механических параметрах прочности и разрушения материалов, которые изучаются в экспериментах. Получены формулы для определения числа циклов начала образования микротрещин и коротких трещин (как результата последовательного зарождения и развития субмикротрещин), а также субмикротрещин и микротрещин соответственно.

Ключевые слова: симметричное гармоническое нагружение, процессы микро- и макроразрушения металлов, субмикротрещины, микротрещины, короткие трещины, хрупкое разрушение

Введение. Основной целью работы является построение системы соотношений, описывающей процессы микро- и макроразрушения металлов при простом гармоническом нагружении в условиях сложного напряженного состояния с использованием понятий и методологии механики деформируемого твердого тела (в т.ч. определяющих функций усталостной прочности металлов и механики разрушения) и закономерностей развития микротрещин, коротких трещин и макротрещин, устанавливаемых экспериментально-теоретическими исследованиями физики и механики разрушения металлов.

Результаты экспериментально-теоретических исследований физической природы циклического микродеформирования и микроразрушения локальных объемов металла позволяют устанавливать зависимости между изменением плотности усталостных микротрещин или коротких трещин, коэффициентом интенсивности напряжений и числом циклов нагружения; между характерными плотностями усталостных трещин, коэффициентом интенсивности напряжений и числом циклов до разрушения.

Результаты многочисленных экспериментально-теоретических исследований по макроскопическому деформированию и разрушению металлов при переменном нагружении дают возможность построить зависимости между тензором напряжений, тензором неупругих деформаций и числом циклов нагружения; между тензором упругих деформаций и числом циклов до разрушения, между тензором неупругих деформаций и числом циклов до разрушения.

По нашему мнению, механика разрушения должна рассматривать четыре последовательные стадии разрушения металлов.

Две первые стадии разрушения являются результатом объемного хрупкого разрушения. Первая стадия обусловлена процессами последовательного образования и развития субмикро-, микро- и коротких трещин. Вторая стадия включает последовательное зарождение и развитие коротких, средних и значительных макротрещин.

Третья стадия разрушения включает развитие единичных макротрещин как линейных или поверхностных объектов и развитие вязкого разрушения, вызванного ростом неупругих деформаций. Четвертая стадия характеризуется возникновением и ростом магистральных трещин в зонах концентрации упругих деформаций, приводящих к разделению материала на части.

Первая и вторая стадии разрушения впервые описываются в работах [1–9]. Третья и четвертая стадии разрушения рассматриваются классической механикой разрушения как линейной, так и нелинейной.

Стадийность развития усталостных трещин различного вида (последовательная смена появления и роста разного вида трещин), которая приводит к структурным изменениям металла, является одним из основных принципов построения микроструктурной и макроструктурной механики разрушения металлов.

Согласно рассматриваемой теории, зарождение и развитие магистральных трещин предопределяется процессами объемного микроразрушения (последовательным развитием субмикро-, микро- и коротких трещин) и макроразрушения (развитием макротрещин). Теоретической основой построения теории объемного микроразрушения металлов при сложном напряженном состоянии является теория предельных процессов нагружения для хрупких материалов [10] и предлагаемый вероятностный подход к оцен-

ке поэтапного развития микроразрушения при одномерном нагружении. При этом принцип развития микроразрушения состоит в том, что процесс разрушения по микротрещинам начинается с достижения плотностью субмикротрещин характерного порогового уровня, по коротким трещинам — с достижения плотности микротрещин характерных значений. Образование и развитие субмикро-, микро- и коротких трещин, как хрупких усталостных трещин, определяет упругой составляющей процесса деформирования.

Физические закономерности усталостного разрушения металлов. Физическая картина процесса микроразрушения металлов выглядит таким образом. Инкубационный период развития микроразрушения характеризуется скоплением дефектов, зарождением дислокаций, их движением и накоплением в определенных областях. С увеличением напряжений растет объемная плотность дислокаций, при этом прохождение трещины через дислокацию приводит к образованию ступенек скола [6]. Их объединение рождает составную ступеньку, возможное объединение противоположных ступенек ведет к их исчезновению. Дислокации подходят к границе зерен, преодолевают барьер, возникает локальный разрыв — микродефект типа субмикротрещины и микротрещины. Образуются транскристаллитные и межзеренные микросколы в кристаллографических плоскостях при макроупругом деформировании. Далее процесс образования новых дислокаций увеличивает размеры трещин — они переходят в короткие микротрещины, и затем в макротрещины.

На рисунке 1 [11] представлена кинетика накопления усталостных повреждений образцов из трубной стали 3Г (размер зерна 0,03—0,04 мм, временное сопротивление $\sigma_a = 680$ МПа, относительное удлинение $\delta = 23$ %, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 440$ МПа) при симметричном нагружении с амплитудой $\sigma_a = 380$ МПа. На начальной стадии повреждения возникают одиночные полосы скольжения (см. рисунок 1 а), которые объединяются в пачки полос скольжения (см. рисунок 1 б). Плотность полос скольжения в пачке растет, что приводит к образованию субмикроскопических трещин длиной l_1 ($l_1 \leq 10^{-5}$ мм) и микротрещин длиной l_2 ($l_2 \in (10^{-5} - 10^{-3})$ мм) (см. рисунок 1 в) в полосах скольжения и по границам зерен. Слияние микротрещин приводит к появлению микроструктурно коротких трещин длиной l_3 порядка размеров зерен ($l_3 \in (10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2})$ мм) (см. рисунок 1 г), которые затем объединяются (см. рисунок 1 д), их раскрытие и плотность возрастают (см. рисунок 1 е, 1 ж). На стадии образования микротрещин идет локализация процесса разрушения твердого тела. Она обусловлена неравномерностью накопления микротрещин в зонах концентраторов напряжений и развивается в плоскостях максимального напряжения сдвига в поверхностных слоях (см. рисунок 1 з, и). Локальные области развития дефектов, разделенные участками недеформированного материала, показаны на рисунке 1 к. В дальнейшем плотность микротрещин в полосах скольжения достигает предельного значения (см. рисунок 1 л). В результате слияния микротрещин на боковой поверхности образца возникает макротрещина (см. рисунок 1 м), в вершине которой формируется пластическая зона.

Структура хрупкого излома при разрушении металлов в области многоциклового (ограниченной) усталости имеет как тонковолокнистое (область развития усталостных трещин), так и зернистое строение. Первая структура представляет собой область развития усталостных трещин, вторая — поверхность хрупкого излома.

Микроразрушение металлов при одномерном гармоническом нагружении. Экспериментальные исследования [3, 6, 12, 13] показывают, что статистические распределения длин субмикроскопических, микроскопических и микроструктурно коротких трещин практически не меняются. Средние размеры трещин определяются системой структурных параметров, температурой сталей и сплавов и др. Стабильность размеров трещин создает возможность накопления их высоких концентраций, в том числе вблизи поверхности образца. В отличие от размеров трещин, которые практически не зависят от процесса деформирования образца, объемная плотность трещин является чувствительной характеристикой напряженно-деформированного состояния. Поэтому в качестве основного понятия модели введено понятие приведенной длины i -го вида трещин $l_i^* = l_i^*(t)$ ($i=1$ для субмикротрещин, $i=2$ — для микротрещин, $i=3$ — для микроструктурно коротких, не распространяющихся трещин).

Пусть $V_c (V_c = l_c^3)$ — характерный объем макрообразца. Объемные плотности $q_i = q_i(t)$, $i=1, 2, 3$ для i -го вида трещин на интервале времени $t \in [0, t]$ вычисляются по выражению:

$$q_i(t) = \lim_{V \rightarrow V_c} \frac{q_i(t)}{V}, \text{ где } q_i = q_i(t) \text{ — количество } i\text{-го вида трещин в}$$

некотором объеме V твердого тела. Закономерности изменения во времени функций $q_i = q_i(t)$ в металлах изучают экспериментально, используя физические методы исследования микроструктуры: ультразвуковые, акустические, магнитные, электронные, радиационные и оптические методы дефектоскопии. Приведенные длины $l_i^* = l_i^*(t)$ определяются так: $l_i^*(t) = V_c q_i(t) / l_i$, $i=1, 2, 3$, где l_i — среднее значение длины трещины i -го вида. Пороговое значение приведенной длины i -го вида трещин \tilde{l}_i^* характеризует начало образования $(i+1)$ -го вида трещин. Полагаем, что хрупкая область в изломе макрообразца определяется стохастическими процессами развития во времени приведенных длин трещин.

В механике разрушения упругих тел изменение длины l трещины нормального отрыва характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений K_r . Существует зависимость между K_r , l и числом циклов нагружения [6]. Хрупкое разрушение характеризуется коэффициентом трещиностойкости $K_{l,c}$. Введем понятие вероятности микроразрушения как меры достижения приведенной длиной i -го вида трещин соответствующего порогового значения \tilde{l}_i^* . Для одномерно-

го симметричного нагружения вида: $\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t$, $\omega = \frac{2\pi n}{t^*}$,

$t \in [0, t^*]$, зависимость между вероятностью микроразрушения $P_i = P_i(l_i^*, \tilde{l}_i^*, \sigma_a, n)$, коэффициентом интенсивности напряжений $K_r^i = K_r^i(\sigma_i, l_i^*)$ и коэффициентом трещиностойкости $K_{l,c}^i = K_{l,c}^i(\sigma_i, \tilde{l}_i^*)$, представляется в виде:

$$P_i = \frac{K_r^i(\sigma_a, l_i^*) - K_r^i(\sigma_{i-1}, l_i^*)}{K_{l,c}^i(\sigma_i, \tilde{l}_i^*) - K_{l,c}^i(\sigma_{i-1}, \tilde{l}_i^*)}; \quad (1)$$

$$0 < P_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$P_{i-1}(\tilde{n}_{i-1}, \tilde{n}_i) = p_{i-1}, \quad p_{i-1} = const, \quad i = 2, 3;$$

где $K_r^i(\sigma_a) = \sigma_a \sqrt{\pi l_i^*}$; $K_{l,c}^i(\sigma_i) = \sigma_i \sqrt{\pi \tilde{l}_i^*}$; $\sigma_i(n, \omega)$ — базовые функции амплитуды напряжений от числа циклов нагружения n и частоты нагружения ω ; N_i — базовые числа циклов при амплитуде σ_i ; \tilde{n}_i — число циклов достижения приведенной длиной $(i-1)$ -го вида трещин порогового значения, при котором зарождается i -ый

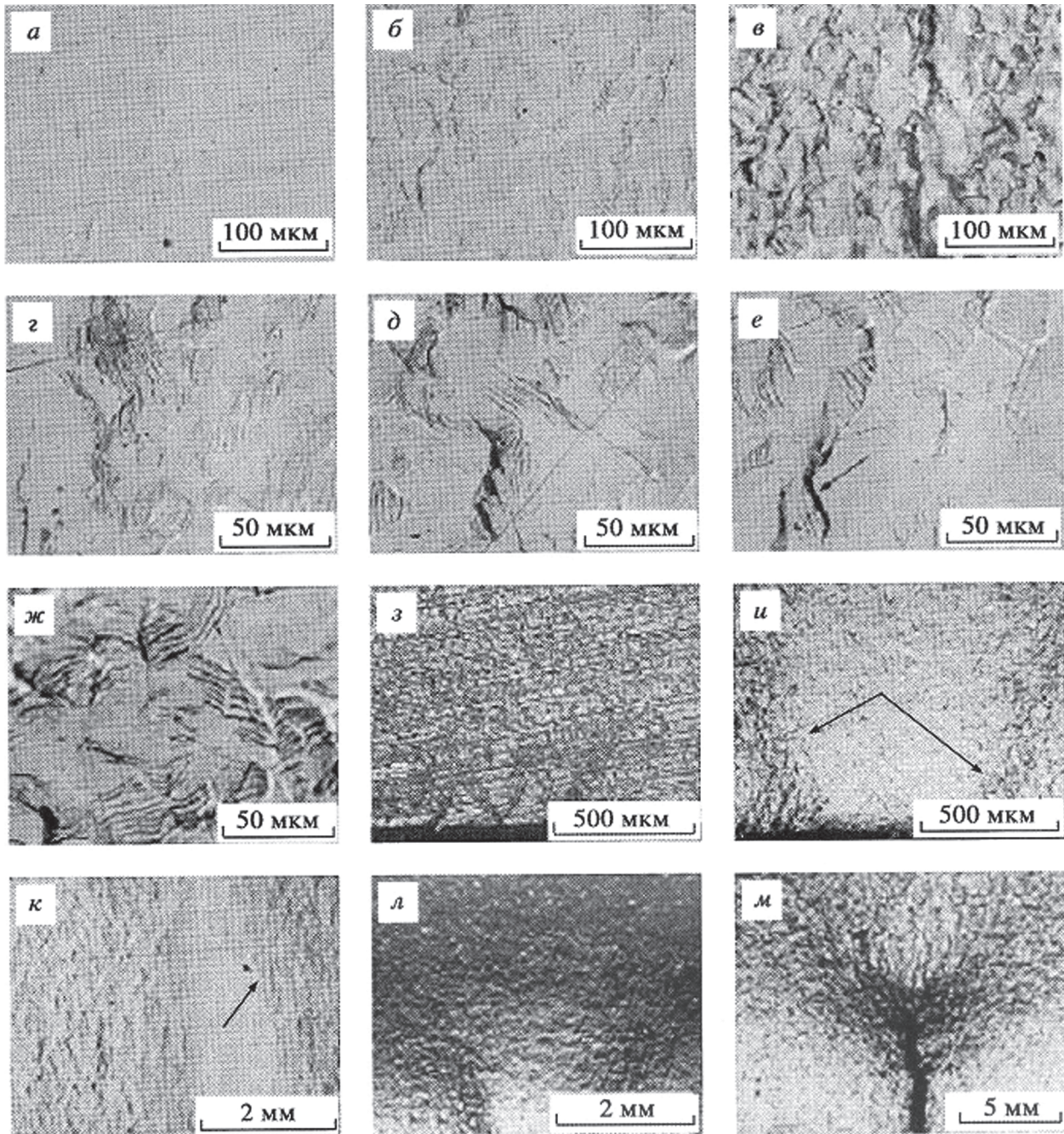


Рисунок 1 — Кинетика накопления повреждений в процессе симметричного нагружения

вид трещин; $\lg \tilde{n}_i = 0$; p_i — заданная вероятность микроразрушения ($i-1$ -го вида, после достижения которой начинается развитие i -го вида микроразрушения; σ_a — амплитуда напряжений [1–9].

В предположении: $l_i^* = l_i^l (\lg n - \lg \tilde{n}_i(\sigma_a))$ и $\tilde{l}_i^* = l_i^l (\lg N_i - \lg \tilde{n}_i(\sigma_i))$, имеем:

$$P_i = \frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}(n, \omega)}{\sigma_i(n, \omega) - \sigma_{i-1}(n, \omega)} \sqrt{\frac{\lg n - \lg \tilde{n}_i(\sigma_a)}{\lg N_i - \lg \tilde{n}_i(\sigma_i)}}; \quad (2)$$

$$\sigma_a \geq \sigma_{i-1}(n, \omega),$$

$$P_i = 0; \sigma_a < \sigma_{i-1}(n, \omega); i = 1, 2, 3.$$

При этом: $\sigma_0(n, \omega) = 0$, $\lg \tilde{n}_1 = 0$.

Для определения базовых функций предлагаются следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \sigma_i(n, \omega) &= \frac{\sigma_i(\omega) - \sigma_{0,2}}{\lg N_i} \lg n + \sigma_{0,2}; \\ \sigma_i(\omega) &= k_i \sigma_{i-1}(\omega), k_i = 0, 2i + 0, 3; \\ \lg N_i &= 10 - i, i = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma_{i-1} = \sigma_{i-1}(\omega)$ — предел выносливости металла при одномерном нагружении.

Учитывая экспериментальные закономерности образования и развития субмикро-, микро- и микроструктурно коротких трещин, приближенные пороговые значения числа циклов \tilde{n}_i начала образования i -го вида трещин вычисляем по следующим выражениям ($p_i = 1$, $i = 1, 2$):

$$\lg \tilde{n}_1 = 0;$$

$$\lg \tilde{n}_2(\sigma_a) = \left(\frac{\sigma_{i-1}(\tilde{n}_2, \omega)}{\sigma_a} \right)^2 \lg N_i;$$

$$\lg \tilde{n}_3(\sigma_a) = \lg \tilde{n}_2(\sigma_a) + \left(\frac{\sigma_2(\tilde{n}_3, \omega) - \sigma_1(\tilde{n}_3, \omega)}{\sigma_a - \sigma_1(\tilde{n}_3, \omega)} \right)^2 [\lg N_2 - \lg \tilde{n}_2(\sigma_2)] \quad (4)$$

Закономерности развития микроразрушения металлов при гармоническом сдвиге $\tau(t) = \tau_a \sin \omega t$, $\omega = \frac{2\pi n}{t^*}$, описываются вышеприведенными выражениями при гармоническом одномерном нагружении, в которых выполняется замена σ_a на τ_a , $\sigma_i(n, \omega)$ на $\tau_i(n, \omega)$ и σ_{-1} на τ_{-1} .

Микроразрушение металлов при простых процессах гармонического нагружения. Процесс простого нагружения при сложном напряженном состоянии в главных осях тензора напряжений $\sigma_k = \sigma_k(t)$, $k=1, 2, 3$, на интервале времени $[0, t^*]$ представляется в виде:

$$\sigma_k(t) = \sigma_{k,a} \sin \omega t, \quad k=1, 2, 3; \quad |\sigma_{1,a}| \geq |\sigma_{2,a}| \geq |\sigma_{3,a}|; \quad 0 \leq t \leq t^*; \quad (5)$$

при этом: $t_{\max,a} = (\sigma_{1,a} - \sigma_{3,a})/2$, $\sigma_{n,a} = (\sigma_{1,a} + \sigma_{3,a})/2$ — максимальные значения касательной и нормальной компонент вектора напряжений на площадке максимальных касательных напряжений соответственно.

Согласно критерию усталостной прочности хрупких материалов в виде [10]:

$$(\tau_{\max,a} - \sigma_{n,a})/\tau_{-1}(N_f, \omega) + 2\sigma_{n,a}/\sigma_{-1}(N_f, \omega) = 1, \quad (6)$$

где $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(N_f, \omega)$ — кривая усталости при симметричном одномерном нагружении и $\tau_{-1} = \tau_{-1}(N_f, \omega)$ — кривая усталости при симметричном сдвиге, и построенной модели микроразрушения при одномерном нагружении [1–7] вероятность микроразрушения металлов $P_i = P_i(t_i^*, \tilde{t}_i^*, \tau_{\max,a}, \sigma_{n,a}, n)$ для процесса простого нагружения предлагается представлять так:

$$P_i = \left(\frac{\tau_{\max,a} - \sigma_{n,a} - \tau_{i-1}(n, \omega) h(\tau_{\max,a} - \sigma_{n,a} - \tau_{i-1}(n, \omega))}{\tau_i(n, \omega) - \tau_{i-1}(n, \omega)} + \frac{2\sigma_{n,a} - \sigma_{i-1}(n, \omega) h(2\sigma_{n,a} - \sigma_{i-1}(n, \omega))}{\sigma_i(n, \omega) - \sigma_{i-1}(n, \omega)} \right) \sqrt{\frac{\lg n - \lg \tilde{n}_i}{\lg N_i - \lg \tilde{n}_i}}, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3,$$

где $h = h(x)$ — функция Хевисайда; $\sigma_i = \sigma_i(n, \omega)$; $\tau_i = \tau_i(n, \omega)$ — базовые функции амплитуды напряжений от числа циклов нагружения при симметричных одномерном растяжении—сжатии и сдвиге соответственно; N_i — базовые числа циклов; $\sigma_0(n, \omega) = 0$; $\tau_0(n, \omega) = 0$; $\lg \tilde{n}_i = 0$.

Базовые значения амплитуд напряжений $\sigma_i = \Phi_i(p_s, T)$, $\tau_i = F_i(p_s, T)$ и чисел циклов $N_i = N_i(p_s, T)$, $i = 1, 2, 3$ являются функциями структурных параметров p_s и температуры. В качестве p_s рассматривают средний линейный размер зерен, удельную поверхность границ зерен, среднее расстояние между включениями и др.

Число циклов \tilde{n}_2 , характеризующее начало образования микротрещин, и \tilde{n}_3 , определяющее начало за-

рождения микроструктурно коротких не распространяющихся трещин, являются решением уравнения:

$$P_{i-1}(\tau_{m,a}, \sigma_{n,a}, \tilde{n}_{i-1}, \tilde{n}_i) = p_{i-1}, \quad p_{i-1} = const, \quad i = 2, 3. \quad (8)$$

Заключение. Представленная теория рассматривает микроразрушение металла как процесс развития микроразрушений по субмикроскопическим, микроскопическим и микроструктурно коротким не распространяющимся трещинам, последние, в свою очередь, порождают макроразрушение металла по макротрещинам. Расчет долговечности элементов конструкций по предложенной теории позволяет обеспечить требуемый уровень промышленной безопасности объектов.

Список литературы

1. Завойчинская, Э.Б. Об одной модели описания микроразрушения металлов / Э.Б. Завойчинская // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2009. — № 1. — С. 60–65.
2. Завойчинская, Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения металлов при полигармоническом нагружении / Э.Б. Завойчинская // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2009. — № 3. — С. 27–34.
3. Завойчинская, Э.Б. К проблеме микроразрушения металлов при циклических нагрузках / Э.Б. Завойчинская // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2010. — № 1. — С. 43–52.
4. Завойчинская, Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении / Э.Б. Завойчинская // Справочник. Инженерный журнал. — 2010. — № 3. — С. 41–46.
5. Завойчинская, Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении (продолжение). Часть 2 / Э.Б. Завойчинская // Справочник. Инженерный журнал. — 2010. — № 7. — С. 16–22.
6. Завойчинская, Э.Б. Введение в теорию процессов разрушения твердых тел / Э.Б. Завойчинская, И.А. Кийко. — М.: МГУ, 2004. — 168 с.
7. Завойчинский, Б.И. Механика субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин при сложном напряженном состоянии / Б.И. Завойчинский, Э.Б. Завойчинская // Справочник. Инженерный журнал. — 2010. — № 10. — С. 22–27.
8. Завойчинская, Э.Б. Моделирование процесса микроразрушения металлов при сложном напряженном состоянии / Э.Б. Завойчинская // Механика — машиностроению: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении» и VI Междунар. симпозиума по трибофатике МСТФ 2010 ОИМ НАН Беларуси; Минск, 26–29 окт. 2010г. — Минск, 2010. — С. 248–251.
9. Завойчинская, Э.Б. Микро- и макромеханика разрушения металлов при сложном напряженном состоянии / Э.Б. Завойчинская // Упругость и неупругость. — М.: МГУ, 2011. — С. 346–352.
10. Завойчинский, Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование / Б.И. Завойчинский. — М.: Недра, 1992. — 271 с.
11. Ботвина, Л.Р. Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности / Л.Р. Ботвина. — М: Наука, 2008. — 334 с.
12. Новиков, И.И. Физическая механика реальных материалов / И.И. Новиков, В.А. Ермишкин. — М.: Наука, 2004. — 323 с.
13. Трошенко, В.Т. Прочность материалов и конструкций / В.Т. Трошенко [и др.]. — Киев: Академперіодика, 2005. — 1088 с.

Zavoichinskaya E.B.

About the process of metal microfracture at complex stress state

Here is presented the mathematical model described the volume microfracture of metals considering sequences of origin and grow of submicroscopic, microscopic and short cracks at complex stress state. The notions of the crack total length and the microfracture probability at the total length equal to its characteristic values are the main notions of the model. The model is based on experimental mechanical parameters of material strength and fracture. Relations for determination of origin cycles for microcracks and short cracks as a result of consecutive origin and grow of submicrocracks, submicrocracks and microcracks correspondingly are obtained.

Поступила в редакцию 29.03.2011.