УДК 620.22

Связь между диаграммой усталостного разрушения и кривой усталости

[1]Прокопенко А.В., [1]Хутыз А.М., [3]Степков В.М.,
[2]Крысин А.Г., [2]Пеленко В.В. pro1@gunipt.spb.ru
([1]Киев, [2]Санкт-Петербург [3],Новороссийск)

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.
Институт холода и биотехнологий.

Теоретически разработан метод пересчета кривой выносливости в диаграмму усталостного разрушения. Метод состоит в решении системы трех уравнений числа циклов разрушения образца на разных уровнях переменного напряжения, определяемых интегрированием зависимости: скорость роста трещины – коэффициент интенсивности напряжений, и получении трех неизвестных – порогового коэффициента интенсивности напряжений и двух параметров уравнения Париса. Проверка метода по опубликованным в литературе данным по выносливости и трещиностойкости сталей при циклическом нагружении продемонстрировала пригодность метода для практических расчетов. Использование метода позволяет повысить информативность усталостных испытаний и получить большое число дополнительной информации по результатам значительного числа проведенных экспериментальных исследований усталостной прочности материалов.

Ключевые слова: диаграмма, интенсивность нагружения, трещиностойкость,

The connection between the diagram of fatigue fracture and the fatigue curve.

[1]Prokopenko A.V., [1]Hutyz A.M., [3]Stepkov V.M., [2]Krysin A.G., [2]Pelenko V.V.
pro1 @ gunipt.spb.ru
([1]Kiev, [2]Sankt Petersburg, [3]Novorossiysk)

St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.
Institute of Refrigeration and biotechnology.

The method of recalculation of curve endurance in the fatigue failure diagram is theoretically developed. The method consists in the decision of system of three equations of number of cycles of destruction of the sample at the different levels of an alternating voltage defined by integration of dependence growth rate of a crack – factor of intensity of pressure, and reception of three unknown – threshold factor of intensity of pressure and two parameters of the equation of Parisa.
Method check under the data published in the literature on endurance and crack resistance steels at cyclic loading has shown suitability of a method for practical calculations. Method use allows to raise informative fatigue tests and to receive a great number of the additional information by results of considerable number of the spent experimental researches of fatigue durability of materials.

Keywords: the diagram, the intensity of loading, crack.

Процесс усталостного разрушения металлов можно разделить на две основные стадии – стадию зарождения магистральной усталостной трещины и стадию её развития. Под магистральной трещиной в этом случае подразумевается трещина, которая при заданных условиях нагружения развивается с большей скоростью, чем остальные трещины и является причиной окончательного усталостного разрушения. Начальные размеры магистральной трещины, то есть такие размеры, когда магистральную трещину можно выделить из совокупности всех остальных трещин, для пластичных сталей составляют десятые, для высокопрочных сталей сотые доли миллиметра. Стадия зарождения магистральной усталостной трещины характеризуется наличием большого количества локальных пластически деформированных объемов, являющихся источниками возникновения микроскопических трещин, одна (или несколько) из которых может перерасти в магистральную трещину. Результаты большого числа исследований свидетельствуют о том, что усталостные трещины возникают уже на самой ранней стадии циклического нагружения даже гладких образцов [1]. Реальные конструкции и детали не всегда так хорошо отполированы, как лабораторные образцы. В конструкциях всегда есть шлифовочные риски, забоины, царапины. Это значит, что относительное время зарождения трещин в них еще меньше. Наиболее распространенным методом прогнозирования усталостной прочности и долговечности элементов конструкций при многоцикловой усталости является метод номинального напряжения, где используется связь между амплитудой номинального напряжения $\boldsymbol{\sigma_a}$ и циклической долговечностью в виде $\boldsymbol{\sigma_a - N}$ кривой. Метод основывается на линейно-упругом анализе напряжений. Этот метод позволяет находить долговечность и предел выносливости. Влияние надрезов оценивается путем уменьшения предела выносливости делением на эмпирический коэффициент K_σ (эффективный коэффициент концентрации напряжений). К недостаткам метода следует отнести непригодность оценок

долговечности образцов к расчету конструктивных элементов, трудности при расчете долговечности при нестационарных нагрузках. При малых долговечностях K_σ уменьшается, что грубо учитывает тот факт, что при высоком номинальном напряжении пластическая деформация происходит локально у надреза и уменьшает напряжение, вычисленное из упругого анализа. Величина K_σ может быть существенно меньше, чем теоретический коэффициент концентрации напряжений K_t, особенно для пластичных материалов. При больших долговечностях, когда отсутствует влияние пластичности, острые надрезы вызывают инициирование малых трещин, и большая часть долговечности затрачивается на рост трещины вне зоны влияния надреза, где напряжения характеризуются величиной K_t. Условия торможения трещин также не определяются концентрацией напряжений вблизи надреза, поэтому сохраняется положение $K_\sigma < K_t$. Напряженное состояние в вершине трещины и рост трещин анализируются в методе механики разрушения. Основной переменной является параметр, называемой коэффициентом интенсивности напряжений К. Для расчета долговечности, определяемой длиной трещины l, используют скорость изменения длины с числом циклов dl / dN.

Величина К зависит от геометрии элемента с трещиной, нагрузки и размера трещины

$$\mathrm{K} = \mathrm{Y}\sigma\sqrt{l} \quad , \qquad (1)$$

где Y - безразмерный геометрический фактор.

Зависимость

$$dl / dN = f(\Delta K) \qquad (2)$$

где $\Delta K = K\max - K\min$, $R \geq 0$

$\Delta K = K\max$, $R \leq 0$

$R = K\min / K\max$,

Kmin, Kmax – минимальное и максимальное значения коэффициента интенсивности напряжений в цикле нагружения. Так называемую диаграмму усталостного разрушения (2), получают экспериментальным путем в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным (температура, асимметрия цикла, коррозионная среда, частота). Парис [2] впервые предложил зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений. Первый вид записи

$$dl / dN = A(\Delta K)^n \quad , \qquad (3)$$

(где A, n - эмпирические параметры) оказался самым простым и удобным, и сейчас используется в инженерной практике чаще других форм зависимости (2).

Долговечность при постоянной амплитуде нагружения рассчитывается следующим образом

$$\frac{dl}{dl} = \frac{1}{f(\Delta K)} = \frac{1}{f(Y\sigma\sqrt{l})}, \qquad (4а)$$

$$N = \int_{l_H}^{l_K} (\frac{dN}{dl})dl \qquad (4б)$$

Пределами интегрирования являются начальная и конечная длины трещин. Метод механики разрушения может применяться независимо, если известно о существовании начальной длины трещины. Иногда за начальный размер трещины принимают такую её максимальную длину, которая не может быть обнаружена применяемыми методами дефектоскопического контроля [3]. Однако поведение мелких трещин плохо подчиняется закономерностям, полученным для больших трещин. Для инженерных приложений, в работе [4], предложен метод описания скорости роста мелких трещин, основанный на использовании поправки на длину трещины l_o – фиктивный размер трещины, которая предположительно существует в гладком образце и фактически приводит в согласие условие $\sigma_a = \sigma_{-1}$ и $\sigma_{th}(\Delta K = \Delta K_{tn}) = \sigma_{-1}$, где $\sigma_{th}, \Delta K_{th}$ – пороговые напряжение и размах коэффициента интенсивности напряжений, при которых трещина не распространяется, σ_{-1} - предел выносливости. Коэффициент интенсивности напряжений для мелких трещин вычисляется по формулам

$$K = Y\sigma\sqrt{l + l_o} \quad , \qquad (5)$$

$$l_o = \frac{\Delta K_{th}^2}{Y^2\sigma_{-1}^2} \quad . \qquad (6)$$

С учетом поправки, скорость роста усталостных трещин как больших, так и малых описывается единой диаграммой усталостного разрушения. Хотя какого-либо физического объяснения постоянной l_o не предложено, тем не менее её использование для моделирования пороговых условий распространения малых трещин весьма эффективно. Микротрещины развиваются быстрее, чем длинные трещины. Обработка данных с использованием формул (5), (6) обеспечивает хорошую корреляцию между результатами для коротких и длинных трещин [4]. Возможность использования этого простого подхода для моделирования эффектов, связанных, очевидно, с некорректностью механики сплошной среды, имеет важное практическое значение. Принимая это во внимание, с учетом выражений (5), (6) число циклов до разрушения гладкого образца согласно выражения (4б) можно записать в виде:

$$N = \int_{l_o}^{l_k} (\frac{dN}{dl}) dl \,, \qquad (7)$$

Из этого выражения видно, что долговечность гладких образцов, разрушаемых при постоянной амплитуде напряжения, может быть подсчитана по результатам испытаний на трещиностойкость. Попытка установить связь между кривой выносливости и диаграммой усталостного разрушения предпринималась в работе [5]. Было предложено перестроить диаграмму усталостного разрушения следующим образом. Учитывая, что каждому значению $K\max$ соответствует определенное постоянное значение скорости развития трещин, можно записать

$$\lg V = \lg \frac{\Delta l}{N} \,, \qquad (8)$$

где Δl - заданное приращение трещины за N циклов, $K\max = const$

Принимая $\Delta l = 1$, можно получить [5]:

$$\lg V = -\lg N \,, \qquad (9)$$

Для случая $R = -1$ диаграмма усталостного разрушения соответствует диаграмме в координатах $\lg \Delta K - \lg N$. «Эта диаграмма при условии эквивалентности влияния амплитуды коэффициента интенсивности напряжений (ΔK при $R = -1$) на скорость развития трещины влиянию амплитудного значения цикла напряжений σ_a на момент образования трещины, при стандартных испытаниях гладких образцов на усталость, тождественна кривой усталости материала в условиях симметричного цикла нагружения» [5]. Наклонный участок кривой выносливости можно[5] описать уравнением:

$$N(\sigma_a) = N_o(\sigma_{-1} / \sigma_a)^m \,, \qquad (10)$$

где N_o, m - эмпирические параметры, N_o - число циклов, соответствующее достижению предела усталости σ_{-1}. Для среднеамплитудного участка диаграммы усталостного разрушения по аналогии [5] можно записать:

$$V = V_2(\Delta K / \Delta K_{th})^n \,, \qquad (11)$$

где V_2 – скорость роста трещины по уравнению (3) при $\Delta K = \Delta K_{th}$. Принимая $A = V_2 / (\Delta K_{th})^n$, получим формулу Париса (3). Подводя итог рассмотрению работы [5] можно констатировать, что хотя показана возможность перерасчета кривой выносливости в диаграмму усталостного разрушения, в строгом математическом виде путь этого перерасчета не разработан. Главным недостатком построенной цепи рассуждений очевидно является условность эквивалентности зависимостей $V(\Delta K)$ и $N(\sigma_a)$ Очевидно зависимость $N(\sigma_a)$ определяется помимо всего прочего размерами и формой образцов, геометрическим фактором Y для данного

типа образца. Эти особенности необходимо учитывать при разработке метода перерасчета кривой выносливости в диаграмму усталостного разрушения. При построении метода расчета диаграммы усталостного разрушения по кривой выносливости можно использовать математический аппарат, разработанный ранее [6] для сходной задачи. По числу циклов на приращение трещины от одного размера до другого в двух образцах, испытанных при различных уровнях переменного напряжения, рассчитывались параметры уравнения Париса. Если для двух таких образцов записать уравнения (4б), получим [6]:

$$N_{1,2} = \frac{1}{A\sigma_{a1,2}^{n}} \int_{l_{H_{1,2}}}^{l_{K_{1,2}}} \frac{dl}{[Y(l)\sqrt{l}]^{n}}, \qquad (12)$$

где, 1,2 - номера образцов.

Продолжим преобразование уравнений (12):

$$A = \frac{1}{N_1\sigma_{a1}^{n}} \int_{l_{H_1}}^{l_{K_1}} \frac{dl}{[Y(l)\sqrt{l}]^{n}} = \frac{1}{N_2\sigma_{a2}^{n}} \int_{l_{H_2}}^{l_{K_2}} \frac{dl}{[Y(l)\sqrt{l}]^{n}}, \qquad (13)$$

Из выражения (13) можно[6] получить величину показателя степени «n»:

$$n = \frac{\lg(\frac{N_1}{N_2}) + \lg\left\{\int_{l_{H_2}}^{l_{K_2}} [Y(l)\sqrt{l}]^{-n} dl \Big/ \int_{l_{H_1}}^{l_{K_1}} [Y(l)\sqrt{l}]^{-n} dl\right\}}{\lg(\sigma_{a2}/\sigma_{a1})}, \qquad (14)$$

Определив показатель степени, из выражения (13) находим коэффициент A. Распространим приведенное решение на случай, когда неизвестны не две величины (n, A) , а три величины ($\Delta K_{th}, n, A$). Для трех уровней переменного напряжения по кривой усталости имеется возможность определить три значения долговечности образца :

$$N_{1,2,3} = \frac{1}{A\sigma_{a1,2,3,}^{n}} \int_{l_o}^{l_{K_{1,2,3}}} \frac{dl}{[Y(l)\sqrt{l}]^{n}}, \qquad (15)$$

По характеристике K_{lc} или по пределу текучести σ_T можно определить размер трещины при нестабильном разрушении. Разрушение происходит от потери устойчивости при росте трещины и достижении нетто напряжением величины предела текучести, или при хрупком доломе образца, если он наступает раньше, чем пластическое общее течение. Задаваясь величиной l_o из двух формул (15) можно получить параметры n и A. Из третьей формулы (15) по этим величинам определяем размер фиктивной трещины l_o. Итерациями можно

достичь равенства величины l_o, которой задавались в первых двух формулах (15), и величины l_o которая получается из третьей формулы выражения (15). По величинам σ_{-1}, l_o по формуле (6) можно определить величину порогового коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th}. В случае если кривая выносливости представляет собой ломанную кривую, то решается несколько систем уравнений (15), каждая для своего участка. Предложенный метод был опробован на литературных данных работ [7-9]. В работе [7] представлены кривые выносливости компрессорных лопаток из 4-х марок нержавеющих сталей на воздухе. Трещины в этих лопатках образуются в основном на спинке в корневом сечении. При испытании на виброусталость лопатку считают разрушенной, если частота собственных колебаний её снижается на 5 Гц. При этом длина трещины на спинке в лопатках разной конструкции составляла 2…4 мм. Коэффициент интенсивности напряжений в лопатках с полуэллиптическими трещинами на спинке определяли по формулам из работы [8]. В качестве конечного размера трещины принимали длины трещин, при которых частота лопатки падала на 5 Гц. Значения эмпирических параметров уравнения Париса и порогового коэффициента интенсивности напряжений, рассчитанных по системе уравнений (15), сравнивали с экспериментальными данными из работы [9], где характеристики трещиностойкости сталей были получены при тех же частоте нагружения и методе испытаний, что и при испытании лопаток на усталость [7]. Алгоритм перерасчета параметров кривой выносливости в параметры уравнения Париса представлен на рис.1. нулевое приближение для l_o принималось 0,05 мм. Относительная погрешность определения величин n и l_o принята 0,05. Численное интегрирование в уравнениях (15) осуществлялось по методу Симпсона с погрешностью до 1 %. Программа расчета по алгоритму реализована на языке ФОРТРАН. Проверка на адекватность между диаграммами усталостного разрушения полученными по кривым выносливости и методом прямого эксперимента, осуществлялась путем сравнения на значимость различия оценок дисперсий скорости роста трещины по критерию Фишера. Установлена адекватность результатов расчетов и экспериментов. В таблице 1 представлены результаты расчетов и экспериментов и их сравнительная оценка. Значения пороговых коэффициентов интенсивности напряжений для испытаний на воздухе в целом хорошо согласуются по результатам экспериментов и расчетов. Среднее отношение $\Delta K_{th}расч./\Delta K_{th}экс.$ составляет 0,84. Отличие в скорости роста усталостных трещин с учетом рассеяния экспериментальных данных (табл. 1) находится в приемлемых пределах. В целом проведенная по литературным данным проверка позволяет предложить описанный метод для перерасчета кривых выносливости в диаграммы усталостного разрушения. Так как в испытаниях на усталость широкое распространение получил такой вид нагружения, как круговой

изгиб, необходимо предложенный метод расчета параметров трещиностойкости приложить к испытаниям цилиндрических образцов.

Для определения коэффициента интенсивности напряжений в цилиндрическом изгибаемом образце воспользуемся результатами статьи [10]. Формулы для определения коэффициента интенсивности напряжений следующие:

$$\Delta K = Y\sigma_{\text{è}}\sqrt{2l}\,, \quad \sigma_{\text{è}} = M_{\text{è}} / 0{,}098D^3 \qquad (16)$$

$$Y = 1{,}1606 - 5{,}622\alpha + 25{,}174\alpha^2 - 54{,}972\alpha^3 + 48{,}777\alpha^4, \qquad (17)$$

$$\alpha = 2l / \pi D, \qquad (18)$$

где $2l$ – длина полуэллиптической трещины на поверхности образца;

D – диаметр образца;

M_u- изгибающий момент.

По результатам усталостных испытаний на круговой изгиб образцов Ø 7,5 мм из титановых сплавов 17, 3В, 19 рассчитаем их характеристики трещиностойкости. Определим конечный размер трещины $2l_K$, при котором происходит долом образца. Разрушение может произойти хрупко при $\sigma_a < \sigma_T$. Тогда размер $2l_K$ можно определить по формуле (16) из условия $\Delta K_I = K_{I_c}$. Если вязкость разрушения K_{I_c} достаточно высока, а диаметр образца достаточно мал, то произойдет вязкое разрушение, то есть от потери устойчивости. При этом нетто напряжений от изгиба σ_{netto} будет равно пределу текучести $\sigma_T(\sigma_{0,2})$. Для исследованных в данной работе титановых сплавов 3В, 17, 19 примерно сохраняется условие:

$$\sigma_{-1} = 0{,}6\sigma_T, \qquad (19)$$

Максимальные напряжения, при которых испытываются гладкие образцы, не превышают величины примерно $\sigma_{\max} \le 1{,}5\sigma_{-1}$. Следовательно:

$$\sigma_{a_{\max}} = 1{,}5\sigma_{-1} = 0{,}9\sigma_T, \qquad (20)$$

Определим, какому размеру и форме трещины соответствуют условия (19), (20). В работе [10] содержится детальный анализ соотношения относительной длины трещины $2l / \pi D$ и относительной глубины трещины a / D для материалов различных классов. Между этими величинами существует линейная зависимость:

$$\frac{a}{D} = b\frac{2l}{\pi D}, \qquad (21)$$

где коэффициент b для стали 10ГН2МФА при температуре 133 … 293К, сталей 15ГАФДпс, ХI8Н10Т, Х16Н6, технического железа, алюминиевого сплава АМг6, титановых сплавов, колеблется в пределах 0,67….1,04 и в среднем составляет 0,85. Для этого среднего коэффициента рассчитана зависимость превышения нетто

напряжения σ_{netto} над брутто напряжением σ_u [11]. Рассмотрим разрушение образца с полуэллиптической трещиной. Оно происходит при действии изгибающего момента, раскрывающего трещину. При действии момента в противоположном направлении берега трещины опираются друг на друга и момент сопротивления сечения с трещиной равен таковому без трещины. Напряжения нетто равны напряжениям брутто и разрушения не происходит. С учетом изложенного, по условиям (15), (20) и данным работы [11] можно рассчитать, при каких размерах трещины и её форме наступает пластическое разрушение, то есть $\sigma_{netto} = \sigma_T$. На уровне предела выносливости $\sigma_a = \sigma_{-1}$ образец при $D = 7{,}5$ мм разрушается при размерах трещины $2l/\pi D = 0{,}35$, $2l = 8{,}25$ мм, $a = 2{,}23$ мм; при $\sigma_{max} = 1{,}5\sigma_{-1}$ образец разрушается при размерах трещины $2l/\pi D = 0{,}15$, $2l = 3{,}53$ мм, $a = 0{,}95$ мм. Эти условия разрушения представлены на рис.1 линиями 1. Определим возможность хрупкого разрушения для сплавов 17, 19, 3В с их уровнем предела текучести (табл. 2). В работе [12] представлено большое число экспериментальных данных по вязкости разрушения и пределу текучести.

Широкую полосу рассеяния данных можно ограничить двумя прямыми и провести среднюю линию и нижнюю ограничивающую.

По этим четырем характерным линиям с использованием формулы (16) в виде:

$$K_{1c} = Y\sigma_n\sqrt{2l_K}\,, \qquad (22)$$

были рассчитаны критические размеры трещин для сплавов с различным уровнем предела текучести (линии 2, 3, 4 рис.1). Как видно из рисунка 1, в исследованных сплавах 17,19, 3В с их уровнем предела текучести при диаметре образцов 7,5 мм возможно только пластическое разрушение по условию $\sigma_{netto} = \sigma_T$. В соответствии с этим выводом, критический размер трещины $2l_K$ определяли по условию $\sigma_{netto} = \sigma_T$, а также данным таблицы. 2 и работы [11]. По формулам (6), (15), (16), (17) были рассчитаны параметры трещиностойкости сплавов 17,19,3В при циклическом нагружении на воздухе и в коррозионной среде при температурах в диапазонах соответственно 293…773 К и 292…373 К. Эти данные представлены в табл.2. Как следует из результатов расчетов с повышением температуры пороговый коэффициент интенсивности напряжений снижается как на воздухе, так и в коррозионной среде.

Характерную особенность имеют диаграммы усталостного разрушения сплава 19 при температурах 623 К и 773 К (табл.2). Они состоят из двух участков с разными наклонами. Это связано с тем, что кривые выносливости при этих температурах

имеют излом. Помимо результатов, изложенных в данной работе, проанализированы экспериментальные материалы, полученные в другом исследовании [13]. Порог трещиностойкости сплавов ВТ6, ВТ9, ВТ20 находится на том же уровне, что и характеристики сплавов 3В, 19 при температурах 293 К, 623 К, 773 К.

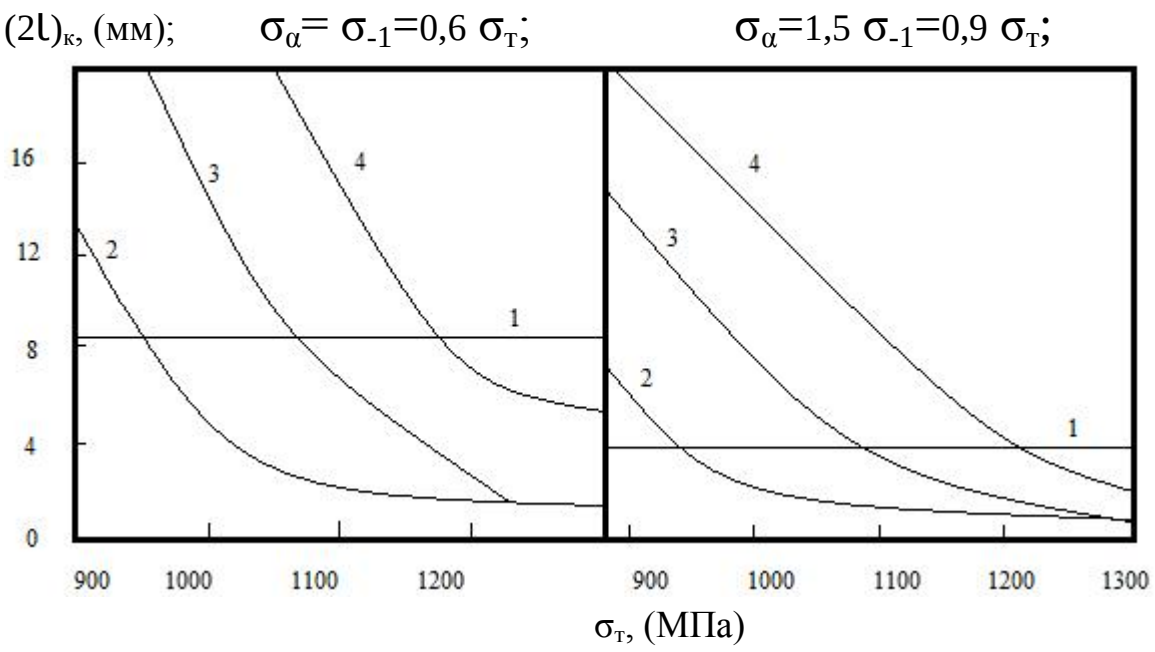


Рисунок 1.- Оценка по пределу текучести для титановых сплавов возможности хрупкого разрушения образца диаметром 7,5 мм при изгибе.
(1-условие $\sigma_{netto}= \sigma_т$; 2,3,4,5- условия хрупкого разрушения).

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные характеристики трещиностойкости сталей

Сталь	σ_{-1} МПа	ΔK_{th} МПа, $\sqrt{м}$	n	A	$(\frac{dl}{dN})_{\Delta K=8}$ мм/цикл	$\lg(\frac{dl}{dN})_{\Delta K=8}$	$\frac{\Delta K_{th}^{расч.}}{\Delta K_{th}^{экс}}$	$\frac{\lg(\frac{dl}{dN})_{\Delta K=8}^{расч}}{\lg(\frac{dl}{dN})_{\Delta K=8}^{экс.}}$
Экспериментальные данные								
20Х13	405	5,47	4,16	$9,83*10^{-11}$	$5,62*10^{-6}$	-6,251	-	-
14Х17Н2	464	6,1	4,87	$7,60*10^{-11}$	$1,90*10^{-6}$	-5,721	-	-
13Х11Н2В2МФ	508	6,16	4,56	$4,59*10^{-11}$	$6,02*10^{-7}$	-6,220	-	-
08Х17Н6Т	464	5,54	3,69	$2,05*10^{-10}$	$4,41*10^{-7}$	-6,356	-	-

Расчетные данные								
20Х13	-	5,25	5,29	$2,02*10^{-11}$	$1,21*10^{-6}$	-5,917	0,96	0,95
14Х17Н2	-	6,31	8,85	$3,71*10^{-15}$	$3,65*10^{-7}$	-6,438	1,03	1,13
13Х11Н2В2МФ	-	3,72	5,99	$1,58*10^{-11}$	$4,06*10^{-7}$	-6,391	0,604	1,03
08Х17Н6Т	-	4,33	8,83	$4,51*10^{-14}$	$4,25*10^{-6}$	-5,372	0,78	0,85

Таблица 2. Характеристики сопротивления усталости исследованных сплавов

Сплав	Среда	Т, К	$\sigma_{0.2}$ МПа	σ_{-1} МПа	ΔK_{th} МПа$\sqrt{м}$	n	A
1	2	3	4	5	6	7	8
17	В (на воз-духе)	293	720	320	3,22	12,18	$9,04*10^{-16}$
		373	625	265	2,89	4,18	$2,64*10^{-10}$
		523	430	210	2,19	2,95	$4,46*10^{-9}$
		623	375	154	1,07	3,71	$7,86*10^{-9}$
		773	310	79	0,44	3,33	$4,21*10^{-8}$
	3% NaCl	293	720	270	2,18	8,91	$6,15*10^{-13}$
		373	625	270	1,8	11,37	$1,84*10^{-13}$
3В	В	293	655	415	3,24	7,80	$7,03*10^{-14}$
		373	600	390	2,50	6,72	$9,46*10^{-12}$
		523	490	330	1,80	21,20	$2,58*10^{-16}$
		623	460	250	2,67	23,12	$7,25*10^{-20}$
		773	420	200	2,56	20,81	$3,53*10^{-16}$
	3% NaCl	293	655	394	2,93	10,08	$6,84*10^{-14}$
		373	600	360	2,91	6,48	$9,00*10^{-12}$
19	В	293	710	390	3,11	12,61	$3,05*10^{-15}$
		373	700	480	2,24	35,88	$2,32*10^{-22}$
		523	640	410	1,29	7,83	$2,33*10^{-9}$
		623	590	355	1,70	48,	$5,25*10^{-22}$
						для dl/dN до $3*10^{-8}$	
						10,67	$3,33*10^{-11}$
						для dl/dN >$3*10^{-8}$	
		773	460	293	2,79	21,60	$1,1*10^{-19}$
						для dl/dN до $6*10^{-8}$	
						7,49	$6,73*10^{-12}$
						для dl/dN >$6*10^{-8}$	
	3% NaCl	293	710	410	4.1	15.36	$1.42*10^{-17}$
		373	700	490	4.6	47.61	$4.26*10^{-37}$

Список литературы

1. Прокопенко А.В., Торгов В.Н. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение 1. Зависимость предела текучести от глубины слоя // Пробл. Прочности. – 1986. - № 4. – С. 28-34.2
2. Парис П., Эрдоган Ф. Критический анализ законов распространения трещин // Техническая механика. Труды АОИМ, сер.Д. – 1963. – 85, № 4 – С. 60-68.
3. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. – Киев: Наук.думка, 1087. – 1340с.
4. Эль – Хаддад М.Х., Смит К.Н., Топпер Т.Х. Распространение коротких усталостных трещин // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1979. - № 1. – С. 43-47.
5. Партон В.З., карпов Г.Н. Об одной аналогии при усталостных испытаниях металлов // Пробл. Прочности. – 1981. - № 4. – С.11- 13.
6. Трощенко В.Т., Прокопенко А.В., Баумштейн М.В. Расчетная методика определения скорости развития усталостных трещин в металлах // Пробл. Прочности. – 1977. - № 2. – С. 16-19.
7. изучение влияния эксплуатационной наработки и коррозионной среды на выносливость лопаток компрессора ГТД / В.Т.Трощенко, А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов, М.В. Баумштейн, Л.Б.Гецов // Пробл. Прочности. – 1981. - № 4. – С. 5-10.
8. Трощенко В.Т., Прокопенко А.В.. Ежов В.Н., Торгов В.Н. Методика расчета предела выносливости и долговечности лопаток компрессора газовой турбины с учетом наличия трещин: Оценка влияния эксплуатационных факторов и свойств поверхностного слоя в расчетах предела выносливости и условий зарождения усталостных трещин / АН УССР. Ин-т пробл. Прочности. – Преп. – Киев. 1987. – 26 с.
9. Трощенко В.Т., Прокопенко А.В., Торгов В.Н. Влияние раствора морской соли на скорость роста усталостных трещин в нержавеющих сталях и сплаве ВТ3-1 // Пробл.прочности. – 1981. - № 4. – С. 69-73.
10. Прокопенко А.В. Экспериментальное определение коэффициента интенсивности напряжений для цилиндрического образца с односторонней трещиной при изгибе // Пробл. Прочности. – 1982. - № 10. – С. 37-40.
11. Прокопенко А.В. Исследование характеристик вязкости разрушения сталей при циклическом нагружении: Автореф. Дис…. канд. техн. наук. – Киев, 1978. – 26 с.
12. Ковчик С.Е., Морозов Е.М. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения // Механика разрушения и прочность материалов : Справочное пособие (в 4-х томах). – Киев: Наук.думка, 1988. – т.3 – 436 с.
13. Методика расчета предела выносливости и долговечности лопаток компрессора газовой турбины с учетом наличия трещин: Оценка влияния эксплуатационных факторов при расчете долговечности лопаток. Практические примеры. / Трощенко В.Т., Прокопенко А.В., Ежов В.Н., Торгов В.Н. ; Ин-т пробл. прочности. – Препр. – Киев, 1988. – 36 с.