

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРИОДА РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ И ЕЁ ГРАФИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ

©2009 Ю. И. Кольцун, Т. А. Хибник

Самарский государственный аэрокосмический университет

В основу методики легла диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений и формула Париса. Данная методика позволяет количественно оценивать остаточную долговечность деталей с развивающейся усталостной трещиной (медленнорастущей) и скорость её роста с помощью кинетической диаграммы.

Серповидная трещина, диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений, период роста, кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины

1. Диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений (КИН)

Предельные диаграммы коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для различных материалов являются важной характеристикой разрушения материала, благодаря которым можно определять период роста усталостной трещины, или живучесть деталей. Как известно, живучесть - это количество циклов до разрушения детали после обнаружения усталостной трещины. Построение диаграмм предельных КИН представляет экспериментально ёмкую задачу. Аналитический расчет живучести имеет большое значение для оперативной экспертной оценки работоспособности детали.

На основе макроструктурного физико-математического анализа изломов в работе [1] предлагается построение диаграмм предельных коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), используя испытания на усталость цилиндрических образцов с кольцевым конструктивным надрезом при изгибе по симметричному циклу с амплитудой, соответствующей окрестности предела выносливости по разрушению. В отличие от гладкой рабочей поверхности в данном случае образуются две симметричные относительно нейтральной оси усталостные трещины серповидной формы как результат высокой амплитуды напряжений и высокой концентрации напряжений. Для того чтобы серповидная трещина имела минимальную скорость роста, целесообразно наносить кольцевой надрез на предварительно упрочненную поверхность пластическим де-

формированием (ППД) безнаклепным способом поверхность. При этом глубина концентратора должна быть несколько больше толщины упрочненного слоя [2], с целью исключения влияния наклепа. Подобным макротрещинам в работе [3] дано определение «нераспространяющиеся». В настоящее время подобные трещины называются медленнорастущими.

На рис. 1 представлен принудительный излом цилиндрического образца из стали 45, выстоявший заданную базу испытаний 10 миллионов циклов. На изломе видно усталостную трещину 1 серповидной формы и полуэллиптическую трещину 2. Для сравнения излома лабораторного образца с реальной деталью на рис. 2 представлена фотография излома шпильки крепления кронштейна авиационного ГТД к нервюре, полученная от Государственного центра безопасности полетов на воздушном транспорте (ГЦБПВТ, г. Москва). Здесь также видна серповидная трещина 1, отделяемая мезолиниями, образующимися за полетный цикл.

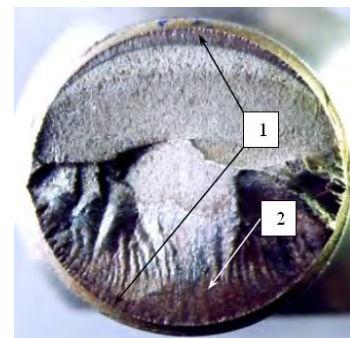


Рис. 1. Излом с медленнорастущей усталостной трещиной: 1 – серповидная трещина, 2 – полуэллиптическая трещина

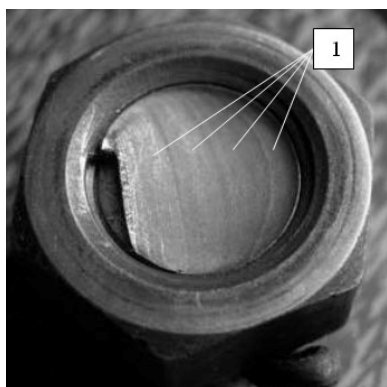


Рис. 2. Штилька крепления кронштейна к силовой нервюре самолета Як-42 узла крепления ГТД: сталь 07Х16Н6

Имея в образце (см. рис.1) серповидную усталостную трещину комбинированного типа (тип III + тип I) (см. рис.3), коэффициент интенсивности напряжений для трещины такого типа K_{Σ} при влиянии квазимикроскопических процессов на макрохарактеристики трещинообразования имеет следующий вид:

$$K_{\Sigma} = K_{III} \left(\frac{\xi^{-N}}{\xi^{-N} + 1} \pm A(\xi) \right) + K_I \left(\frac{\xi^{-N}}{\xi^{-N} + 1} \mp A^*(\xi) \right), \quad (1)$$

где $K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a_I} f_{IK}$; $K_{III} = \tau_{окт} \sqrt{\pi a_{III}} f_{IIIK}$;

$$\tau_{окт} = \frac{\sigma_I}{2} \sin 2\alpha; \quad a_I = y - b; \quad a_{III} = \frac{y}{\cos \alpha};$$

$$\xi = \frac{y}{b + c};$$

K_I, K_{III} – коэффициенты интенсивности напряжений по I и III типу, МПа·√м;

σ_I – нормальное напряжение при отрыве, МПа;

$\tau_{окт}$ – касательное октаэдрическое напряжение, МПа;

a_I, a_{III} – глубина трещины по I и III типу, мм;

f_I, f_{III} – поправочные функции K-тарировки, $f_{I,III} = 1,12$;

y – текущая координата, мм;

b – постоянная глубина трещины по типу III для материала при отрыве, мм;

N, A, A^* – постоянные значения: $N=100$,

$A = \{-1; 0; 0,5; 1\}$, $A^* = \{0,5; 1\}$.

В выражении (1) верхний уровень знаков используется при $0 \leq \xi < 1$, при этом $A=0$, $A^*=1$ и при $\xi=1$, при этом $A=0,5$; $A^*=0,5$, нижний – при $1 < \xi \leq a_{max}/b$, при этом $A=-1$, $A^*=1$. Значения N и A получены методом вариационного анализа.

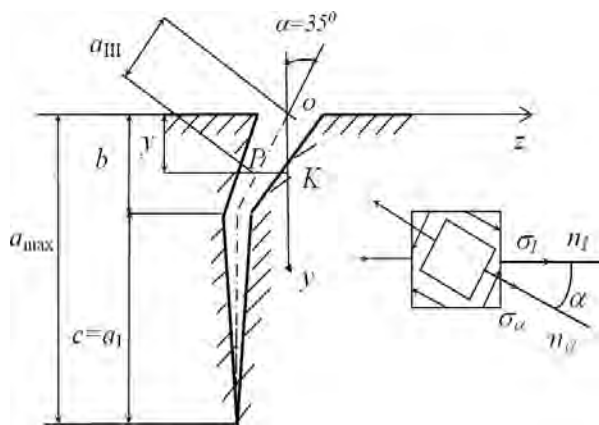


Рис. 3. Усталостная трещина комбинированного типа

Методика построения предельных КИН комбинированного типа, в зависимости от глубины роста усталостной трещины в сечениях главных плоскостей, параллельных плоскости задания нагрузки, основана на расчетах глубин в пределах половины длины серповидной трещины 1 при изменении центрального угла θ от \max до 0 (см. рис. 4), а затем до максимальной глубины полуэллиптической трещины 2 (см. п.2 рис. 1). Трещина по типу III составляет всего 20%, т.е. $a_{III}=0,24$ мм от общей глубины трещины серповидной формы $a_{max}=1,2$ мм.

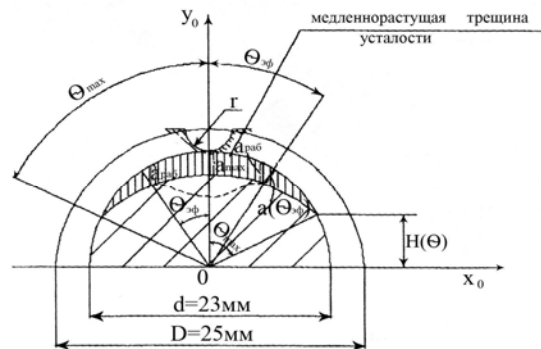


Рис. 4. Геометрическая схематизация излома с серповидной и полуэллиптической трещинами

На рис. 5 изображена расчетная диаграмма предельных КИН для стали 45. Диаграмма построена для фазы растяжения при конечных максимальных номинальных напряжениях на соответствующих уровнях линии фронта серповидной трещины, поэтому размах КИН - ΔK – в случае симметричного цикла, предполагающий синусоидальное изменение напряжений, не учитывается.

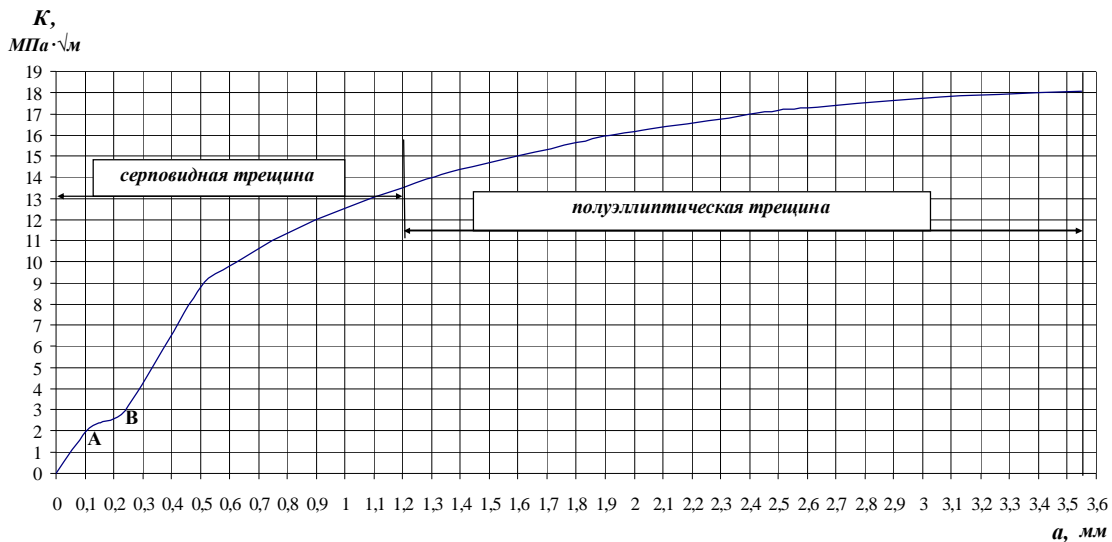
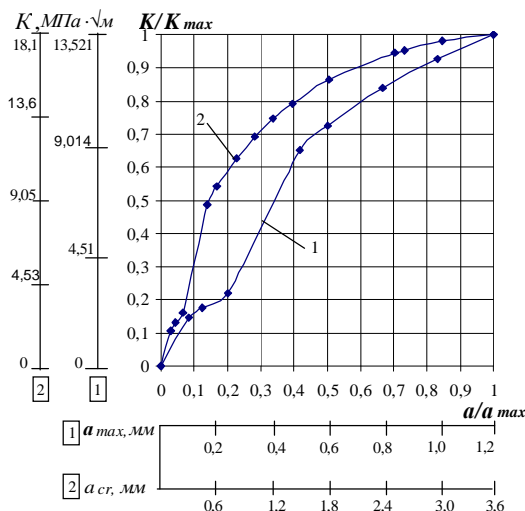


Рис. 5. Диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений

Рис. 6. Диаграмма относительных КИН

2. Период роста усталостной трещины

С точки зрения инженерной практики, использовать диаграмму предельного КИН для вывода формулы живучести в том виде, как показано на рис. 4 нецелесообразно, так как взять производную, используя углы наклона касательной к кривой функции в градусах без дополнительных пересчетов нельзя. В этой связи рекомендуется перестроить диаграмму предельных КИН в относительных величинах, определяемых как отношение текущих значений КИН к максимальному значению K/K_{max} и отношение соответствующих текущих значений глубины трещины к её максимальному значению a/a_{max} . Это позволяет брать производную через тангенс угла наклона касательной к кривой, выраженного в градусах. На рисунке 6 представлена диаграмма КИН ($K/K_{max} = f(a/a_{max})$) в относительных величинах.



Здесь следует указать на то, что кривая 1 построена по глубине, соответствующей линии перехода от серповидной трещины к полуэллиптической (см. рис. 4 в пределах угла $2\theta_{эф}$). Кривая 2 построена по критической глубине трещины. На диаграмме относительных предельных КИН тангенс наклона касательной к кривой является первой производной относительной величины КИН по относительной глубине усталостной трещины a . Следовательно, можно выделить бесконечно малое приращение глубины трещины da :

$$tg\alpha = \frac{d\left(\frac{K}{K_{пред}}\right)}{d\left(\frac{a}{a_{пред}}\right)} = \frac{dK}{da} \times \frac{a_{пред}}{K_{пред}} \Rightarrow da = \frac{dK}{tg\alpha} \times \frac{a_{пред}}{K_{пред}}. \quad (2)$$

Аналогичную процедуру можно провести, используя известную формулу Пэриса, в которой длину трещины l в листовом материале следует заменить на глубину a в локальной главной плоскости - плоскости задания нагрузки при изгибе цилиндрической детали:

$$\frac{da}{dN} = CK^m \Rightarrow da = CK^m dN, \quad (3)$$

где N - число циклов, C и m - постоянные, определяемые экспериментально для каждого материала.

Приравнявая (2) и (3), разделяя переменные и интегрируя, получаем формулу (4) для количества циклов при росте усталост-

ной трещины от величины a_0 , которой соответствует определенное значение КИН K_0 до максимально допустимой глубины, которой соответствует K_{max} . Здесь необходимо сделать допущение: угол касательной к предельной кривой α определяется как средняя арифметическая величина по трем точкам, соответствующим a_0 , $(a_0 + a_{max})/2$ и a_{max} , и принимается за постоянную величину в пределах интегрирования от K_0 до K_{max} .

$$CK^m dN = \frac{dK}{tg\alpha} \times \frac{a_{nped}}{K_{nped}},$$

$$dN = \frac{a_{nped}}{K_{nped} C tg\alpha} \times \frac{dK}{K^m},$$

$$\int_N dN = \frac{a_{nped}}{K_{nped} C tg\alpha} \int_{K_0}^{K_{max}} \frac{dK}{K^m},$$

$$N = \frac{a_{nped}}{K_{nped} C tg\alpha} \times \frac{(-1)}{(m-1)K^{(m-1)}} + D, \quad (4)$$

где D – постоянная интегрирования, $m \geq 2$. Нижний предел интегрирования по K соответствует первоначально зарегистрированной глубине трещины. В данном случае $K=K_{min}=K_0$. Верхний предел интегрирования соответствует:

- либо заданной максимальной глубине, при которой сохраняется безопасная работа детали. При этом $K=K_{max}$;
- либо предельной глубине усталостной трещины, при которой происходит резкий переход к разрушению детали. В этом случае $K=K_{cr}(K_{nped})$.

Постоянная интегрирования определяется, если принять $N=0$. В этом случае глубина усталостной трещины будет иметь значение a_0 , которой соответствует значение КИН K_0 и $\alpha=\alpha_0$.

$$D = \frac{a_{nped}}{K_{nped} \cdot C \cdot tg\alpha} \cdot \frac{+1}{(m-1) \cdot K_0^{(m-1)}}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), в пределах интегрирования от K_0 до K_{max} получаем:

$$N = \frac{a_{nped}}{K_{nped} C tg\alpha} \times \frac{(-1)}{(m-1) \cdot K_{безоп}^{(m-1)}} - \frac{a_{nped}}{K_{nped} C tg\alpha} \times$$

$$\times \frac{(-1)}{(m-1)K_0^{(m-1)}} + \frac{a_{nped}}{K_{nped} C tg\alpha_0} \times \frac{1}{(m-1)K_0^{(m-1)}}. \quad (6)$$

Окончательное выражение для количества циклов до достижения усталостной

трещины максимально допустимой величины имеет следующий вид [4]:

$$N = \frac{a_{nped}}{(m-1)K_{nped}C} \times$$

$$\times \left[\left(K_0^{m-1} tg\alpha_0 \right)^{-1} + \left(K_0^{m-1} tg\alpha \right)^{-1} - \left(K_{max}^{m-1} tg\alpha \right)^{-1} \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой формулу периода роста усталостной трещины (живучести), если КИН стремится к значению, соответствующему критической глубине усталостной трещины, превышение которой приводит к разрушению детали.

Для сталей m изменяется от 2 до 10 или для высокопрочных сталей до 12. Для большинства легированных сталей, как известно из [2], $m=4$. Для легких сплавов $m=3...5$.

Постоянная C для сталей изменяется в диапазоне от $1,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$ (для сталей малой и средней прочности при оценке средней скорости роста усталостной трещины) до $2,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$ (для оценки средней скорости роста трещины для всех сталей). В случае консервативной оценки максимальной скорости роста усталостной трещины для всех сталей $C = 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$, но в нашем случае это не соответствует рассматриваемым медленно растущим усталостным трещинам.

Вариации значений постоянной C можно рассчитать при различных m , если задавать переменные значения количества циклов и глубиной роста усталостной трещины, которым соответствуют определенные значения КИН. В этом случае можно построить пространственную картину номограмм, по которым, зная зарегистрированную глубину усталостной трещины, C , m и K_0 , можно всегда вычислить в первом приближении число циклов до разрушения детали.

Например, для образца из стали 45 с относительной глубиной усталостной трещиной $a_0/a_{max}=0,2$, вычислим по формуле (7), используя кривую 2, число циклов до момента достижения медленно растущей трещины критической глубины $a_{nped}=a_{cr}=3,55 \text{ мм}$, предполагая, что зарегистрированная начальная глубина трещины $a_0=0,6 \text{ мм}$. В этом случае: $K_{nped}=18,1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $a_0=0,6 \text{ мм}$; $a_I=1,2 \text{ мм}$; $K_0=9,798 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$;

$K_I = 13,521 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, $\alpha_0 = 59^\circ$, $\alpha_l = 43^\circ$. Значения постоянных величин формулы Париса для среднеуглеродистой стали при средней скорости их роста: $m=5$, $C=2,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$.

Расчет количества циклов:

$$N = \frac{0,00355}{(5-1) \cdot 18,1 \cdot 2,6 \cdot 10^{-14}} \times \left(\frac{1}{9,798^{(5-1)} \text{tg} 59^\circ} + \frac{1}{9,798^{(5-1)} \text{tg} 59^\circ} - \frac{1}{13,521^{(5-1)} \text{tg} 43^\circ} \right) = 0,28 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

Однако, рассматривая кривую 2, при увеличении глубины трещины $a > 0,6$ мм приращение КИН начинает интенсивно уменьшаться, что приводит к быстрому изменению угла α . В этом случае всю кривую 2 на рис. 6 целесообразно аппроксимировать ломаной, которая представлена на рис. 7.

На рис. 7 также указаны значения показателей степени КИН для формулы Париса, рекомендуемые для расчетов живучести. Они определены вариационным путем до получения значений числа циклов N , адекватных экспериментальным данным рассматриваемого типичного образца, представленного на рис. 1.

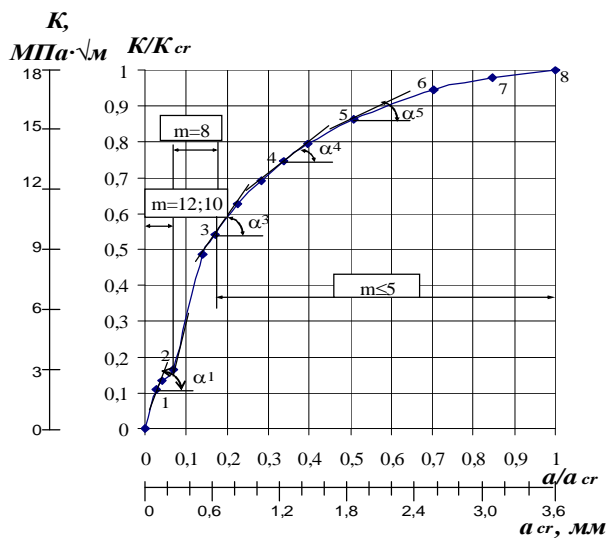


Рис. 7. Аппроксимация относительной кривой предельных КИН до критической глубины усталостной трещины

Образец, приведенный на рис. 1, выстоял 10 млн. циклов и принудительно разорван при статическом растяжении. Причем развитие усталостной трещины можно разделить на три этапа: 1 – формирование серповидной трещины как результат высокой

концентрации напряжений при высокой амплитуде симметричного цикла в случае изгиба, 2 – формирование эллиптической трещины как результат отсутствия концентрации напряжений при высокой амплитуде напряжений, 3 – магистральная усталостная трещина.

Этап 3 не привел к усталостному разрушению в силу того, что берега усталостной трещины на всех трех этапах находились в контакте. Однако на этапе 3 произошло перераспределение напряженного деформированного состояния, что позволяет распределить число циклов, приходящих на развитие 1 и 2 этапов поровну с этапом 3. Данный вопрос требует дополнительных экспериментальных исследований, но пока, в первом приближении, на реализацию 1 и 2 этапов развития усталостной трещины прием примерно 5 млн. циклов. В противном случае расчеты N для этих этапов могут быть либо менее 50 тыс. циклов, либо более 10 млн. циклов, что не соответствует действительности. Используя рис. 6, можно вычислить полное количество циклов до достижения критической глубины усталостной трещины a_{cr} , после которой происходит разрушение детали.

Учитывая приближенность методики, направленной для инженерного использования, диапазон глубины усталостной трещины от 0 до 0,1 мм, относящийся больше к микромасштабному уровню, рассматривать не будем. Расчеты по кривой, изображенной на рис. 7 показывают, что рост глубины усталостной серповидной трещины от 0,1 мм до 1,2 мм осуществляется за 3,096 млн. циклов ($m=10;8;5$, $C=2,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$). В интервале глубины трещины от 1,2 мм до 3,55 мм при $m=5;4$, $C=2,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$ количество циклов составляет либо 2,130 млн. циклов, либо 2,478 млн. циклов. Количество циклов на втором этапе зависит от промежуточных значений показателя степени m .

На рис. 8 представлен второй этап развития медленно растущей трещины в виде двух вариантов в зависимости от промежуточных значений показателя степени m .

Оптимальным считается первый вариант, так как при переходе от серповидной трещины к полуэллиптической должна на-

блюдаться смена механизма. В этом случае на реализацию первого и второго этапа требуется 5 млн. 226 тыс. циклов. После этого предполагается интенсивный рост трещины, приводящий к резкому снижению работоспособности детали и её разрушению. Величины m и C в большой степени определяются начальной глубиной усталостной трещины a_0 . При росте глубины трещины от 0,1 до 0,24 мм по кривой (см. рис. 7) принимаем $m = 10$, $C = 2,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$. В этом случае $N = 2,326$ млн. циклов. Как правило, высокое значение m при $\alpha_0 > 65^\circ$. Показатель степени m можно отнести к особенностям механических характеристик поверхностного слоя стали 45 – как слоя с высокой несущей способностью. Хотя известно, что поверхностный слой является слабонесущим по сравнению с основным в некоторых материалах. Расчет промежуточных значений чисел циклов, например, при росте трещины от 0,24 до 0,6 мм, целесообразно выполнять при $m=8$, $C = 2,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-1} \text{ МПа}^{-4}$. В этом случае $N = 0,488396$ млн. циклов. В некоторых случаях коэффициент C не является самостоятельной величиной. В работе [5] показана связь C с показателем степени m уравнением регрессии: $\lg C = am + b$.

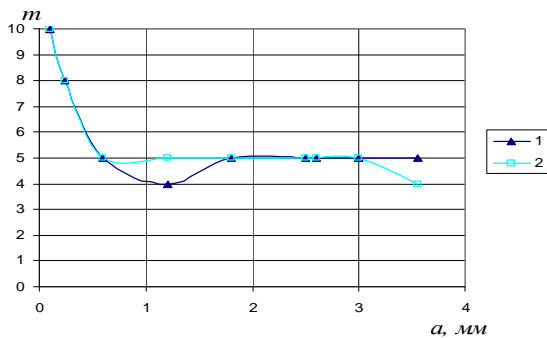


Рис. 8. Зависимость $m=f(a)$

Следовательно, исходя из выше сказанного, полный расчет периода роста усталостной трещины (живучести), при регистрации глубины усталостной трещины от 0,1 до 3,55 мм можно представить как сумму значений числа циклов на различных участках относительной кривой предельных КИН. Тогда формула живучести детали примет следующий вид [4,6]:

$$N = \sum_{i=1}^n \left[\frac{a_{nped} Z}{(m_i - 1) K_{nped} C_i} \right], \quad (8)$$

$$Z = \frac{1}{K_0^{m-1} \operatorname{tg} \alpha_0} + \frac{1}{K_0^{m-1} \operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{K_i^{m-1} \operatorname{tg} \alpha},$$

где i - текущая точка заданного интервала относительной глубины усталостной трещины.

При $i = \max$ данная точка соответствует максимальному значению заданного интервала глубины усталостной трещины. При $i = n$ данная точка соответствует критической глубине усталостной трещины a_{cr} .

В силу вышесказанного, разработана методика расчета периода роста усталостной трещины серповидной формы, которая заключается в следующем:

- По линии фронта серповидной усталостной трещины определяем изменения глубины медленно растущей усталостной трещины a .
- По формуле (1) определяем коэффициент интенсивности напряжений (КИН) – K на различных глубинах трещины.
- Строим диаграмму предельных коэффициентов интенсивности напряжений – $K=f(a)$.
- Для инженерного расчета перестраиваем диаграмму предельных КИН в относительных величинах.
- Разбиваем диаграмму относительных КИН на участки, проводим касательные к точкам участка, определяя при этом угол в градусах.
- По формуле (7) определяем период роста трещины N путем вариационных вычислений, устанавливаем функциональную связь между K и N .

По вышеприведенной методике можно также провести аналогичные расчеты для образцов из других материалов. Таким образом, на базе макроструктурного физико-математического анализа усталостных изломов деталей приближенный расчет периода роста трещины по диаграммам предельных КИН позволяет оперативно оценивать работоспособность детали с зарегистрированной глубиной усталостной трещины до момента разрушения. Это также позволяет более эффективно использовать детали с эксплуатационным дефектом и сохранять надежность машин в определенных интервалах времени.

3 Кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины.

Согласно расчетам по формуле (8), построена зависимость роста глубины усталостной трещины, соответствующей этапам 1 и 2, в зависимости от числа циклов, которая представлена на рисунке 9. На рисунке 9 можно видеть соответствие между значениями глубины a и КИН. Это позволяет получить связь между КИН и скоростью роста усталостной трещины при реализации этапов 1 и 2. Скорость роста усталостной трещины определяется прямым дифференцированием, выраженным своей геометрической интерпретацией как определение тангенса наклона касательной к кривой $tg\varphi_i$. Это позволило построить кинетическую диаграмму медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) [6], которая представлена на рисунке 10. Путем аналитической экстраполяции по первой точке, определяется K_{th} .

В нашем случае страгивание медленно растущей усталостной трещины для данного типичного образца из стали 45 начинается в окрестности $K_{th} = 1,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Точные данные, относящиеся к рисунку 7, 9, 10 представлены в табл. 1.

Анализируя рисунок 9, 10 в их соответствии с КИН, можно отметить, что в стали 45 первоначальный рост усталостной трещины от 0 до 0,1 мм происходит очень быстро. При увеличении же глубины от 0,1 мм ($K \approx 2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) до 0,6 мм ($K \approx 7,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) рост трещины происходит очень медленно (на рисунке 9 это точки 1,2,3 и их соответствия на рисунке 10, чем свидетельствует достаточно большое количество циклов – более 2 млн. Этот результат совпадает с расчетами безопасной глубины усталостной трещины, приведенными в работах [7]. Далее, от 0,6 мм до максимальной глубины серповидной трещины, равной 1,2 мм, ско-

можно сказать, также, что скорость роста эллиптической трещины существенно выше скорости роста серповидной трещины. Это свидетельствует о том, что в условиях концентрации напряжений рост усталостной трещины замедляется в силу перераспределения остаточных напряжений под острие трещины. Данное явление представляет собой концентрацию сжимающих остаточных напряжений на дне усталостной трещины,

рость роста трещины падает и в точке 5 имеет минимум.

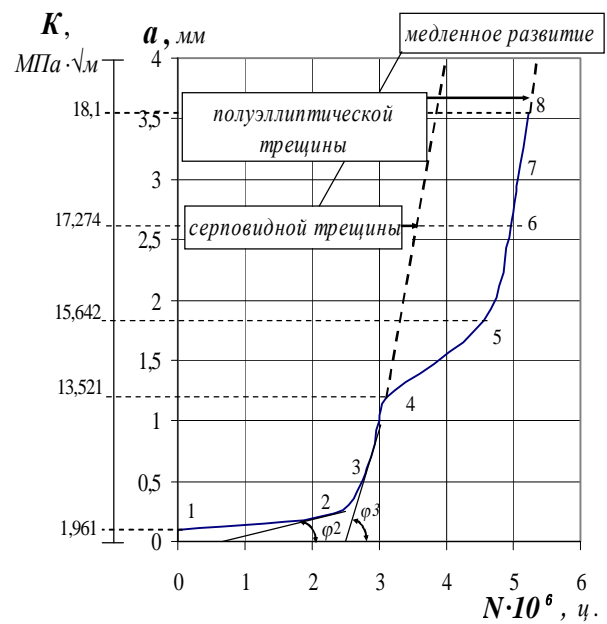


Рис. 9. Зависимость роста глубины усталостной трещины a от числа циклов N

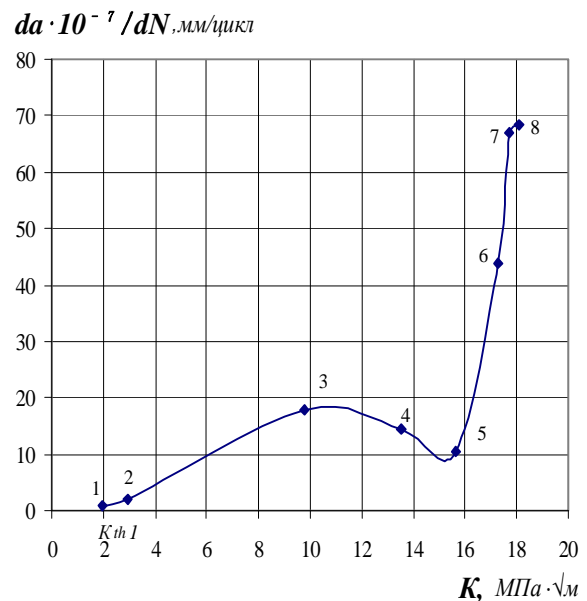


Рис. 10. Кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ)

что впервые высказано И.А. Биргером, теоретически установлено в работе [8]. Экспериментально-расчетным путем это подтверждено в работе [9].

Однако, эффект концентрации сжимающих остаточных напряжений при переходе к полуэллиптической трещине слабо влияет на процесс наступления разрушения, т.к. зона ее развития находится в пределах центрального угла, который в два раза

меньше центрального угла серповидной трещины. Кроме того, концентрация оста-

точных напряжений определяется областью низких номинальных напряжений детали.

Таблица 1 – Определение $\alpha_i, \varphi_i, N, tg\varphi_i$.

| i | $\alpha_i, \text{градус}$ | $\varphi_i, \text{град.}$ | a, мм | $N \cdot 10^6, \text{цикл}$ | $tg\varphi_i = (a/N) \cdot 10^{-7}, \text{мм/цикл}$ | $K_I, \text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ |
|---|---------------------------|---------------------------|-------|-----------------------------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 76 | 5 | 0,1 | 1,168 | 0,856 | 1,961 |
| 2 | 46 | 11 | 0,24 | 1,223 | 1,963 | 2,944 |
| 3 | 59 | 61 | 0,6 | 0,338 | 17,71 | 9,798 |
| 4 | 43 | 55 | 1,2 | 0,832 | 14,42 | 13,521 |
| 5 | 27 | 46 | 1,8 | 1,734 | 10,383 | 15,642 |
| 6 | 17 | 77 | 2,6 | 0,595 | 43,68 | 17,274 |
| 7 | 13 | 81 | 3 | 0,449 | 66,89 | 17,744 |
| 8 | 8 | 81 | 3,55 | 0,5198 | 68,3 | 18,1 |

Из рис. 10 следует, что на пологом участке кривой скорость РУТ соответствует 10^{-6} мм/цикл. Данный график выходит также на уровень скоростей 10^{-4} мм/цикл непосредственно перед разрушением детали. В этой связи на установке INSTRON 8801 совместно с Э.И. Мансыревым (СПбГПУ) были проведены испытания плоских образцов из стали 45, по результатам которых построена КДРУТ [6]. Графическое обобщение данной диаграммы совместно с КДмРУТ представлено в виде трёхмерной модели на рис. 11.

Плоскость 1 (п.1) трёхмерной модели отдельно представлена на рис. 12 [6].

Под цифрой 1 обозначена КДмРУТ для цилиндрических образцов с кольцевым полукруглым надрезом, представляющая собой полную диаграмму, часть которой приведена на рисунке 9. Сплошная линия 2 построена по численным значениям (INSTRON), а пунктирная линия – путем экстраполяции. Участок АВ кривой 1 относится к серповидной трещине, а участок ВС – к полуэллиптической.

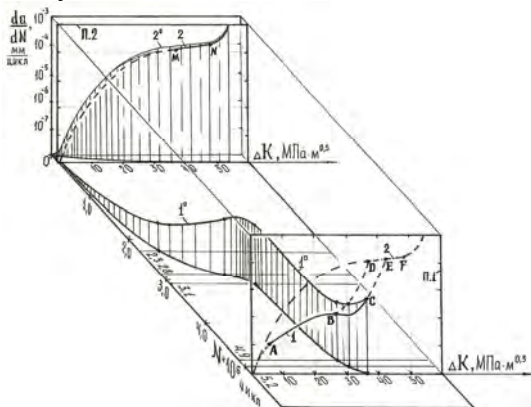


Рис. 11. Трёхмерная модель КДРУТ и КДмРУТ по совмещенной методике

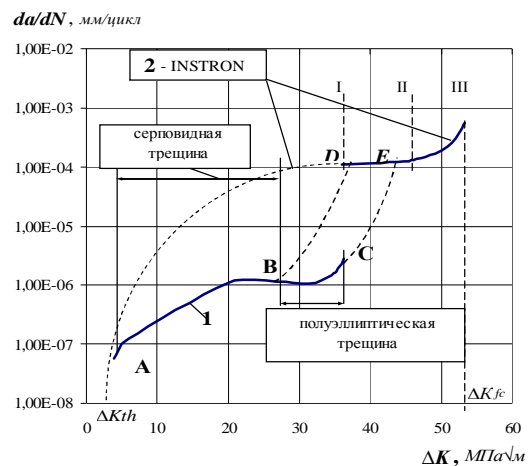


Рис. 12. Совмещенные кривые КДмРУТ (1) и КДРУТ (2)

Пунктирной линией от точки В до точки D показана кривая роста скорости трещины при повышенной амплитуде напряжений, когда разрушение детали наступает до развития полуэллиптической усталостной трещины. Свообразен и переход от серповидной к полуэллиптической трещине в точке В. То есть при развитии полуэллиптической усталостной трещины скорость ее роста резко падает по сравнению с критической глубиной серповидной трещины с одновременным повышением КИН, а затем скорость роста трещины увеличивается при малом изменении КИН до точки С, дальнейший рост показан пунктирной линией до

точки E . Обе точки D, E принадлежат Пэрисовскому участку РУТ (I-II) кривой 2 (INSTRON).

Анализируя КДмРУТ, следует обратить внимание на то, что она распределяется в пределах первого участка классической КДРУТ. Это важно потому, что данный участок КДРУТ практически не изучен. Поэтому технологические способы управления ростом усталостной трещины путем снижения её скорости представляют собой актуальную задачу современной механики разрушения.

Библиографический список

1. Кольцун, Ю.И. Кинетика усталостных трещин в поле технологических остаточных напряжений [Текст]: дис. докт. техн. наук: 01.02.04: защищена 14.02.07: утв. 9.11.07 / Кольцун Юрий Иванович.–СПб, 2007.– 373с.– 7107-5/678.

2. Пестриков, В.М. Механика разрушения твердых тел [Текст] / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов - СПб.: Профессия, 2002.- 300с.

3. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [Текст]/ П.И. Кудрявцев.-М.: Машиностроение, 1982.-174с.

4. Кольцун, Ю. И. Инженерный метод расчета периода роста усталостной трещины / Ю. И. Кольцун, Т.А. Хибник, А.Ю. Кольцун // Международная конф. RELMAS' 2008. Санкт-Петербург, Россия, 17-20 июня, 2008 – с.173-177.

5. Ярема, С.Я. О закономерностях и математических моделях развития усталостных трещин [Текст] / С.Я. Ярема// Механическая усталость металлов: сб. науч. трудов. – Киев: Наук. думка, 1983. – С.214-224.

6. Кольцун, Ю.И. Макроструктурный анализ усталостных изломов. Проблемы, достижения и перспективы [Текст] / Ю.И. Кольцун // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: сб. докл. VII Междунар. конф. по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, 23-24 апреля 2008г. – Петербургский гос. ун-т путей сообщений. – Санкт-Петербург, 2008. – С.149-182.

7. Кольцун, Ю.И. Математическое

моделирование эффективной величины нераспространяющейся усталостной трещины усталости [Текст] /Ю.И. Кольцун, Е.А. Денискина, Т.А. Хибник //Математическое моделирование и краевые задачи: сб. науч. трудов. – Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 2002.- С.87-91.

8. Иванов, С.И. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности авиационных конструкций: сб. науч. трудов. – Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1973.- № 60.- С.160-170.

9. Бродовой, В.А. Некоторые закономерности формирования остаточных напряжений в зонах концентратора и усталостной трещины при циклическом нагружении [Текст] / В.А. Бродовой, П.П. Михеев, О.И. Гуца // Автоматическая сварка. – 2001. – №2. – С.9-11.

References

1. Koltson, Yu. I. Kinetics of fatigue cracks in field technological residual stress [Article]:thesis doc. techn. sciences: 01.02.04: prot. 14.02.07: conf. 9.11.07 / Koltson, Yuriy Ivanovich– St. Petersburg, 2007– 373с.– 7107-5/678.

2. Pestrikov, V.M. Mechanics of the fracture solid body [Article] / V.M. Pestrikov, E.M. Morotsov – St. Peter.: Profession, 2002. – 300p.

3. Kudryavtsev, P.I. Non-propagating fatigue cracks [Article] / P.I. Kudryavtsev – M.: Mashinostroenie, 1982. – 174 p.

4. Koltson, Yu. I. An engineering method calculation of fatigue crack growth period / Yu. I. Koltson, T.A. Khibnick, A.Yu. Koltson // International Conference RELMAS' 2008. St. Petersburg, Russia, 17-20 June – 2008 – p.173-177. [In Russian].

5. Yarema, S.Ya. Regularities and mathematical models of developing of fatigue cracks [Article] / Yarema, S.Ya. Regularities and mathematical models of developing of fatigue cracks [Article]/ S.Ya. Yarema // Mechanical fatigue of metals: VI International Scientific Conference – Kyiv, Naukova dumka, 1983. – p. 214-224.

6. Koltoun, Yu. I. Macrostructure analysis of fatigue dog-leg. Problems, achievements and prospects [Article]/Yu. I. Koltoun //Problems to strength material and buildings on transport: VII International conference on problem of strength material and buildings on transport 23-24 apr. St. Peter univ. ways and messages. – St. Peter., 2008.– p.149-182.

7. Koltoun, Yu. I. Mathematical modeling of effective value of a non-propagating fatigue crack [Article]/ Yu. I. Koltoun, E.A. Deniskina, T.A. Khibnick // Mathematical modelling and boundary value problems: XXII Scientific and technical conference. - Samara

State Technical univercity. – Samara, 2002. – p. 87-91.

8. Ivanov, S.I. Defining additional residual stress in incisions on cylindric parts [Article]/S.I. Ivanov, M. P. Shatunov, V.F. Pavlov// Issues of Aviation Parts Strength – Kuyibyshev aviation Institute. – Kuyibyshev, 1973. - №60. – p. 160-170.

9. Brodovoi, V.A. Several regularities of residual stress formation in concentration zones and fatigue cracks at cyclic stress [Article]/V.A. Brodovoi, P.P. Miheev, O.I. Gusha // Automatic welding, 2001. – № 2. – p. 9-11.

METHODS CALCULATION OF FATIGUE CRACK GROWTH PERIOD AND HER IT'S GRAPHIC GENERALIZATION

©2009 Yu. I. Koltoun, T. A. Khibnick

Samara State Aerospace University

As a principle we have used the limiteds diagrams of stress intensity factors and the Paris formula. Given methods allows quantitative to value residual longevity of the details with developing fatigue crack (creeping) and velocity of her its growing by means of kinetic diagram.

Crescent crack, limited diagrams of stress intensity factors, growth period, kinetic diagram of a creeping fatigue crack

Информация об авторах

Кольцун Юрий Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 267-45-27. E-mail: koltoun_y.i@mail.ru. Область научных интересов: механика разрушения, механика твердого деформируемого тела, мезомеханика, синергетика.

Хибник Татьяна Алексеевна, ассистент кафедры основ конструирования машин Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 267-46-10. E-mail: tanya_hib@mail.ru. Область научных интересов: механика разрушения, механика твердого деформируемого тела, мезомеханика, синергетика.

Koltoun Yuriy Ivanovich, doctor of the technical sciences, assistant professor of the department of the strength materials of Samara state aerospace university. Phone (846) 267-45-27. E-mail: koltoun_y.i@mail.ru. Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.

Hibnik Tatiyana Alekseevna, the assistant of the department of the basis designing of Samara state aerospace university. Phone (846) 267-46-10. E-mail: tanya_hib@mail.ru. Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.