

ОБЪЁМНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕДЛЕННОГО РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ Д16Т

© 2014 Ю.И. Кольцун¹, Д.П. Молявко², А.Д. Игнатовский¹, Т.А. Хибник¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

²ОАО НПП «Салют»

На основе макроструктурного анализа типичного усталостного излома цилиндрического образца из сплава Д16 Т с кольцевым надрезом при изгибе представлена методика построения диаграммы предельных коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и определён период роста усталостной трещины. Благодаря экспериментальным данным усталостных изломов из алюминиевого сплава Д16Т, расчётным путём установлено изменение показателя степени m в формуле скорости роста усталостной трещины (РУТ) Пэриса по глубине a в системе с ростом числа циклов N многоциклового усталости. Это позволило для сплава Д16Т построить кинетическую диаграмму медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) в трёхмерной системе координат. Проанализированы и численно определены объёмы, сформированные под пространственной кривой кинетической диаграммы медленного роста усталостной трещины. Установлена новая кинетическая характеристика РУТ — объём работы коэффициента интенсивности напряжений, позволяющий связать параметры малоциклового и многоциклового усталости.

Механика разрушения, макроструктурный анализ, усталостная трещина, коэффициент интенсивности напряжений, кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины, малоциклового и многоциклового усталости, объём работы коэффициента интенсивности напряжений.

Введение

Медленный рост усталостных трещин при эксплуатации деталей транспортного и энергетического машиностроения привлекает самое пристальное внимание учёных ведущих стран мира в силу того, что существует возможность выявления таких трещин задолго до разрушения деталей с обнаруженным дефектом и проведения технологических мер по локализации дефектной области. В этой связи актуальным становится вопрос о разработке методики предварительного расчёта безопасного количества рабочих циклов машин с дефектной деталью. Под рабочим циклом машин подразумевается количество полётов самолётов и вертолётов в авиации, количество речных и морских переходов судов различного класса на водном транспорте, а в энергетике — количество циклов «пуск-остановка» энергоблоков. Данные машинные циклы подчиняются механизму разрушения в области малоциклового усталости, в то время, как работа высокоскоростных элементов силовых установок происходит в

условиях многоциклового усталости. Следовательно, неразрешимой остаётся проблема расчёта количественной взаимосвязи малоциклового усталости машин, силовых и энергетических установок и многоциклового усталости их деталей. С этой целью обязательным условием расчётов надёжности и долговечности высокоскоростных систем является знание всех возможных кинетических характеристик медленного роста усталостных трещин.

Целью настоящей работы является расчёт кинетических характеристик медленного роста усталостной трещины и их взаимосвязи в алюминиевом сплаве Д16Т.

На рис. 1 представлен принудительный излом цилиндрического образца из сплава Д16Т с мелким кольцевым надрезом с двумя серповидными усталостными трещинами l сверху и снизу после испытаний на базе 3-х миллионов циклов при частоте 19,5 Гц с пределом выносливости $\sigma_{-1} = 98$ МПа. Для решения поставленной задачи необходимо выполнить математический анализ усталостного излома с точки зрения его геометрии во взаимосвязи с

физическими параметрами образования одной из двух трещин. В сплаве Д16Т при переменном изгибе по симметричному циклу в фазе растяжения ожидается рост короткой [1] трещины по типу I. Однако, как видно из рис. 1, две симметричные серповидные трещины сформированы по типу III в пределах центрального угла, равного 90 градусам.

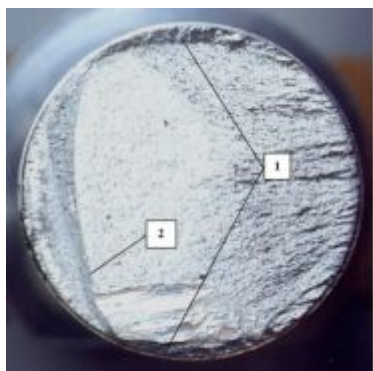


Рис. 1. Излом образца (сплав Д16Т) с медленно растущей усталостной трещиной 1, 2 – зона долома

В главных плоскостях, параллельных плоскости задания нагрузки изгиба по симметричному циклу, углы наклона двух симметричных трещин к продольной оси рассматриваемого цилиндрического образца одинаковы и составляют 45°. Данная особенность алюминиевого сплава накладывает дополнительные условия для

анализа закономерностей медленного развития усталостных трещин. В частности: антиплоский сдвиг усталостной трещины по типу III при нагружении отрывом в фазе растяжения при изгибе определяет расчёт по касательным напряжениям. В этой связи будем рассматривать одновременно параметры трещины по типу III по расчётной глубине a_τ и с соответствующей ей измеренной глубиной a_i в плоскости поперечного сечения детали, перпендикулярной продольной оси, что соответствует расчёту по нормальным напряжениям.

В табл. 1 представлены глубины a_i в случае отрыва по типу I в пределах половины центрального угла серповидной трещины, расчётные значения глубины a_τ , касательных напряжений τ_i и вычисленные значения коэффициентов интенсивности напряжений по типу I и типу III:

$$K_I = \sigma_i \cdot \sqrt{\pi \cdot a_i}, \quad (1)$$

$$K_{III} = \tau_i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a_\tau}{\cos 45^\circ}}, \quad (2)$$

$$a_\tau = \frac{a_i \cdot \sigma_i}{\cos 45^\circ}, \quad (3)$$

$$\sigma_i = \sigma_{-1} \cdot \cos \theta. \quad (4)$$

Таблица 1 - Расчёт глубины a_τ и коэффициентов интенсивности напряжений K_I и K_{III}

i	θ	a_i	a_τ	τ_i	K_I	K_{III}
1	0	1,8	2,54	41,8	6,28	3,74
2	3	1,78	2,51	41,7	6,23	3,70
3	6	1,74	2,45	42,3	6,25	3,72
4	9	1,66	2,34	41,5	6,00	3,57
5	12	1,58	2,23	42,0	5,91	3,52
6	15	1,52	2,14	41,5	5,74	3,41
7	18	1,36	1,92	41,2	5,39	3,20
8	21	1,24	1,75	40,9	5,10	3,03
9	24	1,1	1,55	40,4	4,74	2,82
10	27	0,98	1,38	40,2	4,46	2,65
11	30	0,8	1,13	39,3	3,94	2,34
12	33	0,68	0,96	38,0	3,52	2,09
13	36	0,52	0,73	37,3	3,02	1,79
14	39	0,36	0,51	37,0	2,49	1,48
15	42	0,2	0,28	36,3	1,82	1,08
16	45	0	0	34,0	0	0

Построение диаграммы предельных КИН в относительных величинах

Одним из основных показателей трещиностойкости металлического материала, таких как расчёт времени роста усталостной трещины или её периода, выраженный количеством циклов до критической глубины, является диаграмма предельных КИН по глубине трещины. Для разных опасных сечений рабочей зоны детали имеют место различные критические значения глубин медленно растущих усталостных трещин.

Как известно [2], для построения диаграммы предельных КИН по глубине усталостной трещины требуется проведение усталостных испытаний по ГОСТ 25.506-85 для образцов прямоугольного сечения различной толщины. Испытания по программе построения диаграммы предельных КИН весьма дорогостоящие. Однако, по методике [3] рекомендуется построить данную диаграмму, исходя из нескольких усталостных испытаний при изгибе по симметричному циклу цилиндрических образцов с мелким кольцевым надрезом с целью получения ярко выраженной серповидной трещины при напряжениях, равных пределу выносливости образца из конкретного материала. Мелкий кольцевой надрез необходим для того, чтобы медленно растущая усталостная трещина имела форму не полуэллиптическую, как в случае в гладкой рабочей зоне образца, т. е. без концентрации напряжений, а серповидную форму, что является результатом концентрации напряжений от наличия кольцевого надреза [4]. Наиболее оптимальной является полукруглая форма кольцевого надреза.

Для анализа берётся один из наиболее информационно ёмких типичных изломов. Изложенный выше подход позволяет использовать данные табл. 1 для построения диаграммы предельных КИН по глубине усталостной трещины.

Использовать диаграмму предельных КИН для вывода формулы периода роста усталостной трещины (долговечности) нецелесообразно, так как нельзя без

дополнительных расчётов взять обобщённую производную в виде отношения приращения КИН к приращению глубины a , используя углы наклона касательной к кривой функции в градусах. В этой связи рекомендуется перестроить диаграмму предельных КИН в относительных безразмерных величинах по осям абсцисс и ординат, 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} . Для определения количества циклов безопасной работы детали после обнаружения медленно растущей усталостной трещины необходимо построить графики зависимости $K_I(a_i)$, $K_{III}(a_\tau)$, а также безразмерные: K_I/K_{Imax} (a_i/a_{imax}) и K_{III}/K_{IIImax} (a_τ/a_{tmax}). Все четыре графика представлены на рис. 2, 3, 4, 5 с аппроксимирующим полиномом 4-ой степени с точностью аппроксимации R^2 для каждого конкретного случая.

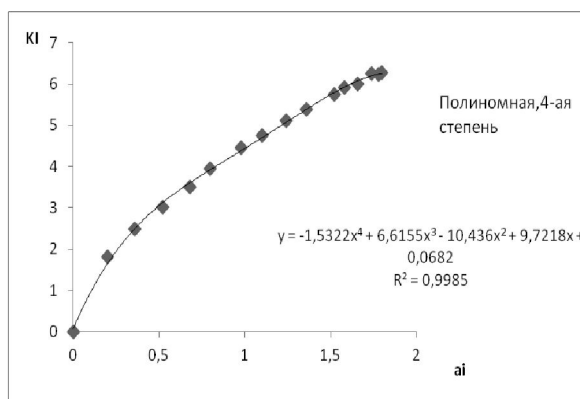


Рис.2. Зависимость K_I от глубины трещины a_i

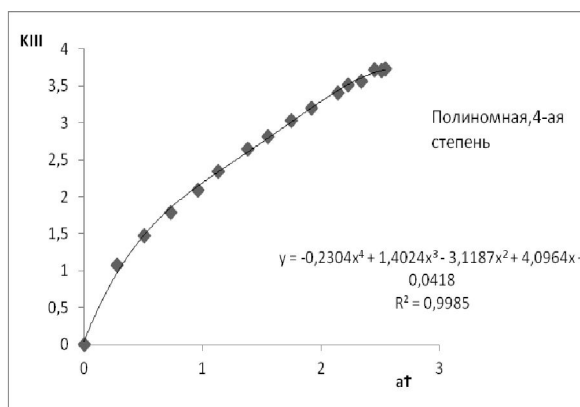


Рис.3. Зависимость K_{III} от глубины трещины a_τ

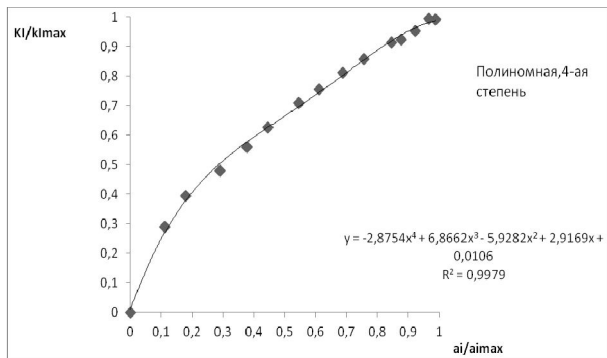


Рис.4. Зависимость KI/KImax от ai/aimax

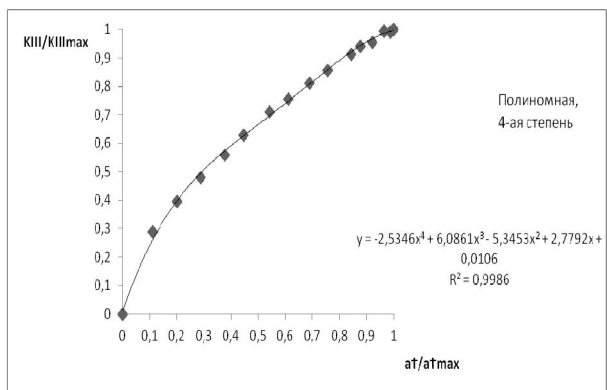


Рис.5. Зависимость KII/KIIImax от at/atmax

Таким образом, рис. 4,5 являются основополагающими при выводе формулы расчёта количества циклов многоциклового усталости до достижения усталостной трещины критической величины, что в литературе называется периодом роста усталостной трещины [1].

Определение периода роста усталостной трещины

Практическое значение диаграммы предельных КИН для различных марок металлов заключается в том, что с их помощью можно вычислить период роста усталостной трещины, т.е. вычислить количество циклов многоциклового усталости до достижения трещины критической глубины.

На рис. 6 представлена диаграмма $K/K_{max} = f(a/a_{max})$ алюминиевого сплава Д16Т в относительных величинах, для которой с помощью графика (рис. 5) были определены 5 углов между касательными и осью абсцисс.

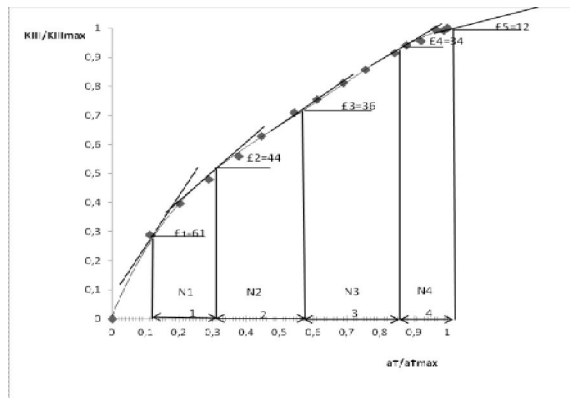


Рис. 6. Диаграмма относительных предельных КИН сплава Д16Т

Известно, что процесс усталостного разрушения материалов демонстрирует кинетическая диаграмма роста усталостной трещины (КДРУТ), для описания которой чаще всего применяют формулу Пэриса -Эрдогана:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot K^m, \tag{5}$$

где da/dN - скорость роста усталостной трещины;

C и m – параметры, определяемые экспериментально для каждого материала;

K – коэффициент интенсивности напряжений.

Выделив из формулы (5) дифференциал по глубине трещины и, приравняв его к дифференциалу глубины, выраженного тангенсом угла α , получаем после интегрирования по частям и определения постоянной интегрирования формулу для количества циклов N (на рис.6 это неизвестные $N_1...N_4$). Данная процедура представляется формулами:

$$tg\alpha = \frac{d\left(\frac{K}{K_{пред}}\right)}{d\left(\frac{a}{a_{пред}}\right)} = \frac{dK}{da} \cdot \frac{a_{пред}}{K_{пред}} \Rightarrow da = \frac{dK}{tg\alpha} \cdot \frac{a_{пред}}{K_{пред}}, \tag{6}$$

$$N = \frac{a_{пред}}{(m-1)K_{пред}C} \times \left[\frac{1}{K_0^{m-1}tg\alpha_0} + \frac{1}{K_0^{m-1}tg\alpha} - \frac{1}{K_{max}^{m-1}tg\alpha} \right]. \tag{7}$$

Оценка параметров формулы Пэриса-Эрдогана по глубине усталостной трещины a и построение кинетической диаграммы её медленного роста

Анализ формулы Пэриса-Эрдогана (5) показывает, что трудно определить составляющие её значения постоянного размерного коэффициента C и безразмерного показателя степени m , которые до недавнего времени считались константами материала. Это, естественно, приводило к недостоверным результатам. В рассматриваемом случае, благодаря разработанной методике, можно путём вариаций определить как численное значение постоянной C , так и величины m по глубине трещины.

Вариации значений постоянной C можно рассчитать при различных m , если задавать переменные значения количества циклов с глубиной роста усталостной трещины, которым соответствуют определённые значения КИН. В этом случае можно построить пространственную картину номограмм, по которым, зная зарегистрированную глубину усталостной трещины a , C , m и K_0 , можно всегда вычислить в первом приближении число циклов до разрушения детали. В дальнейшем C и m будем называть коэффициентами. В формуле (7) первоначально в качестве константы показателя степени формулы Пэриса-Эрдогана был принят коэффициент $m = 5$, а значение размерного коэффициента C изменялось в диапазоне от 5 до $24 \cdot 10^{-11}$ (МПа·м^{0,5})^{-m} × м/цикл.

Excel предоставляет возможность не только построения графиков и их аппроксимации, но и возможность вывода уравнения этой кривой с точностью коэффициента корреляции R^2 . Таким образом, взяв производную от этого уравнения, можно заменить $tg\alpha_0$, tga на соответствующие производные, и формула (7) принимает вид:

$$N = \frac{a_{пред}}{(m-1)K_{пред}C} \left[\frac{1}{K_0^{m-1}y'_{нач}} + \frac{1}{K_0^{m-1}y'_{кон}} - \frac{1}{K_{max}^{m-1}y'_{кон}} \right], \quad (8)$$

где $y'_{нач}$ -производная аппроксимирующей функции кривой в начале рассматриваемого участка диаграммы,

$y'_{кон}$ - производная аппроксимирующей функции кривой в конце рассматриваемого участка диаграммы [5].

Как видно из рис.6, график можно разделить на четыре части со своими конкретными значениями m , т.е. сумма количества циклов будет складываться из четырёх частей: N_1, N_2, N_3, N_4 . Уравнение и производная данного графика выглядят следующим образом:

$$y = -2,53 x^4 + 6,09 x^3 - 5,35 x^2 + 2,78 x + 0,01; \quad (9)$$

$$y' = -2,53 4x^3 + 6,09 3x^2 - 5,35 2x + 2,78. \quad (10)$$

Рассчитав производную для начальной и конечной точки каждого участка N , получаем:

$$N_1: y_{нач}=1,811=tg61^\circ, y_{кон}=0,967=tg44^\circ, N_2: y_{нач}=0,967=tg44^\circ, y_{кон}=0,738=tg36^\circ; N_3: y_{нач}=0,738=tg36^\circ, y_{кон}=0,673=tg34^\circ, N_4: y_{нач}=0,673=tg34^\circ, y_{кон}=0,209=tg12^\circ.$$

Подставив $y_{нач}$, $y_{кон}$, $a_{пред}$, $K_{пред}$, $m=5=const$ (в первом приближении) в формулу (8), вычислим, при каких значениях C получится сумма числа циклов $N_1+N_2+N_3+N_4=3 \cdot 10^6 \pm 3 \cdot 10^5$. При этом в первом приближении отклонение $\pm 3 \cdot 10^5$ циклов составляет $\pm 1\%$ от $3 \cdot 10^6$. Из табл. 2 видно, что при $C = 5,4 \cdot 10^{-11}$ (МПа·м^{0,5})^{-m} × м/цикл и $m = 5$ максимально приближённое к трём миллионам циклов есть $\sum N = 2,977163 \cdot 10^6$, что удовлетворяет ожиданию. Определив, что $C=5,4 \cdot 10^{-11}$ (МПа·м^{0,5})^{-m} × м /цикл=const, перейдём ко второму приближению. Используя вариации m от 3 до 8 с шагом 0,1, вычисляем промежуточные значения количества циклов N_1, N_2, N_3, N_4 и их суммарную величину $\sum N_i$. Данные вычислений представлены в табл. 3.

Таким образом, как следует из табл. 2, при $C=5,4 \cdot 10^{-11}$ (МПа·м^{0,5})^{-m} × м/цикл и $m=5$ суммарное количество циклов N примерно равно $3 \cdot 10^6$ с отклонением

0,76% в меньшую сторону, что удовлетворяет математическому ожиданию с точностью до 1%. После этого осуществляется новый вариационный поиск m при постоянном найденном значении $C = 5,4 \cdot 10^{-11}$ (МПа·м^{0,5})^{-m}×м/цикл, когда отдельные значения количества циклов N_i в сумме дадут значение базы проведённых испытаний, соответствующей 3-м миллионам циклов [5]. Итог поиска коэффи-

циентов m , соответствующих интервалам N_1, \dots, N_4 , следующий: $m_1 = 7,8$; $m_2 = 4,2$; $m_3 = 3,6$; $m_4 = 3,5$, что при $C = 5,4 \cdot 10^{-11}$ (МПа·м^{0,5})^{-m}×м/цикл в сумме даёт $N_{\Sigma} = 3\,029\,000$ циклов с отклонением 0,96%. В табл. 4 представлены относительные величины глубины усталостной трещины ($a/a_{\tau max}$), относительные величины КИН ($K_{III}/K_{III max}$), результаты расчёта скорости роста усталостной трещины da/dN .

Таблица 2 - Определение размерного коэффициента C

$C \cdot 10^{-11}$, (МПа·м ^{0,5}) ^{-m} × м/цикл	N_1	N_2	N_3	N_4	ΣN
5	2 569 000	482 600	109 800	54 120	3 215 000
5,1	2 518 000	473 100	107 600	53 060	3 152 000
5,2	2 470 000	464 000	105 600	52 040	3 092 000
5,3	2 423 000	455 300	103 600	51 060	3 033 000
5,4	2 378 000	446 800	101 700	50 110	2 977 000
5,5	2 335 000	438 700	99 810	49 200	2 923 000
5,6	2 293 000	430 900	98 030	48 320	2 871 000

Таблица 3 - Определение $N_1 \dots N_4$ при вариации m от 3 до 8

m	Формула N_1	Формула N_2	Формула N_3	Формула N_4	ΣN_i
3,0	4 638 000	2 433 000	1 217 000	893 400	9 181 000
3,1	4 451 000	2 214 000	1 063 000	765 100	8 492 000
3,2	4 276 000	2 018 000	929 900	656 400	7 880 000
3,3	4 113 000	1 842 000	815 100	564 100	7 335 000
3,4	3 961 000	1 684 000	715 600	485 500	6 846 000
3,5	3 817 000	1 541 000	629 100	418 500	6 406 000
3,6	3 683 000	1 412 000	553 800	361 100	6 009 000
4,2	3 015 000	849 600	263 300	152 300	4 280 000
4,3	2 922 000	782 600	233 200	132 300	4 070 000
...
7,7	1 233 000	59 360	4 835	1 370	1 299 000
7,8	1 207 000	55 240	4 332	1 203	1 268 000
7,9	1 182 000	51 420	3 881	1 055	1 238 000
8,0	1 157 000	47 860	3 478	926	1 209 000

График зависимости скорости медленного роста усталостной трещины da/dN от КИН (K) представляет собой кинетическую диаграмму медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ), которая изображена на рис.7, где по оси

абсцисс OX —значения КИН (K_{III}) с размерностью МПа·м^{1/2}, а по оси ординат OY — скорость усталостной трещины (da/dN) с размерностью м/цикл. График кривой описан полиномом $Y(X)$ 4-ой степени.

Таблица 4 - Значения параметров на различных участках

N , цикл	a_τ , мм	$a_\tau / a_{\tau \max}$	K_{III} , МПа $\cdot\sqrt{м}$	$K_{III} / K_{III \max}$	m	C , (МПа $\cdot м^{0,5}$) $^{-m} \times м/цикл$	da/dN , мм/цикл
1207094	0,762	0,30	1,942	0,52	7,8	$5,4 \cdot 10^{-11}$	$0,957 \cdot 10^{-8}$
2056716	1,473	0,58	2,689	0,72	4,2	$5,4 \cdot 10^{-11}$	$1,302 \cdot 10^{-8}$
2610536	2,184	0,86	3,474	0,93	3,6	$5,4 \cdot 10^{-11}$	$1,779 \cdot 10^{-8}$
3029012	2,540	1,00	3,735	1,00	3,5	$5,4 \cdot 10^{-11}$	$2,323 \cdot 10^{-8}$

По данной методике можно выполнять аналогичные расчёты периода роста усталостной трещины для образцов с концентраторами из других материалов при различных видах деформаций и типах трещин по справочнику [6].

ния, определяющую площадь под соответствующей кривой.

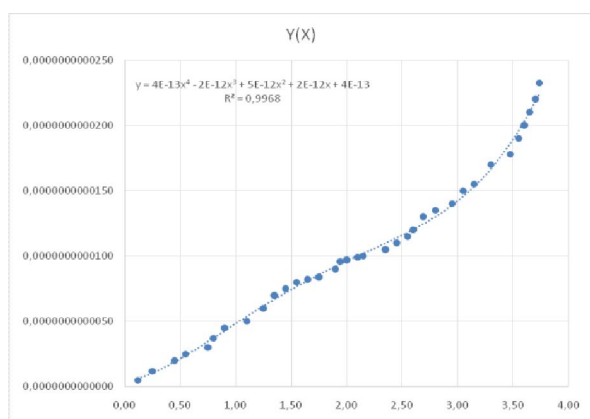


Рис. 7. КДмРУТ

Построение КДмРУТ для сплава Д16Т в трёхмерной системе координат

КДмРУТ, приведённую на рис. 7 для Д16Т, можно представить не только в виде кривой в двухмерной системе координат, но, в сопряжении с соответствующим количеством циклов N , можно представить и в виде пространственной модели, изображённой на рис. 8 [7]. Проекция пространственной кривой КДмРУТ на плоскость $Y(Z)$ изображена на рис. 9, а на рис. 7 - проекция на плоскость $Y(X)$. Из рис. 7 и 9 видно, что проекции пространственной кривой КДмРУТ на соответствующие плоскости хорошо описываются полиномами четвёртой степени. Это позволяет определить как их производные на заданных интервалах аргументов функции полинома, так и осуществить процедуру определённого интегрирования,

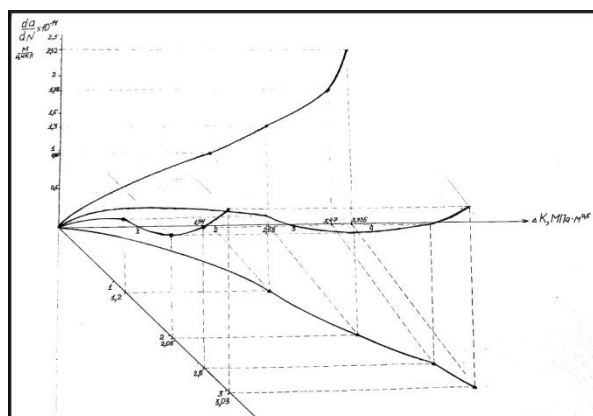


Рис. 8. Пространственная модель КДмРУТ

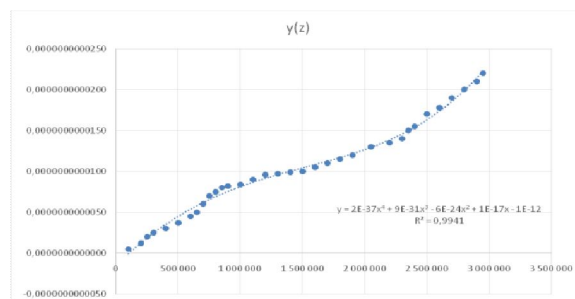


Рис. 9. Проекция на плоскость $(da/dN)/N$ пространственной кривой КДмРУТ

Анализ объёмов, образуемых с помощью пространственной кривой КДмРУТ

Рассматривая пространственную кривую КДмРУТ как граничную линию, на которой любую точку можно спроецировать на три основные плоскости, по мере роста количества циклов можно выделить три объёма, образуемых с участием этой кривой.

Все три вида объёма обладают конкретным физическим смыслом и имеют размерность, соответствующую производной коэффициента интенсивности на-

пряжений на линейный размер в метрах (миллиметрах), относящийся к длине трещины в глубине материала детали. Учитывая, что в литературе не дано определение физического смысла площади под классической кривой КДРУТ, введём новое определение. На основании анализа внешнего нагружения и внутренних процессов при развитии усталостной трещины в окрестности её устья произведение КИН на длину (глубину) трещины a предлагается назвать внутренней работой КИН. Тогда объёмы, образованные площадями во фронтальной плоскости в направлении увеличения количества циклов, т. е. вдоль третьей ортогональной оси, будут представлять собой объёмы работы КИН. Они соответствуют трём видам площадей, которые численно различны и отличаются физическим смыслом. В частности:

- объём работы КИН с прямоугольными сечениями во фронтальных плоскостях $V_{кин\ max}$ представляет собой максимальную величину, в пределах которой возможно технологическое управление процессом медленнорастущей усталостной трещины;

- объём работы КИН с треугольным сечением во фронтальных плоскостях $V_{кин\ пл}$, равный половине предельного объёма работы КИН, представляет собой численно изменяющуюся величину по мере увеличения числа циклов N , необходимую

для равномерного, прямо пропорционального, роста усталостной трещины в конкретном материале детали;

- объём работы КИН с площадью под кривой во фронтальных сечениях как интеграл от функции, описывающей КДмРУТ $V_{кин\ реал}$, представляет собой неоптимизированный, реальный объём работы КИН для конкретного металла.

Для сплава Д16Т численные значения выше обозначенных объёмов работы КИН имеют следующие значения:

- $V_{кин\ max} = 86,70$ (МПа·м^{0,5})м;

- $V_{кин\ пл} = 43,35$ (МПа·м^{0,5})м;

- $V_{кин\ реал} = 40,20$ (МПа·м^{0,5})м.

Как видно, реальный объём работы КИН для сплава Д16Т меньше значения, соответствующего прямо пропорциональному росту, что говорит о положительных перспективах, связанных с возможностью управления ростом усталостной трещины и возможности расчёта остаточной долговечности для данного материала.

Таким образом, анализируя объёмные кинетические характеристики пространственной кривой КДмРУТ для любого металла и сплава в совокупности с анализом характеристик проекций этой кривой на три плоскости трёхмерной прямоугольной системы координат, можно с высокой степенью достоверности оценить надёжность эксплуатации детали с трещиной.

Библиографический список

1. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиа конструкций. Синергетика в инженерных приложениях. Уфа: Монография, 2003. 803 с.

2. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твёрдых тел. СПб.: Профессия, 2002. 300 с.

3. Кольцун Ю.И., Хибник Т.А. Методика расчёта периода роста усталостной трещины и её графическое обобщение // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3(19), ч. 2. С. 70-79.

4. Троценко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.О. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: справочник. Ч. 2. Киев: Наукова Думка, 1994. 701 с.

5. Подлеснова Д.П. Агаповичев А.В., Игнатовский А.Д. Особенности расчёта безопасного числа циклов многоциклового усталости для алюминиевого сплава Д16Т // Тезисы докладов 63-й молодёжной научной конференции. Самара: СГАУ, 2013. С. 84-85.

6. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. Т. 1. М.: Мир. 1990. 448 с.

7. Хибник Т.А., Кольцун Ю.И. Кинетическая диаграмма медленного роста ус-

талостной трещины. Подрастание трещины // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3(27), ч. 4. С. 110-116.

Информация об авторах

Кольцун Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной подготовки, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: koltsoun_y.i@mail.ru. Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твёрдого тела, динамика и прочность машин, мезомеханика, синергетика.

Молявко Дарья Павловна, специалист отдела прочности ОАО НПП «Салют». E-mail: darenok@inbox1.ru. Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твёрдого тела.

Игнатовский Андрей Дмитриевич, студент, Самарский государствен-

ный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: dis164@mail.ru. Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твёрдого тела.

Хибник Татьяна Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tanya_hib@mail.ru. Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твёрдого тела, динамика и прочность машин, мезомеханика, синергетика.

3D-KINETIC CHARACTERISTICS OF SLOW FATIGUE CRACK GROWTH IN THE ALUMINUM ALLOY D16T

© 2014 Yu.I. Kol'tsun¹, D.P. Molyavko², A.D. Ignatovskiy¹, T.A. Khibnik¹

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²JSC Research and Production Enterprise "Salyut", Samara, Russian Federation

It is presented the technique based on macro structural analysis of a typical fatigue fracture of a cylindrical specimen of alloy D16T with an annular notch in bending of constructing the diagram of stress intensity coefficient defined the period growth of fatigue crack. Analytical calculation of the change in the exponent m in Peris' formula for calculating the speed of fatigue crack growth with respect to depth a in a system with consideration of the increase in the number of cycles N of high-cycle fatigue has be established using experimental data of fatigue fractures of the aluminum alloy D16T. This made it possible to draw the kinematic diagram of a slow fatigue crack growth of D16T in a 3-dimensional coordinate system. Analyzed and numerically determine volumes are formed with the space curve the kinetic diagram of a slow fatigue crack growth. Installed a new kinetic characteristic of fatigue crack growth; i.e. the amount of work of the stress intensity coefficient used to connect parameters of low-cycle fatigue and high-cycle fatigue.

Mechanics of fracture, macro structural analysis, fatigue crack, stress intensity coefficient, kinetic diagram of a slow fatigue crack growth, low-cycle fatigue and high-cycle fatigue, the amount of work of the stress intensity coefficient.

References

1. Shaniavski A.A. Bezopasnoe ustalostnoe razrushenie elementov aviakonstruktsii. Sinergetika v inzhenernykh prilozheniyakh [Tolerance fatigue failures of aircraft components. Synergetics in engineering applications]. Ufa: Monographiya Publ., 2003. 803 p.
2. Pestrikov V.M., Morozov E.M. Mekhanika razrusheniya tverdykh tel [Mechanics of the fracture solid body]. Saint-Petersburg: Professiya Publ., 2002. 300 p.
3. Kol'tsoun Yu.I., Khibnick T.A. Methods calculation of fatigue crack growth period and her it's graphic generalization // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2009. No. 3(19), part 2. P. 70-79. (In Russ.)
4. Troshchenko V.T., Krasovskiy A.J., Pokrovsky V.V., Sosnowsky L.A., Strizhalo V.O. Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu [The resistance of materials deformation and fracture. A Guide]. V. 2. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1994. 701 p.
5. Podlesnova D.P., Agapovichev A.V., Ignatovskiy A.D. Osobennosti rascheta bezopasnogo chisla tsiklov mnogotsiklovoi ustalosti dlya alyuminievogo splava D16T // Tezisy dokladov 63-y molodezhnoy nauchnoy konferentsii. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2013. P. 84-85. (In Russ.)
6. Murakami S. Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazhenii [Reference coefficient of intensity of stresses. V. 1]. Moscow: Mir Publ., 1990. 448 p.
7. Khibnick T.A., Kol'tsoun Yu.I. Kinetic diagram of slow fatigue crack growth. Crack growth // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 4. P. 110-116. (In Russ.)

About the authors

Kol'tsoun Yuriy Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), professor at the common engineering education department of Samara state aerospace university. E-mail: koltoun.y.i@mail.ru. Area of Research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.

Molyavko Darya Pavlovna, Specialist in the department of strength OAO "Salut". E-mail: dis164@mail.ru. Area of Research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body.

Ignatovskiy Andrey Dmitrievich, the student of faculty of aircraft engines Samara state aerospace university. E-mail: dis164@mail.ru. Area of Research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body.

Khibnik Tat'yana Alekseevna, Candidate of Science (Engineering), assistant professor of machine design department of Samara state aerospace university. E-mail: tanya_hib@mail.ru. Area of Research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.