

## КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ МЕДЛЕННОГО РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

© 2014 Ю.И. Кольцун, Д.П. Молявко, А.Д. Игнатовский, Т.А. Хибник

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

На основе макроструктурного анализа типичного усталостного излома цилиндрического образца из сплава Д16Т с кольцевым надрезом при изгибе представлена методика построения кинетической диаграммы медленного роста усталостной трещины с учётом третьей координаты – количества циклов нагружения. Кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины позволяет оценивать начало интенсивного выхода на уровень стабильного роста трещины, соответствующий  $10^{-6}$ – $10^{-4}$  мм/цикл. На данном уровне скорости технически трудно следить за развитием усталостной трещины. Поэтому начальный этап перехода от медленно растущей усталостной трещины к стабильно растущей трещине является важным технологическим показателем безопасной эксплуатации детали с трещиной. Предлагается новый критерий оценки оптимальности роста усталостной трещины на примере алюминиевого сплава Д16Т.

*Механика разрушения, макроструктурный анализ, усталостная трещина, коэффициент интенсивности напряжений, кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины, многоцикловая усталость, критерий оптимальности.*

### Введение

В авиации проблема роста усталостных трещин в высоконагруженных деталях является наиболее актуальной в силу опасности их катастрофического разрушения во время полёта самолётов и вертолётотов. В этой связи исследования в условиях многоциклового усталости алюминиевого сплава Д16Т на трещинообразование при скоростях, значительно ниже средних скоростей интенсивного роста усталостных трещин, относятся к задачам важной народнохозяйственной значимости. Однако, в эксплуатационном и технологическом планах, решение таких задач затруднительно в связи с проблемой теоретических основ оценки момента перехода безопасной медленно растущей трещины в состояние интенсивного и последующего быстрого роста.

Целью настоящей работы является создание критериальной оценки оптимальности медленного роста усталостной трещины в металлах и сплавах, основанной на описании соответствующей кинетической диаграммы полиномом четвёр-

той степени диаграммы в относительных координатах. Наиболее экономичными исследованиями являются работы, связанные с макро анализом усталостных изломов, как реальных деталей, так и лабораторных образцов.

На рис. 1 показан усталостный излом круглого поперечного сечения диаметром 25 мм с мелким кольцевым полукруглым надрезом радиуса 0,3 мм из сплава Д16Т, предварительно упрочнённым поверхностным пластическим деформированием.

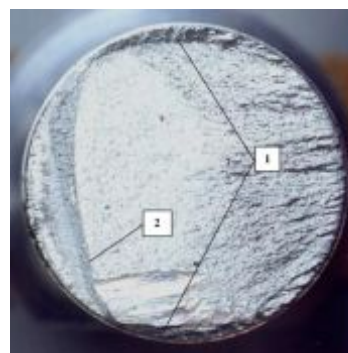


Рис.1. Излом образца из сплава Д16Т с медленно растущей усталостной трещиной:  
1, 2 – зона долома

Данный излом получен путём принудительного разрыва после испытаний при изгибе на сопротивление усталости на базе трёх миллионов циклов при частоте 19,5Гц с амплитудой внешнего нагружения, равной  $\sigma_{-1} = 98$  МПа. Из рис.1 также видно, что в условиях предельного нагружения в зоне надреза, как элемента детали, в поперечном сечении сформированы две серповидные, симметричные относительно нейтральной оси при изгибе, усталостные трещины 1. Данные трещины, расположенные в пределах центрального угла, равного  $90^\circ$ , с максимальной глубиной по сечению, равной 1,8 мм, не привели к разрушению лабораторного образца, выстоявшего заданную базу испытаний. Это свидетельствует о том, что снижение несущей способности так называемого аналога детали не произошло. Следовательно, любые медленно растущие трещины с меньшей глубиной будут являться безопасными. Однако важно знать закономерности медленного роста таких трещин, так как, вопреки ожиданию образования трещины по типу I нормального отрыва, в данном сплаве выросла усталостная трещина по типу III антиплоского сдвига. Данный факт усложняет понимание механизма развития медленно растущих усталостных трещин после критической глубины которых происходит их устойчивый рост до разрушения деталей.

### Анализ кинетической диаграммы медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) сплава Д16Т

В работе [1] разработана методика построения кинетической диаграммы медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) в трёхмерной системе координат для сталей и металлических сплавов, на базе которой построена КДмРУТ для алюминиевого сплава Д16Т.

На рис. 2 изображена КДмРУТ в трёхмерной системе координат для сплава Д16Т, на которой приведены проекции пространственной кривой на фронтальную, переднюю или, можно сказать, лицевую плоскость, профильную - боковую

плоскость и на нижнюю плоскость - вид сверху. Основной проекцией является фронтальная, так как именно она в двухмерной системе координат представляет собой КДмРУТ.

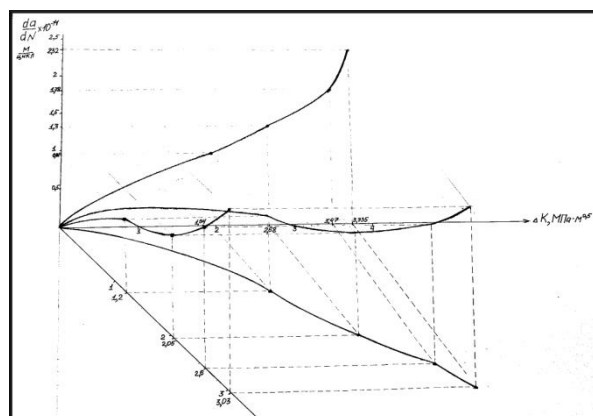


Рис.2. Пространственная модель КДмРУТ

На рис. 3 представлена КДмРУТ в виде проекции на фронтальную плоскость, которая описана многочленом четвертой степени, полученным в среде EXCEL в виде функции  $Y(X)$  (1), в которой по оси  $OX$  — значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) -  $K$ , а по оси  $OY$  — скорость усталостной трещины  $da/dN$ . Можно видеть, что для сплава Д16Т КДмРУТ является гладкой кривой с выпуклостью вниз.

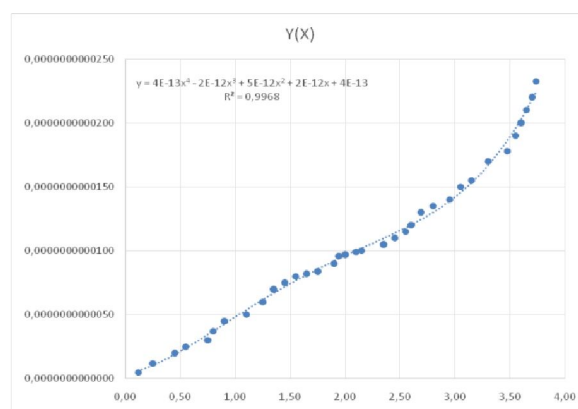


Рис.3. КДмРУТ на фронтальной плоскости  $Y(X)$

При этом касательная к кривой под углом  $45^\circ$  представляет собой геометрический смысл первой производной функции, когда  $Y'(X) = 1$ , что является границей перехода от скорости медленного

роста трещины с малой интенсивностью роста к изменению скорости роста трещины с высокой интенсивностью.

$$Y(X) = +4 \cdot 10^{-13} \cdot X^4 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot X^3 + 5 \cdot 10^{-12} \cdot X^2 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot X + 4 \cdot 10^{-13}, \quad (1)$$

где  $X = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} = K$  — коэффициент интенсивности напряжений (КИН),

$$Y = da/dN.$$

В этом случае первая производная от функции (1) имеет вид:

$$Y'(X) = +16 \cdot 10^{-13} \cdot X^3 - 6 \cdot 10^{-12} \cdot X^2 + 10^{-11} \cdot X - 2 \cdot 10^{-12}. \quad (2)$$

Следует заметить, что если график на рис.3 преобразовать в относительных координатах от 0 до 1 путём деления текущих значений на максимальные, как по оси  $OX$ , так и по оси  $OY$ , то получим область обобщённых кривых, на которых также имеются значения аргументов, при которых первая производная их функций равна единице. Это позволяет создать обобщённые кривые в относительных координатах, которые представлены на рис. 4.

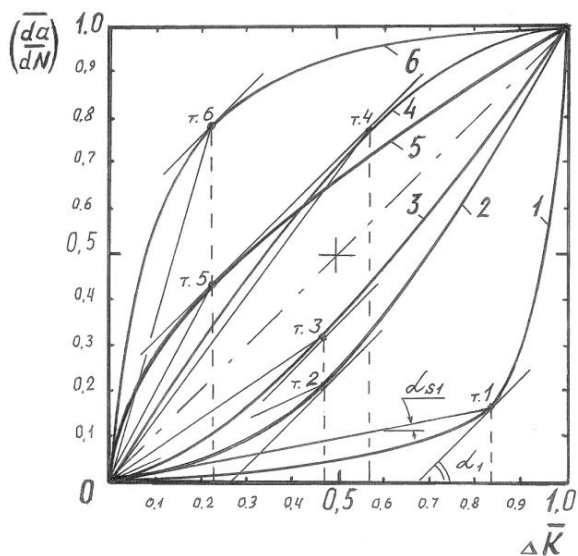


Рис.4. Обобщённые кривые КДМРУТ в безразмерных осях:  $\bar{K} = K / K_{\max}$ ;

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = \frac{da/dN}{(da/dN)_{\max}}$$

### Анализ обобщённых КДМРУТ в безразмерных координатах

Анализ шести графиков на рис.4 и данных табл. 1 свидетельствует о том, что

кривые 1, 2, 3, расположенные ниже главной диагонали единичного квадрата, представляют собой менее интенсивный медленный рост усталостной трещины, а выше (кривые 4, 5, 6) — более интенсивный медленный рост усталостной трещины.

Видно, что точка 1 на одноимённой кривой имеет координату по оси абсцисс, соответствующую значению  $\bar{K} = 0,84$  при отношении  $(\alpha_s / \alpha) = 0,27$ .

Это говорит о том, что кривая 1 описывает наиболее замедленный рост усталостной трещины, причём переход к более интенсивному росту трещины справа от точки 1 можно экстраполировать до уровня скоростей  $10^{-6} - 10^{-4}$  мм/цикл, когда наступит переход на прямую, описываемую формулой Пэриса-Эрдогана [2]. Таким образом, график 1, по сравнению с графиком 6, обладает большей перспективой технологического контроля над медленным ростом усталостной трещины, в период которого можно использовать различные существующие способы остановки её развития.

Практический анализ обобщённых графиков КДМРУТ на рис. 4 показал предпочтительную область медленно растущих усталостных трещин ниже главной диагонали единичного обобщённого квадрата при выполнении системы из двух условий:

1.  $Y'(0,5 < K / K_{\max} < 1,0) = 1,$
2.  $(\alpha_s / \alpha) = 1 \pm 0,5.$

Система определяет критериальную оценку безопасности медленного роста усталостной трещины в детали.

Для медленно растущих усталостных трещин с более интенсивным ростом скорости, т. е. когда график КДМРУТ в безразмерных координатах находится выше главной диагонали, критериальная оценка определяется значением координаты аргумента, который должен находиться в диапазоне  $0 < K / K_{\max} < 0,5$ . В этом случае, после скачка роста усталостной трещины при её страгивании, скорость даль-

нейшего роста уменьшается, причём текущие значения производной также уменьшаются, но в условиях выполнения неравенства:  $\overline{Y}'(0 < K / K_{\max} < 0,5) < 1$ .

Из рис. 3 можно видеть, что КДмРУТ имеют три варианта характерных кривых графика:

1 - кривая с диапазоном точки касания  $0,5 < K / K_{\max} < 1,0$ , когда первая производная

безразмерной функции  $\overline{Y}'(0 < K / K_{\max} < 0,5) = 1$ ;

2 - кривая с диапазоном точки касания  $K / K_{\max} = 0,5$ , когда первая производная безразмерной функции  $\overline{Y}'(0 < K / K_{\max} < 0,5) = 1$ ;

3 - кривая с диапазоном точки касания  $0 < K / K_{\max} < 0,5$ , когда первая производная безразмерной функции  $\overline{Y}'(0 < K / K_{\max} < 0,5) = 1$ .

Таблица 1 - Значения секущих углов  $\alpha_s$  и относительных КИН ( $\overline{K}$ )

$i$	1	2	3	4	5	6
$\alpha_s$	12°	24°	34°	54°	62°	74°
$\alpha$	45°	45°	45°	45°	45°	45°
$\overline{K}$	0,84	0,47	0,47	0,57	0,22	0,22
$(\alpha_s / \alpha)$	0,27	0,53	0,75	1,20	1,38	1,64

При эксплуатации транспортных средств, у которых обнаружена деталь с медленно растущей усталостной трещиной, неизвестно, в какой момент времени произошло её страгивание. Поэтому желательно, чтобы трещина развивалась менее интенсивно до момента разрушения детали. Это требование выделяет первую характерную кривую КДмРУТ, как наиболее приемлемую с точки зрения дальнейшей диагностики роста трещины. Следует также отметить, что для кривых 4, 5, 6 с выпуклостью вверх, когда диапазон координаты абсцисс находится в пределах  $0 < K / K_{\max} < 0,2$ , чем ниже точка значения функции  $(da/dN)/(da/dN)_{\max}$ , в данном диапазоне аргумента, тем большая глубина медленного роста.

### Выводы

1. Согласно предложенному критерию, момент перехода от усталостной трещины с малой интенсивностью медленного роста к высокой интенсивности определяется в безразмерных координатах единичного квадрата в точке на КДмРУТ,

в которой первая производная от функции, описывающей данную диаграмму, равна 1,0.

2. Наиболее целесообразной диаграммой медленного роста усталостной трещиной является обобщённая диаграмма выпуклостью вниз при значении координаты по оси абсцисс в интервале от 0,5 до 1,0, когда значение первой производной функции, описывающей эту диаграмму, равно 1,0.

3. Для безразмерного аргумента по оси абсцисс точки перехода от менее интенсивного медленного роста усталостной трещины к более интенсивному росту отношение  $\alpha_s$  к  $\alpha = 45^\circ$ , должно находиться в интервале  $1 \pm 0,5$ .

Таким образом, разработанная критериальная оценка КДмРУТ позволяет, заблаговременно выявив медленно растущую усталостную трещину, оценить во времени перспективу её выхода на уровень скоростей устойчивого роста трещины и предпринять меры по сохранению работоспособности детали с трещиной.

### Библиографический список

1. Кольцун Ю.И., Хибник Т.А. Методика расчёта периода роста усталостной трещины и её графическое обобщение // Вестник Самарского гос. аэрокосмического университета. 2009. № 3(19), ч. 2. С. 70-79.
2. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твёрдых тел. СПб.: Профессия, 2002. 300 с.

### Информация об авторах

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

**Молявко Дарья Павловна**, аспирант кафедры общепрофессиональной подготовки, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [darenok@inbox1.ru](mailto:darenok@inbox1.ru). Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твёрдого тела.

**Игнатовский Андрей Дмитриевич**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [dis164@mail.ru](mailto: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](mailto:tanya_hib@mail.ru). Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твёрдого тела, динамика и прочность машин, мезомеханика, синергетика.

## CRITERION OF OPTIMIZATION OF SLOW FATIGUE CRACK GROWTH IN METALS AND ALLOYS

© 2014 Yu.I. Kol'tsun, D.P. Molyavko, A.D. Ignatovskiy, T.A. Khibnik

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Based on macro structural analysis of a typical fatigue fracture of a cylindrical specimen of alloy D16T with an annular notch in bending is shown the technique of constructing the kinetic diagram of slow growth of fatigue cracks in the light of the third coordinate - the number of cycles. It is shown the quantification of growth up cracks in the projection plane: of quantity of cycles - the speed of the crack. A kinematic diagram of slow growth of a fatigue crack gives the possibility to assess the beginning of intensive increase to a stable crack growth of  $10^{-6} - 10^{-4}$  mm/cycle. It is technically difficult to monitor fatigue crack growth at this level of growth rate. This is why the beginning stage of the transition from a slow-growing fatigue crack to a stably growing crack is an important technological safety parameter in the operation of parts with cracks. This work proposes a new criterion of assessing the optimality of slow fatigue crack growth on the example of the aluminum alloy D16T.

*Mechanics of fracture, macro structural analysis, fatigue crack, stress intensity coefficient, kinetic diagram of a slow fatigue crack growth, high-cycle fatigue, criterion of optimality.*

### References

1. 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.)
2. Pestrikov V.M., Morozov E.M. *Mekhanika razrusheniya tverdykh tel* [Mechanics of the solid body fracture]. Saint Petersburg: Professiya Publ., 2002. 300 p.

### 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: [koltsoun\\_y.i@mail.ru](mailto:koltsoun_y.i@mail.ru). Area of Research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.

**Molyavko Darya Pavlovna**, Post-graduate student of the department at the common engineering education Samara State Aerospace University. E-mail: [dis164@mail.ru](mailto:dis164@mail.ru). Area of Research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body.

**Ignatovskiy Andrey Dmitrievich**, the student of Samara state aerospace university. E-mail: [dis164@mail.ru](mailto: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](mailto:tanya_hib@mail.ru). Area of Research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.