

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.421

Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщение 1. Размеры трещин при пределе выносливости

В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены особенности рассеянного и локализованного усталостного повреждения металлов и сплавов. Проанализированы размеры максимальных усталостных трещин при пределе выносливости металлов и сплавов различной зернистости и прочности. Рассмотрены критерии линейной и нелинейной механики разрушения, связывающие размеры усталостных трещин и величины пределов выносливости. Выполнено сравнение размеров усталостных трещин, наблюдаемых экспериментально, с их расчетными размерами в соответствии с различными критериями. Рассмотрены особенности зарождения нераспространяющихся усталостных трещин при наличии концентраторов напряжений.

Ключевые слова: предел выносливости, нераспространяющиеся усталостные трещины, механика разрушения.

Введение. Процесс усталостного разрушения металлов и сплавов, как известно, состоит из стадий рассеянного и локализованного усталостного повреждения. Первая стадия усталостного разрушения, которая называется стадией рассеянного (или нелокализованного) усталостного повреждения, характеризуется возникновением случайно распределенных по объему металла зон локального пластического деформирования, в которых при дальнейшем циклическом нагружении возникают микроскопические усталостные трещины.

Интегральными характеристиками процесса рассеянного усталостного повреждения являются неупругая циклическая деформация, равная ширине петли гистерезиса, и энергия неупругого деформирования за цикл, равная площади петли гистерезиса в координатах напряжение–деформация.

Закономерности рассеянного усталостного повреждения и их взаимосвязь с закономерностями усталостного разрушения металлов и сплавов рассмотрены в работах [1–3 и др.].

Вторая стадия усталостного разрушения, которая называется стадией локализованного усталостного повреждения, характеризуется развитием магистральных усталостных трещин, которые, возникнув в зонах локального пластического деформирования, достигают при заданных условиях нагружения и состоянии материалов таких размеров, что могут развиваться вплоть до полного разрушения образца или конструктивного элемента.

Закономерностям развития магистральных усталостных трещин посвящены многочисленные работы, большинство из которых основывается на критериях линейной и нелинейной механики разрушения [4–6 и др.].

Известно достаточно много работ, где изучаются закономерности рассеянного и локализованного усталостного повреждения металлов и сплавов, в то же время отсутствуют систематизация и анализ результатов исследования закономерностей перехода от стадии рассеянного к стадии локализованного усталостного повреждения с учетом всего многообразия факторов, влияющих на эти закономерности.

Такой анализ представляет интерес как при построении общей теории усталостного разрушения металлов и сплавов, в частности при рассмотрении роли стадий рассеянного и локализованного усталостного повреждения в общих закономерностях усталостного разрушения (рассеяние характеристик сопротивления усталостному разрушению, влияние на характеристики сопротивления усталостному разрушению размеров образцов, градиента напряжений, концентрации напряжений и т.п.), так и при разработке методов оценки опасности усталостных трещин, возникающих в конструктивных элементах в процессе их эксплуатации.

При исследовании условий перехода от стадии рассеянного к стадии локализованного усталостного повреждения металлов и сплавов наибольший интерес представляют следующие вопросы.

Во-первых, рассмотрение условий перехода от “неопасного” рассеянного усталостного повреждения, наблюдаемого при напряжениях ниже предела выносливости, когда возникшие в процессе циклического нагружения микроскопические трещины не достигают размеров магистральных трещин, которые могут привести к полному разрушению, к “опасному”, когда появляются и развиваются магистральные усталостные трещины, вызывающие полное разрушение образца или конструктивного элемента. Эти условия определяются, с одной стороны, пределом выносливости, с другой – размерами усталостных трещин, соответствующих пределу выносливости.

Если закономерности изменения пределов выносливости в зависимости от различных факторов исследованы достаточно хорошо, то закономерности изменения размеров трещин, соответствующих пределам выносливости, в зависимости от свойств материалов и других факторов изучены недостаточно.

Во-вторых, анализ соотношения продолжительности стадии зарождения магистральных и других усталостных трещин и стадии распространения до полного усталостного разрушения с учетом размеров трещин, соответствующих их зарождению, вида нагружения (осевое, кручение), концентрации напряжений, повреждений поверхности и т.п.

В-третьих, анализ кинетики роста усталостных трещин и определение размеров магистральных усталостных трещин, соответствующих переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению при напряжениях выше предела выносливости с учетом влияния свойств материалов и условий их нагружения.

Каждому из этих вопросов посвящено отдельное сообщение.

Результаты экспериментальных исследований размеров усталостных трещин при пределе выносливости. Как показывают многочисленные экспериментальные исследования, на поверхности образцов, подвергавшихся нагружению при напряжениях, равных пределу выносливости, наблюдается большое количество усталостных микротрещин различных размеров. Наибольший интерес представляют трещины максимальных размеров.

Размеры таких трещин в образцах, испытанных при одних и тех же условиях, могут изменяться от одного образца к другому. В этом случае рассматриваются средние размеры наибольших трещин партии испытанных образцов.

Некоторые результаты экспериментальных исследований длины поверхностных трещин $2a$ при симметричных циклах нагружения при напряжениях, равных пределам выносливости гладких образцов σ_0 , и исследования зависимости величин пределов выносливости от размеров зерен структуры D для углеродистых и малолегированных сталей, а также для пластичного алюминиевого сплава сведены в табл. 1 [7–14].

Т а б л и ц а 1
Характеристики свойств металлов и сплавов и размеры усталостных трещин, соответствующие пределу выносливости

№ п/п	Материал	Вид нагружения	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	σ_0, τ_0 , МПа	D_s , мм	Размер трещины $2a$, мм
1	Сталь 45 [7]	Осевое Кручение	339	516	220 (125)	0,030	0,055 0,17
2	Сталь 12ХНЗА [7]	Осевое Кручение	700	950	395 (240)	0,010	0,028 0,085
3	Сталь 40Х [7]	Осевое Кручение	683	803	430 (245)	0,010	— 0,06
4	Малоуглеродистая сталь (0,11%С) [8] мелкозернистая крупнозернистая	Круговой изгиб	286 233	433 402	220 190	0,024 0,084	0,051 0,348
5	Малоуглеродистая сталь 1020 [9]	То же	280	441	226	0,023	0,03
6	Легированная сталь [10]	» »	652	616	340	0,010	0,092
7	Малолегированная сталь [11] мелкозернистая крупнозернистая	» »	900 847	1011 965	500 460	0,015 0,091	0,020 0,057
8	Углеродистая сталь (0,21%С) [12] мелкозернистая среднезернистая крупнозернистая	» »	324 263 225	498 467 460	245 225 205	0,025 0,040 0,070	0,060 0,105 0,195
9	Углеродистая сталь (0,1%С) [13]	» »	277 265 232 218 185 171	— — — — — —	207 195 192 186 176 175	0,011 0,013 0,020 0,027 0,057 0,073	— — — — — —
10	Пластичный алюминиевый сплав А15754 [14]	Осевое	109,0 105,5 102,5 91,0	— — — —	135 126 125 117	0,022 0,037 0,108 0,091	— — — —

На рис. 1 приведенные в табл. 1 результаты представлены в виде зависимостей размеров зерен и размеров усталостных трещин, соответствующих пределу выносливости, от величины пределов выносливости. Там же в верхнем правом углу показаны данные исследования зависимости пределов выносливости от размера зерен малоуглеродистой стали (0,11% С).

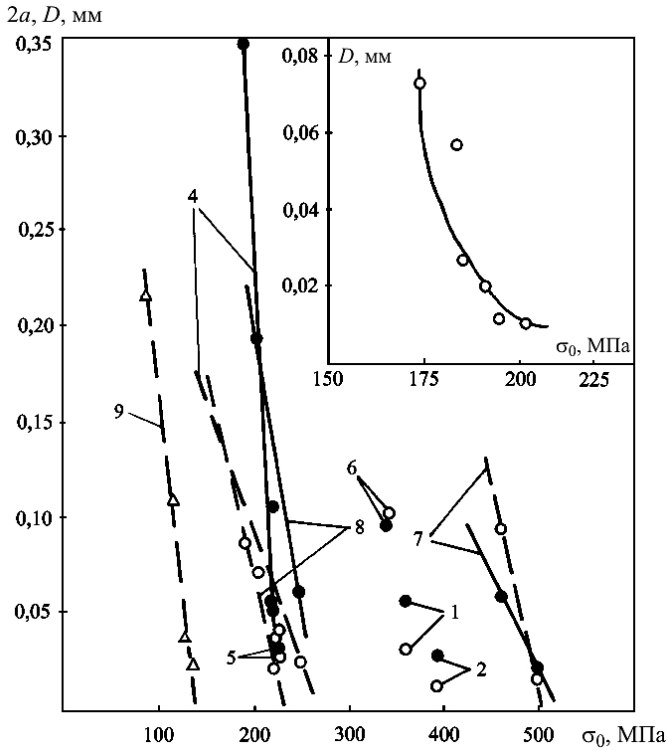


Рис. 1. Зависимость размеров зерен (светлые точки) и размеров усталостных трещин, соответствующих пределу выносливости (темные точки), от величины пределов выносливости. (Цифры соответствуют номеру материала в табл. 1.)

На рис. 2 приведены результаты, показывающие соотношение между размерами трещин $2a$, соответствующих пределам выносливости, и размерами ферритных зерен D для низкоуглеродистой стали [15].

Рис. 3 иллюстрирует результаты сравнения размеров усталостных трещин, соответствующих пределам выносливости, с размерами зерен для сталей с содержанием углерода 0,15; 0,35; 0,45 и 0,81% [16].

Представленные выше результаты дают основание сделать следующие выводы.

Предел выносливости всех исследованных материалов увеличивается с уменьшением размера зерна, что соответствует известной зависимости Холла–Петча. Размеры усталостных трещин, соответствующие пределам выносливости, уменьшаются с повышением пределов выносливости. С ростом размера зерна увеличивается размер трещины, соответствующий пределу выносливости.

Как правило, размер трещины, соответствующий пределу выносливости, равен или больше в несколько раз размера зерна.

Для каждого материала наблюдается индивидуальная зависимость между размерами зерен и пределами выносливости, аналогичная картина отмечается для зависимости размеров трещин, соответствующих пределу выносливости, от его величины (рис. 1).

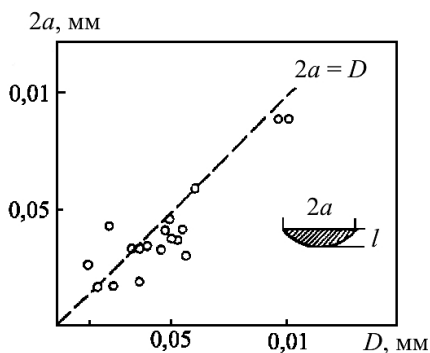


Рис. 2

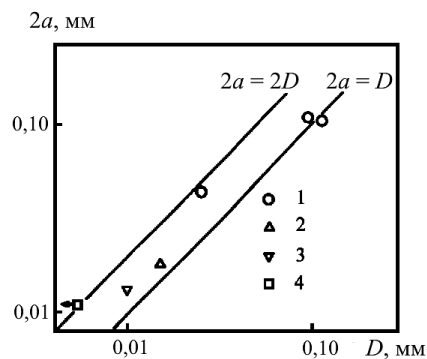


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость длины усталостных трещин, соответствующей пределу выносливости низкоуглеродистой стали, от размера ферритных зерен.

Рис. 3. Зависимость длины усталостных трещин, соответствующей пределу выносливости углеродистых сталей, от размера зерен: 1 – 0,15% С; 2 – 0,35% С; 3 – 0,45% С; 4 – 0,81% С.

Если рассматривать всю совокупность представленных на рис. 1 экспериментальных данных без дифференциации по материалам, видно, что с большим разбросом наблюдаются те же закономерности, что и для отдельных материалов.

На характер зависимости предела выносливости от величины зерна могут оказывать влияние особенности структурного состояния материала вблизи границ зерен, в первую очередь микротрещины и другие дефекты. Влияние этих факторов, как показано в работе [17], может привести к немонотонной зависимости величины предела выносливости от размера зерна.

Большие трудности по установлению взаимосвязи между размерами элементов структуры и пределами выносливости возникают при исследовании высокопрочных сталей, титановых и алюминиевых сплавов со сложной структурой, когда весьма проблематично выделить структурные элементы, являющиеся определяющими при усталостном разрушении, и найти их размеры.

В работах [18–21 и др.] на основе обобщения результатов многочисленных экспериментальных исследований было показано, что переменные напряжения, необходимые для развития трещины, зависят от ее размеров, и при условии, что трещина мала по сравнению с размером образца, имеет место зависимость

$$\sigma_R^n l_{eff} = k, \quad (1)$$

где σ_R – номинальные переменные напряжения, равные пределу выносливости образцов с трещинами размером l_{eff} ; l_{eff} – суммарная глубина надреза и трещины; k , n – постоянные, $n = 3 \dots 4$.

В случае гладкого образца зависимость между пределом выносливости σ_0 и глубиной соответствующей ему трещины l_0 будет иметь вид

$$\sigma_0^n l_0 = k. \quad (2)$$

Взаимосвязь между пределами выносливости и соответствующими им размерами усталостных трещин на основе критериев механики разрушения. В соответствии с критериями линейной механики разрушения размер трещины, соответствующий пределу выносливости гладкого образца, определяется в логариф-

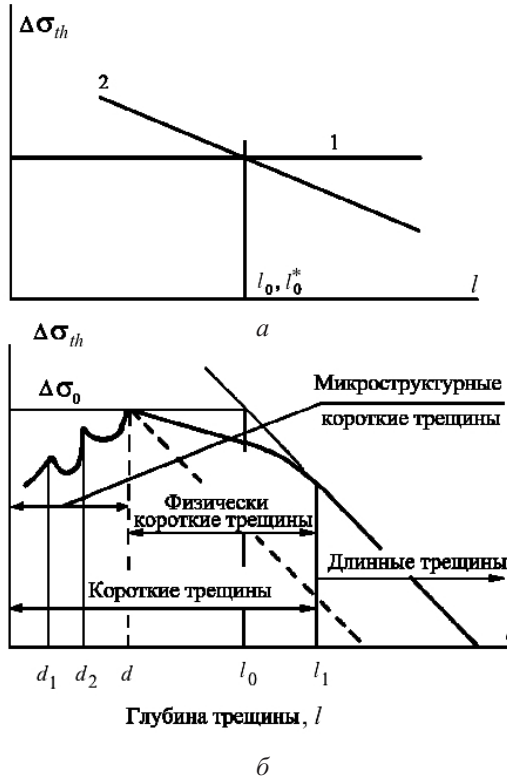


Рис. 4. Зависимость $\Delta\sigma_{th} - l$ в соответствии с линейной (а) и нелинейной (б) механикой разрушения.

мических координатах по схеме, показанной на рис. 4,а. Здесь l соответствует величине предела выносливости гладкого образца $\Delta\sigma_0$, 2 – пороговым напряжениям $\Delta\sigma_{th}$:

$$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta K_{th}}{Y\sqrt{\pi l}}, \tag{3}$$

где ΔK_{th} – размах порогового коэффициента интенсивности напряжений; l – размер трещины; Y – геометрический фактор.

Согласно данным рис. 4,а глубина трещины, соответствующая пределу выносливости, будет

$$l_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_0 Y} \right)^2. \tag{4}$$

Если предположить, что в зависимости (4) $Y = 1$, получим

$$l_0^* = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_0} \right)^2. \tag{5}$$

Величина l_0^* может рассматриваться как характеристика свойств материала, в то время как l_0 учитывает и свойства материала и геометрию образца.

Дальнейшие исследования [22–27 и др.] показали, что результаты экспериментов в области малых трещин не соответствуют схеме, приведенной на рис. 4,а. Осново-полагающей в этом случае была работа [22], в которой исследовались особенности распространения малых трещин в плоских стальных образцах ($\sigma_{0,2} = 740$ МПа, $\sigma_B = 800$ МПа, $\delta = 16\%$) при циклическом осевом нагружении при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0$. На поверхности таких образцов выполняли сверления диаметром и глубиной 50 мкм, которые инициировали зарождение усталостной трещины. Затем в процессе ступенчатого уменьшения напряжений определялся размах напряжений, ниже которого скорость роста усталостной трещины была меньше $2 \cdot 10^{-9}$ мм/цикл. Эта величина принималась как $\Delta\sigma_{th}$. Результаты исследований показаны на рис. 5 в логарифмических координатах размах порогового напряжения $\Delta\sigma_{th}$ – длина поверхностной трещины $2a$, включая сверление.

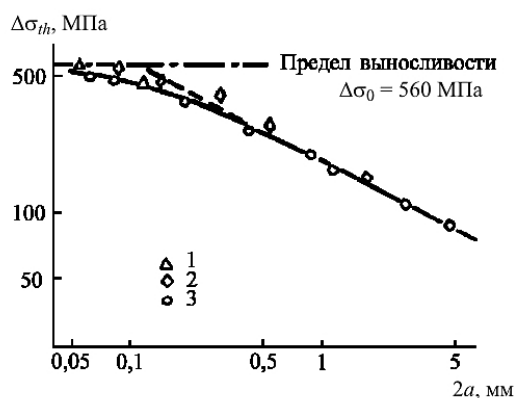


Рис. 5. Зависимость размаха порогового напряжения от длины трещины, полученная в работе [22]: 1 – $d(2a)/dN = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ мм/цикл; 2 – $d(2a)/dN = 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-8}$ мм/цикл; 3 – $d(2a)/dN < 2 \cdot 10^{-9}$ мм/цикл.

Из рис. 5 видно, что для исследованной стали при размерах трещины больше 0,5 мм зависимость $\Delta\sigma_{th} - 2a$ соответствует прямой линии и может быть описана критериями линейной механики разрушения. При размерах трещины менее 0,5 мм пороговые значения $\Delta\sigma_{th}$ существенно меньше, чем это следует из критериев линейной механики разрушения.

Размер трещины, соответствующий пределу выносливости гладкого образца, может быть найден как абсцисса точки пересечения кривой $\Delta\sigma_{th} - 2a$ и горизонтальной прямой, соответствующей пределу выносливости этого образца.

В настоящее время с учетом результатов многочисленных исследований [24, 26 и др.] зависимость в логарифмических координатах $\Delta\sigma_{th} - l$ представляется в виде, приведенном на рис. 4,б. Там же дана классификация трещин в зависимости от их размеров [24].

Таким образом, размер трещины l_0 , соответствующий пределу выносливости гладкого образца и найденный согласно критериям линейной механики разрушения (рис. 4,а), значительно больше, чем размер структурных элементов d , полученный по критериям нелинейной механики (рис. 4,б).

На рис. 6 по результатам исследования углеродистых и малолегированных сталей [8, 10, 11, 28] построены зависимости размеров зерен, размеров трещин, соответствующих точке пересечения диаграммы Китагава–Такахаша с горизонтальной прямой, которая отвечает пределу выносливости, а также размеров трещин, полученных по зависимости (5) и экспериментально определенных при пределе

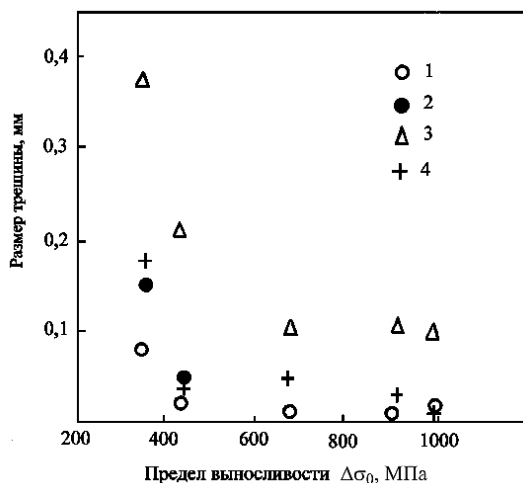


Рис. 6. Зависимость размера трещины от предела выносливости: 1 – размер элемента структуры; 2 – размер трещины d по диаграмме Китагава–Такахаша; 3 – величина l_0^* ; 4 – эксперимент.

выносливости, от предела выносливости. Здесь под размером трещины подразумевается глубина в предположении, что она равна половине ее длины на поверхности.

Экспериментально найденные размеры трещин, соответствующие пределу выносливости (рис. 6), значительно больше размеров зерен исследуемых материалов и лучше всего совпадают с размерами трещин, найденными по диаграмме Китагава–Такахаша.

Размеры трещин, определенные с использованием критериев линейной механики разрушения, существенно больше, чем экспериментально полученные размеры трещин, соответствующие пределу выносливости.

Детальный анализ соотношения размеров структурных элементов d , которые ассоциируются с размерами трещин при пределе выносливости, и размеров l_0 и l_1 (рис. 4,б) был выполнен в работах [29–31].

Анализировались результаты исследования закаленных и отожженных сталей, пластичных сталей, алюминиевых сплавов и алюминиевой бронзы, в качестве характерных элементов структуры материалов принимались зерна, мартенситные полосы, неметаллические включения и т.п.

Результаты сравнения размеров структурных элементов d с величинами l_1 и l_0 приведены на рис. 7 [29]. Видно (рис. 7,а), что значение l_1 увеличивается с ростом размеров структурных элементов. Средние значения l_1 для рассмотренных групп материалов близки к линии $l_1 = 10d$. В некоторых случаях величина l_1 , с учетом показанного интервала ее рассеяния, существенно превышает $10d$. Значение l_0 (рис. 7,б) также увеличивается с ростом размеров структурных элементов и отвечает диапазону между d и $10d$.

В табл. 2 приведены некоторые зависимости, описывающие диаграмму Китагава–Такахаша в области физически коротких трещин, которые предложены различными авторами [23, 24, 32–35 и др.].

В работе [24] зависимость $\Delta\sigma_{th} - l$ в области физически коротких трещин была получена на основе детального анализа изменения величины порогового коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от размера трещины.

Согласно предложенному в работе [23] подходу при напряжениях, равных пределу выносливости, размер трещины близок к нулю. Это противоречит экспериментальным данным, которые показывают, что при напряжениях, равных пределу выносливости, имеют место нераспространяющиеся трещины определенных размеров.

Т а б л и ц а 2

Зависимости, описывающие диаграмму Китагава–Такахаша

№ п/п	Зависимость	Величины, входящие в зависимость	Литературный источник
1	$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta K_{th}}{\sqrt{\pi(l+l_0^*)}}$	l – глубина трещины, ΔK_{th} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений для длинных трещин, l_0^* – величины в соответствии с формулой (5)	[23]
2	$\Delta\sigma_{th} = \begin{cases} \frac{[\Delta K_d + (\Delta K_{th} - \Delta K_d)] [1 - e^{k(l-d)}]}{Y\sqrt{\pi l}} & \text{при } l > d, \\ \Delta\sigma_{th} = \Delta\sigma_0 & \text{при } l < d \end{cases}$	d – размер в соответствии с рис. 4,б, $\Delta\sigma_0$ – предел выносливости гладкого образца, ΔK_d – пороговый коэффициент интенсивности напряжений для трещины глубиной d , $k = \frac{1}{2d} \frac{\Delta K_d}{(\Delta K_{th} - \Delta K_d)}$, Y – геометрический фактор	[24]
3	$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta\sigma_0}{\sqrt{Y^2 \frac{l}{l_0^*} + 1}}$		[32]
4	$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta K_{th} Y \Delta\sigma_0 \sqrt{\pi l}}{\sqrt{(Y \Delta\sigma_0 \sqrt{\pi l})^2 + (\Delta K_{th})^2}} *$		[33, 34]
5	$\Delta\sigma_{th} = \begin{cases} \sqrt{\frac{l_0}{l-d+l_0}} \Delta\sigma_0 & \text{при } l > d, \\ \Delta\sigma_0 & \text{при } l < d \end{cases}$	l_0 – величина в соответствии с формулой (4)	[35]

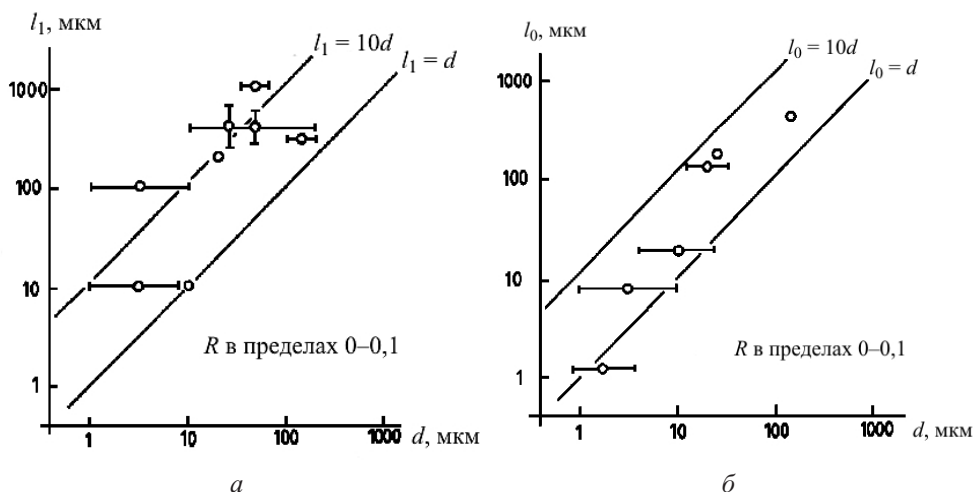


Рис. 7. Изменения величин l_1 (а) и l_0 (б) в зависимости от размера структурного элемента d .

На основе приведенных выше результатов можно сделать следующие выводы.

Согласно критериям механики разрушения размер трещины при пределе выносливости гладкого образца близок к размеру трещины, соответствующему точке пересечения кривой Китагава–Такахашаи [22] в координатах $\sigma_{th} - l$ с горизонтальной линией, которая отвечает пределу выносливости гладкого образца.

Такой размер трещины равен структурному элементу материала, который рассматривается как наиболее прочный барьер на пути распространения микроскопической усталостной трещины, это может быть размер одного или нескольких ферритных зерен, группа полос бейнита и мартенсита, определенные фазовые составляющие сплава и т.п.

Размеры трещин при пределе выносливости, найденные по формулам линейной механики разрушения, значительно больше, чем наблюдаемые экспериментально.

Основываясь на результатах, приведенных в литературных источниках [7–12, 24], можно сделать вывод, что размер трещины, соответствующий пределу выносливости гладких образцов, на базе 10^7 цикл для различных металлов и сплавов изменяется в основном в пределах 0,01...0,1 мм. Для весьма пластичных материалов эта величина может быть больше [8].

Размер усталостной трещины, соответствующий пределу выносливости, уменьшается с его увеличением.

Следует отметить большие сложности в выборе размеров структурных элементов материала, которые могут быть приняты в качестве размера трещины при пределе выносливости.

Нераспространяющиеся трещины в образцах с концентраторами напряжений. Зависимость предельных номинальных напряжений от теоретического коэффициента концентрации напряжений схематически показана на рис. 8 [36 и др.], где кривая AB характеризует зависимость предела выносливости от теоретического коэффициента концентрации напряжений для “мягких” концентраторов напряжений, когда радиус концентратора ρ большой, а его глубина t небольшая. В этом случае зона пластичности в вершине концентратора, в которой зарождается усталостная трещина, большая, и возникшая в ней усталостная трещина имеет возможность развиваться вплоть до разрушения образца. Линия BC (рис. 8) соответствует острым концентраторам напряжений, когда радиус концентратора небольшой, а его глубина большая. В этом случае зона пластичности в вершине концентратора мала по сравнению с

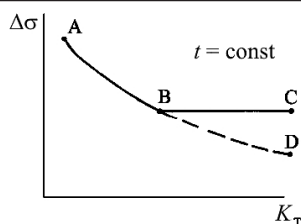


Рис. 8. Диаграмма предельных напряжений для образцов с концентраторами напряжений.

глубиной концентратора, и дальнейшее распространение зародившейся в ней трещины определяется в соответствии с критериями механики разрушения условиями распространения трещины, длина которой равна сумме глубины концентратора напряжений и длины зародившейся усталостной трещины.

Поскольку предполагается, что при острых концентраторах напряжений длина зародившейся усталостной трещины мала по сравнению с глубиной концентратора, величина напряжений, при которых усталостная трещина может развиваться и привести к разрушению, не зависит от теоретического коэффициента концентрации напряжений и определяется значениями порогового коэффициента интенсивности напряжений и глубины концентратора.

Кривая BD на рис. 8 соответствует минимальным напряжениям, при которых в острых концентраторах напряжений зарождается усталостная трещина. Если при развитии трещины соответствующий ей коэффициент интенсивности напряжений будет ниже порогового коэффициента интенсивности напряжений, трещина остановится. Зона между линиями BC и BD получила название зоны нераспространяющихся усталостных трещин.

Величина теоретического коэффициента концентрации напряжений, соответствующая переходу к нераспространяющимся усталостным трещинам (точка B на рис. 8), зависит от свойств материала, геометрии концентратора и колеблется в пределах $K_T^* = 3...6$.

Наличие нераспространяющихся усталостных трещин в острых концентраторах напряжений экспериментально исследовалось в [16, 18], в последнее время эти исследования получили новое развитие с использованием, для объяснения полученных результатов, критериев механики разрушения.

Подробно условия развития и остановки нераспространяющихся усталостных трещин рассмотрены в работах [33, 36–42].

В работе [36] для описания участка BC (рис. 8) предложена зависимость

$$\sigma = \frac{0,5\Delta K_{th}}{\sqrt{t}}. \quad (6)$$

Если учесть глубину пластической зоны в вершине концентратора $\Delta\rho$, будем иметь [38]

$$\sigma = \frac{0,5\Delta K_{th}}{\sqrt{t + \Delta\rho}}. \quad (7)$$

Минимальные напряжения, при которых в концентраторе напряжений возникают нераспространяющиеся усталостные трещины, в соответствии с работой [36] равны

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_0}{[1 + 7,69\sqrt{t/\rho}]^{0,5}}. \quad (8)$$

В работе [33] зависимость для определения размера нераспространяющихся усталостных трещин a_0^* установлена на основе упрощенных представлений в виде

$$\frac{a_0^*}{t} = \frac{\Delta\sigma/(Y\Delta\sigma_0)}{1 - [\Delta\sigma/(Y\Delta\sigma_0)]^2}. \quad (9)$$

Максимальный размер нераспространяющейся трещины в соответствии с анализом, выполненным в работе [42], определяется зависимостью (5).

Известные данные по размерам нераспространяющихся усталостных трещин обобщены в работе [33]. Их анализ показывает, что в некоторых случаях нераспространяющиеся усталостные трещины достигают весьма больших размеров, которые превышают таковые при пределе выносливости гладких образцов.

Представляет интерес сравнение размеров трещин, соответствующих пределам выносливости металлов и сплавов, в гладких образцах и образцах с концентраторами напряжений.

Данные литературных источников, посвященные исследованию этого вопроса, весьма ограничены и противоречивы. В одних случаях принимается, что эти размеры одинаковы [39], в других [40–42] показано, что размеры трещин, соответствующие пределам выносливости образцов с концентраторами напряжения, уменьшаются с увеличением теоретического коэффициента концентрации напряжений.

В работе [40] была предложена и реализована методика определения размера трещины, соответствующего пределу выносливости образцов с концентраторами напряжения, на основе предположения, что он определяется точкой пересечения кривой Китагава–Такахаша в соответствии с уравнением в табл. 2 (обозначено звездочкой) и кривой, описывающей изменение коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от размера короткой трещины при осевом нагружении.

Полученные по такой методике результаты исследования стали 45 в нормализованном состоянии приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Расчетные размеры трещин в образцах с концентраторами напряжения

Глубина надреза, t , мм	Радиус концентратора, ρ , мм	K_T	K_f	d , мм
5	0,3	5,6	4,31	0,061
3	0,3	5,1	3,94	0,062
3	0,6	3,7	3,11	0,096
3	1,0	3,2	2,77	0,200
8	3,0	2,7	2,63	0,546

Видно, что с увеличением теоретического коэффициента концентрации напряжений размер трещины, соответствующий пределу выносливости, уменьшается.

Анализируя данные табл. 3 и приведенные в работах [40–42], можно предположить, что размеры усталостных трещин при напряжениях, равных пределу выносливости образцов с концентраторами напряжений с теоретическими коэффициентами концентрации напряжений меньше, чем теоретический коэффициент концентрации K_T^* , соответствующий переходу к нераспространяющимся трещинам (точка В на рис. 8), будут отвечать закономерностям, полученным для гладких образцов, т.е.

размеры усталостных трещин, соответствующие пределам выносливости, будут увеличиваться с повышением предела выносливости. В данном случае – с ростом локальных напряжений в концентраторе напряжений, равных произведению номинальных напряжений, соответствующих пределу выносливости образцов с концентраторами напряжений, и величины теоретического коэффициента концентрации напряжений. Этот подход, очевидно, справедлив также при определении размеров трещин, соответствующих пределам выносливости, с учетом влияния размеров образцов и неоднородного напряженного состояния (изгиб).

При теоретических коэффициентах концентрации напряжений выше K_T^* следует различать размеры трещин, соответствующие возникновению нераспространяющихся усталостных трещин (линия BD на рис. 8) и пределам выносливости (линия BC).

Зависимости, определяющие напряжения, соответствующие пределам выносливости по зарождению усталостных трещин и разрушению, а также зависимости, определяющие размеры этих трещин, приведены выше.

Заключение. Анализ результатов экспериментальных исследований гладких образцов показал, что размер трещин при пределе выносливости металлов и сплавов увеличивается с его повышением. Для большинства металлов и сплавов размер такой трещины находится в пределах 0,01–0,1 мм. Для малоуглеродистых пластичных сталей размер трещин при пределе выносливости может быть больше.

Размеры трещин, соответствующие пределам выносливости при кручении, значительно больше, чем при осевом нагружении.

Размеры трещин, соответствующие пределам выносливости, рассчитанные с использованием критериев линейной механики разрушения, значительно больше, чем полученные экспериментально. Намного лучшее соответствие расчетных и экспериментальных результатов наблюдается при использовании критериев, в основу которых положена диаграмма Китагава–Такахаша.

В случае наличия концентраторов напряжений при теоретических коэффициентах концентрации напряжений, значения которых меньше необходимых для возникновения нераспространяющихся усталостных трещин, размеры трещин, соответствующие пределам выносливости, уменьшаются с увеличением теоретических коэффициентов концентрации напряжений и локальных напряжений в концентраторе.

При больших величинах теоретических коэффициентов концентрации напряжений следует различать размеры нераспространяющихся усталостных трещин и трещин при пределе выносливости. Размеры тех и других трещин могут быть найдены с использованием критериев механики разрушения.

Резюме

Розглянуто особливості розсіяного та локалізованого утомного пошкодження металів і сплавів. Проаналізовано розміри максимальних утомних тріщин на границі витривалості металів і сплавів різної зернистості та міцності. Розглянуто критерії лінійної і нелінійної механіки руйнування, що пов'язують розміри утомних тріщин і величини границь витривалості. Виконано порівняння розмірів утомних тріщин, що спостерігаються експериментально, з їх розрахунковими розмірами за різними критеріями. Розглянуто особливості зародження утомних тріщин, що не поширюються, за наявності концентраторів напружень.

1. Троценко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщ. 1. Неупругость, методы и результаты исследования // Пробл. прочности. – 2005. – № 4. – С. 5 – 32.

2. Троценко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщ. 2. Взаимосвязь между усталостью и неупругостью // Там же. – № 5. – С. 5 – 29.
3. Троценко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщ. 3. Деформационные и энергетические критерии // Там же. – 2006. – № 1. – С. 5 – 31.
4. Klesnil M. and Lukas P. Fatigue of Metallic Materials – Prague: Academia, 1980. – 239 p.
5. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие / Под ред. В. В. Панасюка. Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 680 с.
6. Handbook of Fatigue: Crack Propagation in Metallic Structure / Ed. A. Carpinteri. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – 534 p.
7. Троценко В. Т., Драган В. А. Исследование закономерностей неупругого деформирования и усталостного разрушения при кручении // Пробл. прочности. – 1982. – № 5. – С. 3 – 10.
8. Tokaji K., Ogawa T., and Harada Y. The growth of small fatigue cracks in a low carbon steel, the effect of microstructure and limitations of linear elastic fracture mechanics // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1986. – 9, No. 3. – P. 205 – 217.
9. Suh C. M., Yuuki R., and Kitagawa H. Fatigue micro cracks in low carbon steel // Ibid. – 8, No. 2. – P. 193 – 203.
10. Tokaji K., Ogawa T., and Harada Y. Evaluation on limitation of linear elastic fracture mechanics for small fatigue crack growth // Ibid. – 1987. – 10, No. 4. – P. 281 – 289.
11. Tokaji K., Ogawa T., Harada Y., and Ando Z. Limitation of linear elastic fracture mechanics in respect of small fatigue cracs and microstructure // Ibid. – 1986. – 9, No. 1. – P. 1 – 14.
12. Goto M. Statistical investigation of the behaviors of small crack and fatigue life in carbon steels whith different ferrite grain sizes // Ibid. – 1994. – 17, No. 6. – P. 635 – 649.
13. Kage M., Miller K., and Smith R. Fatigue crack initiation and propagation in a low-carbon steel of two different grain sizes // Ibid. – 1992. – 15, No. 8. – P. 763 – 774.
14. Tarnbull A. and De los Rios E. R. The effect of grain size on fatigue crack growth in an aluminium magnesium alloy // Ibid. – 1995. – 18, No. 11. – P. 1335 – 1366.
15. Tanaka K., Kakai Y., and Maekawa O. Microscopic study of fatigue crack initiation an early propagation in smooth specimen of law carbon steel // J. Soc. Mater. Sci. Jap. – 1982. – 31, No. 343. – P. 376 – 382.
16. Kobayashi H. and Nakazawa H. A stress criterion for fatigue crack propagation in metals // Proc. of the Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials (Aug. 15–20, 1971). – Kyoto, 1971. – 2. – P. 199 – 208.
17. Kinio T., Shimizu M., Ymada K., et al. The role of prior austenite grains in fatigue crack initiation and propagation in low carbon martensite // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1979. – 2, No. 3. – P. 237 – 299.
18. Форрест П. Усталость металлов / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
19. Frost N. E. A relation between the critical alternating propagations stress and crack length for mild steel // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1959. – 173. – P. 811 – 836.

20. *Frost N. E.* Notch effects and the critical alternating stress required to propagate a crack in an aluminium alloy subject to fatigue loading // *J. Mech. Eng. Sci.* – 1960. – No. 9. – P. 109 – 119.
21. *Frost N. E.* A note on the behavior of fatigue crack // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1961. – 9. – P. 143 – 151.
22. *Kitagawa H. and Takahashi S.* Applicability of fracture mechanics to very small cracks, or the cracks in the early stage // *Proc. of the Second Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials.* – Boston, MA. – 1976. – P. 627 – 631.
23. *El Haddad M. H., Topper T. H., and Smith K. N.* Prediction of non propagating cracks // *Eng. Fract. Mech.* – 1979. – 11. – P. 573 – 584.
24. *Chapetti M. D.* Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading // *Int. J. Fatigue.* – 2003. – 25. – P. 1319 – 1326.
25. *Santus C. and Taylor D.* Physically short crack propagation in metals during high cycle fatigue // *Ibid.* – 2009. – 31. – P. 1356 – 1365.
26. *Miller K. J.* The two thresholds of the fatigue behaviour // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1993. – 16, No. 9. – P. 931 – 939.
27. *Soboyejo W. O., Shen W., Lou J., et al.* A probabilistic frame work for the modeling of fatigue in a lamellar XD TM gamma titanium aluminide alloy // *Int. J. Fatigue.* – 2002. – 24, No. 1. – P. 69 – 81.
28. *Lankford J.* The influence of microstructure on the growth of small fatigue cracks // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1985. – 8, No. 2. – P. 161 – 175.
29. *Taylor D. and Knott J. F.* Fatigue crack propagation behaviors of short cracks: the effect of microstructure // *Ibid.* – 1981. – 4, No. 2. – P. 147 – 155.
30. *Taylor D.* Euromech colloquim short fatigue crack // *Ibid.* – 1982. – 5, No. 4. – P. 305 – 309.
31. *Miller K. J.* The short crack problem // *Ibid.* – 1982. – 5, No. 3. – P. 223 – 232.
32. *Atzori B., Lazzarin P., and Meneghetti G.* Fracture mechanics and notch sensitivity // *Ibid.* – 2002. – 26, No. 3. – P. 257 – 267.
33. *Yates J. R. and Brown M. W.* Prediction of the length of non-propagating fatigue cracks // *Ibid.* – 1987. – 10, No. 3. – P. 187 – 201.
34. *Du Quesnay D. I., Topper T. H., and Yu M. T.* The effect of notch radius on the fatigue notch factor and the propagation of short cracks // *The Behaviors of Short Fatigue Cracks* (Eds. K. J. Miller and E. R. De los Rios). – London: Mechanical Engineering Publication, 1986. – P. 323 – 335.
35. *Lukas P., Kunz L., Weiss B., and Stickler R.* Notch size effect in fatigue // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1989. – 12, No. 3. – P. 175 – 186.
36. *Smith R. A. and Miller K. J.* Prediction of fatigue regimes in notched components // *Int. J. Mech. Sci.* – 1978. – 20. – P. 201 – 206.
37. *Ting J. C. and Lawrence F. V.* A crack closure model for predicting the threshold stresses of notches sensitivity // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1993. – 16, No. 1. – P. 93 – 114.
38. *Hammouda M. M., Smith R. A., Miller K. J.* Elastic plastic fracture mechanics for initiation and propagation of notch fatigue cracks // *Ibid.* – 1979. – 2, No. 2. – P. 139 – 154.
39. *Lukas P., Kunz L., Weiss B., and Stickler R.* Non-damaging notches in fatigue // *Ibid.* – 1986. – 9, No. 3. – P. 195 – 204.

40. *De-Guang Shang, Wei-Xing Yao, and De-Jun Wang*. A new approach to the determination of fatigue crack initiation size // *Int J. Fatigue*. – 1998. – **20**, No. 9. – P. 683 – 687.
41. *Makkonen M*. Statistical size effect in the fatigue limit of steel // *Ibid.* – 2001. – **23**, No. 5. – P. 395 – 402.
42. *Makkonen M*. Notch size effects in the fatigue limit of steel // *Ibid.* – 2003. – **25**, No. 1. – P. 17 – 26.

Поступила 25. 11. 2013