

## **КИНЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА МЕДЛЕННОГО РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ. ПОДРАСТАНИЕ ТРЕЩИНЫ**

©2011 Т. А. Хибник, Ю. И. Кольцун

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

На основе макроструктурного анализа типичного усталостного излома цилиндрического образца из стали 45 с кольцевым полукруглым надрезом при изгибе представлена методика построения кинетической диаграммы медленного роста усталостной трещины с учетом третьей координаты – количества циклов нагружения. Показана количественная оценка подрастания трещины в плоскости проекции: количество циклов нагружения – скорость трещины.

*Многоцикловая усталость, концентрация напряжений, излом, усталостная трещина, макроструктурный анализ, коэффициент интенсивности напряжений, период скорости роста, кинетика, диаграмма, циклы нагружения, подрастание трещины.*

В середине двадцатого века Россия лидировала в области исследования макроструктуры усталостных изломов высоконагруженных деталей в процессе их эксплуатации. А.М.Зайцев [1] впервые обратил внимание на закономерности строения усталостных изломов и разработал основные положения макроструктурного анализа. Однако дороговизна усталостных испытаний, развитие теории дислокаций, накопления повреждений, а также создание новых микроскопов, позволяющих оценивать закономерности разрушения на мезоскопическом и наномасштабных уровнях, определили направления дальнейших исследований по пути поиска локальной зоны зарождения усталостной трещины и её тщательного микроструктурного анализа, а также многомодельного анализа упругопластического состояния материалов [2,3,4].

Усталостные испытания, как правило, направлены на определение механических свойств и вязкости разрушения материалов, а также предела выносливости по разрушению. Исследования закономерностей развития рельефа разрушения не проводились в силу отсутствия видения перспективы дальнейшего использования накопленной информации, постоянно пополняющейся все большим многообразием изломов. Это послужило появлению статистики по длительному развитию усталостных трещин в деталях машин и их неожиданному разрушению,

что в настоящее время определяет необходимость перехода к проектированию деталей по принципу безопасного повреждения (damage tolerance) [5]. Но данную цель по сей день не удается реализовать по причине отсутствия систематизации и схематизации закономерностей усталостных разрушений.

Как известно, макрорельеф усталостного разрушения металлических материалов отчетливо свидетельствует о местном перераспределении напряженного и деформированного состояния в условиях пластических деформаций на линии фронта трещины. Это позволяет уточнять расчетную схему детали при оценке её прочности и давать рекомендации для её проектирования. Более того, знание механизма зарождения трещин под поверхностью детали позволит прогнозировать зоны возможного зарождения усталостных трещин и создать устройства по локализации очага будущего разрушения. Существенным результатом для практики также является методика расчета периода медленного роста усталостной трещины, когда при регистрации определенной глубины трещины в материале можно рассчитать количество циклов до разрушения детали [6,7]. Именно эта методика позволяет построить пространственную кинетическую диаграмму медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) как характеристику энергетических процессов в материале, происходящих при скоростях роста усталостной трещины в

диапазоне от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  мм/цикл. Кроме этого, на всех этапах медленного роста усталостной трещины количественно можно определить её подрастание. Все это определяет надежность машин, особенно в условиях остаточного ресурса, и закладывает основы к переходу проектирования деталей по принципу их безопасного повреждения.

На рис. 1 представлен усталостный излом типичного цилиндрического образца диаметром  $D = 25$  мм с полукруглым кольцевым надрезом радиусом  $R = 1$  мм, нанесенным на предварительно обкатанную роликом, т.е. упрочненную поверхность, с усилием 100Н. Образец выстоял  $10^7$  циклов при изгибе по симметричному циклу с частотой 19,5Гц и был статически разрушен на разрывной машине. На фотографии излома отчетливо видна симметричная медленно растущая усталостная трещина 1 серповидной формы как результат предельной амплитуды и высокой концентрации напряжений [8], и, со стороны свободного выхода элементов фреттинга в фазе растяжения, полуэллиптическая трещина как результат предельной амплитуды и отсутствия влияния концентрации напряжений от конструктивного надреза.

Анализируя эти трещины, была построена диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) по глубине развития первой и второй усталостных трещин с учетом того, что на первоначальном этапе серповидная трещина имеет комбинированный вид, а именно: сначала тип III, затем тип I.

На рис. 2 представлена диаграмма предельных КИН при переходе из зоны концентрации напряжений в элементе детали к материалу, в силу того, что полуэллиптическая трещина развивается только при отсутствии концентрации напряжений, т.е. как в гладких образцах [8]. Диаграмма имеет характерный участок АВ, полученный при уменьшении коэффициента интенсивности напряжений  $K_{III}$ , как результат перехода от трещины по типу III к трещине по типу I, при этом точка В является точкой бифуркационного перехода при смене типа трещины.

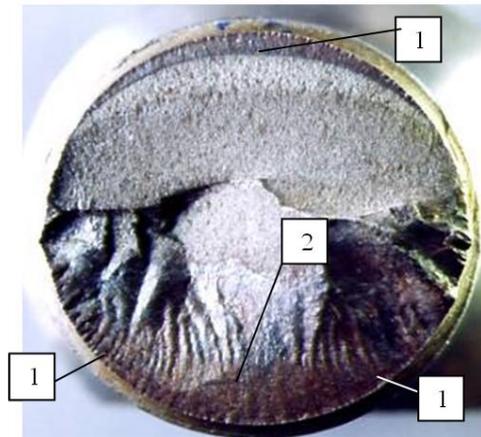


Рис.1. Излом образца из стали 45 с усталостными трещинами: 1 – серповидная трещина; 2 – полуэллиптическая трещина

Анализируя эти трещины, была построена диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) по глубине развития первой и второй усталостных трещин с учетом того, что на первоначальном этапе серповидная трещина имеет комбинированный вид, а именно: сначала тип III, затем тип I.

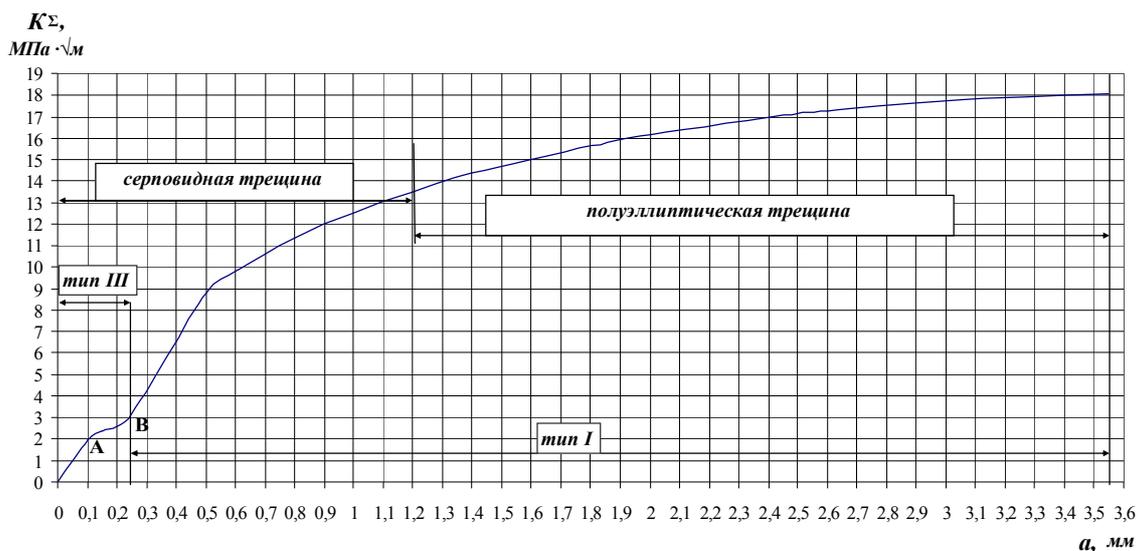


Рис. 2. Диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений

Преобразованная диаграмма КИН в относительных величинах (рис.3) позволяет использовать дифференциальное отношение

$dK/da$  как тангенс наклона касательной к кривой диаграммы в системе с известной формулой Пэриса для скорости роста уста-

лостной трещины  $\frac{da}{dN} = C \cdot K^m$ . Выделив в обоих равенствах дифференциалы глубины  $da$  и приравняв их друг другу, получаем соотношение, интегрирование которого по частям позволяет выделить формулу (1) для числа циклов  $N_p$ . Выражение (1) представляет собой формулу расчета периода роста усталостной трещины [6,7] в диапазоне от её страгивания до критической глубины:

$$N_p = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{a_{пред}}{(m_i - 1)K_{пред} \cdot C_i} \cdot \left[ \left( K_0^{m-1} \cdot tg\alpha_0 \right)^{-1} + \left( K_0^{m-1} \cdot tg\alpha \right)^{-1} - \left( K_i^{m-1} \cdot tg\alpha \right)^{-1} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $i$  - текущая точка заданного интервала относительной глубины усталостной трещины после регистрации трещины;  $K_0, K_{пред}$  - начальное значение КИН, соответствующее зарегистрированной глубине трещины, и критическое значение КИН соответственно;

$C, m$  - постоянные формулы Пэриса.

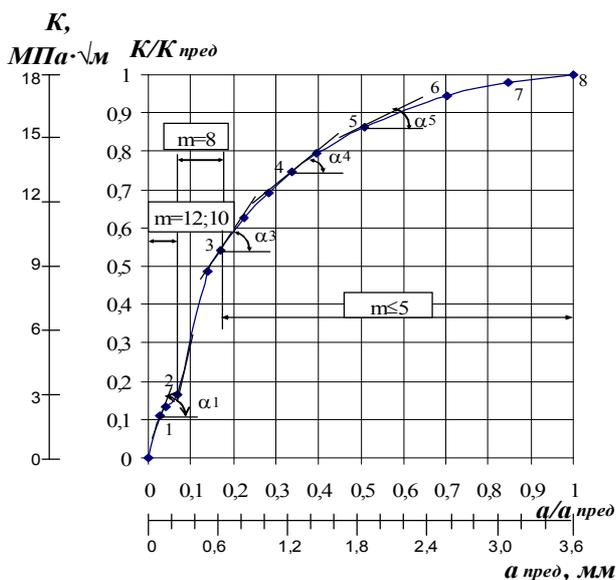


Рис. 3. Диаграмма предельных КИН в относительных величинах

Здесь следует иметь в виду допущение, что коэффициент  $C$  в формуле Пэриса является постоянной величиной для определенного класса материалов, а показатель степени  $m$  изменяется по мере увеличения глубины усталостной трещины. Формула (1) позволяет рассчитывать остаточное количество циклов нагружения, начиная с глубины трещины, которая выявляется в период текущего профилактического контроля детали неразрушающими методами, до критической

глубины, характеризующейся последующим резким снижением несущей способности этой детали.

Методика построения КДмРУТ основана на том, что известна количественная связь на определенных глубинах усталостной трещины между коэффициентом интенсивности напряжений  $K_I$ , или размахом КИН  $\Delta K_I$ , определяемого по формуле (2), количеством циклов нагружения  $N$  и скоростью медленного роста усталостной трещины  $da/dN$ :

$$\Delta K_I = (1 - R) K_I, \quad (2)$$

где  $R = -1$  - коэффициент асимметрии для симметричного цикла.

Данная связь при использовании формулы (1) позволяет построить в трехмерной системе координат  $(\Delta K_I, da/dN, N)$  пространственную кривую  $1^0$  (рис.4), проекция которой на плоскость  $\Pi_1(\Delta K_I, da/dN)$  представляет собой КДмРУТ - 1 (рис. 5), а проекция на плоскость  $(da/dN, N)$  - график функции медленного подрастания усталостной трещины (рис.6).

Для сравнения с расчетной пространственной кривой КДмРУТ -  $1^0$  на рис. 4 приведена экспериментальная кинетическая диаграмма роста усталостной трещины (КДРУТ - 2), полученная в результате испытаний компактных образцов с прямым надрезом из стали 45 без поверхностного упрочнения с опасным сечением квадратной формы 25x25мм по типу III ГОСТ 25.506 - 85 на установке INSTRON 8801 в научной лаборатории кафедры сопротивления материалов СПбГПУ. Испытания проводились при внецентренном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0,1$  и частотой нагружения 19,5Гц. Рассматривая на плоскости  $\Pi_1$  функциональную кривую 2 (КДРУТ) (рис.5), можно видеть, что экстраполяция проекции функциональной кривой 1 медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) от точки В, т.е. от границы перехода серповидной трещины к полуэллиптической, приходится на начальный участок Пэрисовской прямой (точка D). Экстраполяция кривой 1 от точки С, т.е. от границы перехода полуэллиптической трещины к магистральной, приходится на середину Пэрисовского участка КДРУТ (точка Е). Это прежде всего свидетельствует об удовлетворительной точности расчетного метода построения КДмРУТ, а следовательно, о его возможности использования на практике.

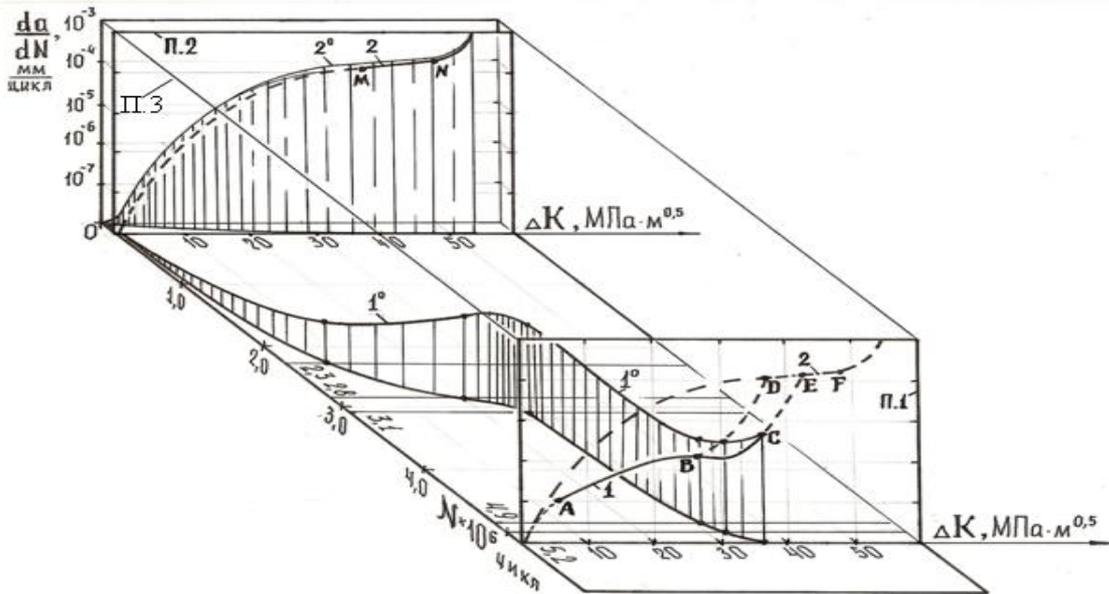


Рис. 4. Пространственная кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины (КДМРУТ): 1<sup>0</sup>, 1 – КДМРУТ; 2<sup>0</sup>, 2 – КДРУТ

Анализируя переход серповидной усталостной трещины к полуэллиптической (рис. 5) на уровне скорости  $10^{-6}$  мм/цикл, можно видеть замедление роста трещины на границе в окрестности точки В, а затем нарастание интенсивности роста полуэллиптической трещины. Очевидно, что условия роста серповидной трещины, минуя образование полуэллиптической, определяются амплитудой напряжений, превышающей предел выносливости детали. Следовательно, открываются возможности для дополнительного анализа пространственной КДМРУТ на различных уровнях амплитуд напряжений. Здесь следует обратить внимание на объем, ограниченный пространственной кривой и проекционными прямыми на горизонтальную ( $\Delta K_I, N$ ) и вертикальную ( $da/dN, N$ ) плоскости. При напряжениях, превышающих предел выносливости материала, интересующий нас объем будет формироваться путем увеличения скорости роста усталостной трещины. Причем кривая КДМРУТ будет быстро стремиться к кривой КДРУТ, с сохранением критической величины КИН  $K_{fc}$ , а при уменьшении амплитуды напряжений относительно предела выносливости данный объем будет формироваться малыми значениями скорости медленного роста трещины и большими значе-

ниями числа циклов, стремящихся к области сверхмногоциклового усталости (СМнЦУ).

Вопрос о равновеликости этих объемов остается открытым, т.к. при амплитудах напряжений меньше предела выносливости по разрушению изменяется механизм зарождения усталостной трещины, т.е. зарождение трещины переходит под поверхность и её рост осуществляется в направлениях к поверхности детали.

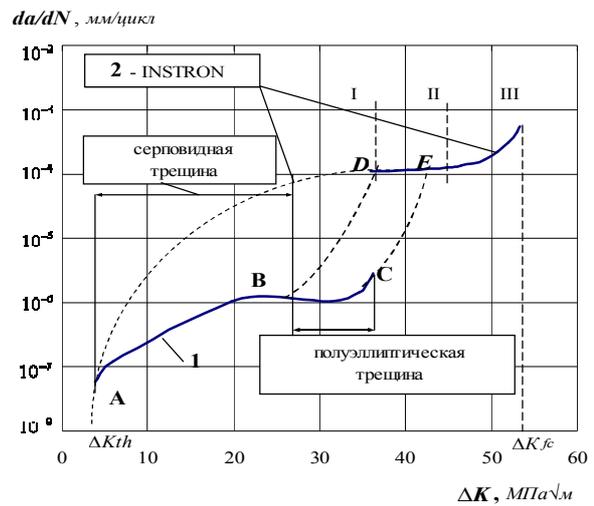


Рис. 5. Проекция пространственных КДМРУТ – 1 и КДРУТ – 2 на уровневую плоскость П1, соответствующую  $5,2 \cdot 10^6$  циклам нагружения

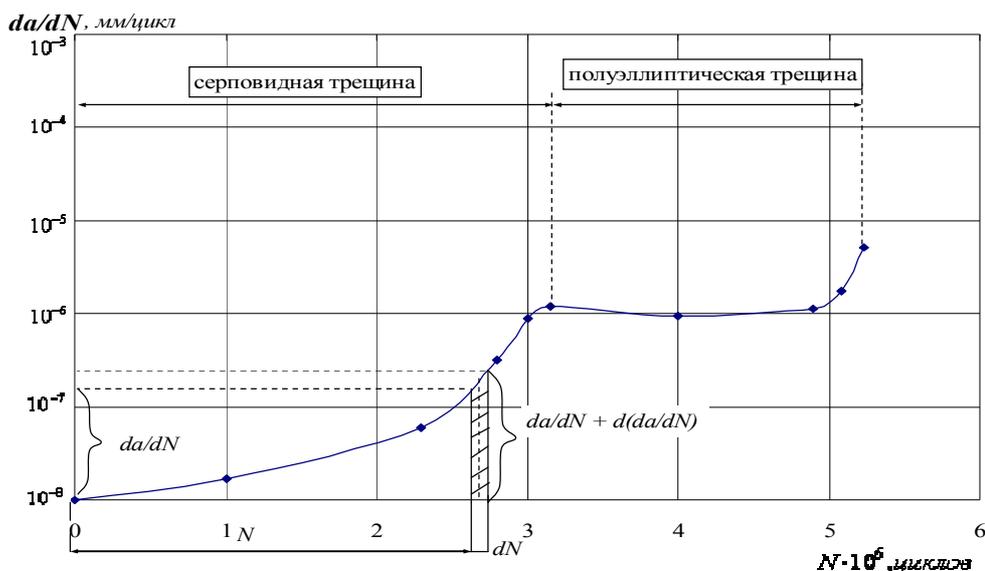


Рис.6. Диаграмма подрастания усталостной трещины

В то же время при уменьшении амплитуды напряжений до предела выносливости по трещинообразованию детали и ниже рассматриваемый объем будет отсутствовать, т.е. равен нулю.

Физический смысл данного объема трудно с чем-либо сопоставить, тем не менее он представляет собой произведение размерностей  $\Delta K_I$ ,  $da/dN$ ,  $N$ . Однако, если рассмотреть один цикл нагружения, то получаем произведение размаха КИН на элементарную глубину трещины, т.е.  $\Delta K_I \cdot da$ . Это произведение можно сравнить с работой силы на определенном пути. Но не следует забывать, что КИН – это есть мера пропорциональности между местными напряжениями в окрестности устья трещины и номинальными напряжениями вдали от трещины на полу бесконечности. Если допустить, что КИН обладает свойствами самостоятельного физического параметра, как, например, эквивалент той же силе, то это приводит к возможности оценки работы КИН, совершаемой при подрастании трещины. Процесс суммирования таких работ по количеству циклов  $N$  определяет объем работы КИН. Данный объем работы КИН неразрывно связан с диссипативной энергией, приходящейся на формирование двух берегов усталостной трещины при её медленном росте, что связано со свойством материала сопротивляться циклическому нагружению. В свою очередь, это свойство материала описывается кинетическими диаграм-

мами усталостного разрушения, т.е. КДРУТ и КДМРУТ. Становится очевидным, что переход одной формы усталостной трещины к другой определяется не просто изменением концентрации напряжений в окрестности линии фронта, но ещё энергетическими свойствами металла и его структурой.

Если на плоскости проекций П1 (рис.5) рассмотреть площадь, ограниченную кривыми 1 и 2, то возникает вопрос: увеличение этой площади приводит к увеличению ресурса детали с повреждением в виде медленно растущей усталостной трещины или нет? Увеличение рассматриваемой площади означает увеличение участка со скоростью роста усталостной трещины, равной  $10^{-7}$  мм/цикл. При такой скорости РУТ скорость диссипации энергии очень мала и возможность зарегистрировать расхождение берегов усталостной трещины при обычном техническом осмотре без специального оборудования маловероятно. В этом случае металлический материал в зоне развития трещины обладает минимальной пластичностью, т.е. трещина будет развиваться медленно, без возможности её обнаружения практически до критической величины КИН  $K_{Ic}$ , и затем произойдет мгновенное разрушение детали.

С другой стороны, уменьшение площади между кривыми 1 и 2 определяет переход к быстрорастущей усталостной трещине на скоростях более  $10^{-6}$  мм/цикл. В этом случае

требуется уменьшать интервал между контролем детали на трещинообразование.

Таким образом, вышеизложенное свидетельствует о том, что наличие кинетических диаграмм медленного роста усталостной трещины для разных металлических материалов является очень важным фактором при разработке методик расчета остаточного ресурса деталей с медленнорастущей трещиной. Это послужит базой к переходу от проектирования по принципу безопасного ресурса (safe-life) к принципу безопасного повреждения деталей (damage tolerance).

### Выводы

1. На основе макроструктурного анализа усталостного излома разработана методика расчета периода роста усталостной трещины. Это позволяет рассчитывать количество циклов до разрушения детали после обнаружения первичного дефекта в виде усталостной медленнорастущей трещины.

2. На основе расчета периода роста усталостной трещины построена пространственная кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) на примере стали 45 в координатах ( $\Delta K_I$ ,  $da/dN$ ,  $N$ ).

3. Проекция на плоскость ( $da/dN$ ,  $N$ ) в трехмерном объеме кривой медленного роста усталостной трещины позволяет численно оценить подрастание усталостной трещины на всех этапах роста серповидной и полуэллиптической трещин усталости.

4. Проекция на плоскость ( $\Delta K_I$ ,  $da/dN$ ) в трехмерном объеме кривой медленного роста усталостной трещины позволяет сравнить расчетную КДмРУТ с классической КДРУТ, полученную после испытаний на установке INSTRON 8801. Установлено, что уменьшение площади, ограниченной кривыми КДмРУТ и КДРУТ, приводит к быстрому развитию трещин, а увеличение площади – к замедлению скорости роста усталостной трещины. При этом материал ведет себя как предельно минимально пластичный. Это открывает возможности для формирования основ перехода к новому принципу проекти-

рования – к проектированию по принципу безопасного повреждения деталей.

### Библиографический список

1. Фридман, Я.Б. Строение и анализ изломов металлов [Текст] / Я.Б. Фридман, Т.А. Гордеева, А.М. Зайцев. – М.: Машиностроение, 1960. – С.128.

2. Мельников, Б.Е. Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и конструкций [Текст] / Б.Е. Мельников, А.С. Семенов, С.Г. Семенов // Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. - 2010. - Вып. № 53(337). - С. 85-92.

3. Мельников, Б.Е. Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и элементов конструкций [Текст] / Б.Е. Мельников, А.С. Семенов // Строительная механика и расчет сооружений. - 2007. - №6. - С. 63-67.

4. Мельников, Б.Е. Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и элементов конструкций [Текст] / Б.Е. Мельников, А.С. Семёнов // Научно-технические ведомости СПб.: ГПУ.- 2007.- №1 (49). - С. 86-97.

5. Gallagher, J.P. The damage tolerant design hand-book / J.P. Gallagher // Metals and Ceramics information Centre, MCIC-HV-01R, 1984.

6. Кольцун, Ю.И. Методика расчета периода роста усталостной трещины и ее графическое обобщение [Текст] / Ю.И. Кольцун, Т.А. Хибник // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – № 3. - Ч.2. – С.70-79.

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

8. Соппротивление материалов деформированию и разрушению: Справочник [Текст] / В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский [и др.] – Киев: Наукова Думка, 1994. – Ч.2. – С.701.

## KINETIC DIAGRAM OF SLOW FATIGUE CRACK GROWTH. CRACK GROWTH

©2011 T. A. Khibnick, Yu. I. Koltsoun

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Based on macro structural analysis of a typical fatigue fracture of a cylindrical specimen of steel 45 with an annular semi-circular notch in bending the technique of constructing the kinetic diagram of slow growth of fatigue cracks in the light of the third coordinate - the number of cycles. Shows the quantification of growth up cracks in the projection plane: of quantity of cycles - the speed of the crack.

*High-cycle fatigue, stress concentration, fracture, fatigue crack, analysis macro structural, stress intensity factor, speed growth period, diagram, synchronize contents stress crack.*

### Информация об авторах

**Хибник Татьяна Алексеевна**, ассистент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 267-46-10. E-mail: [tanya\\_hib@mail.ru](mailto:tanya_hib@mail.ru). Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность машин, мезомеханика, синергетика.

**Кольцун Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 267-45-27. E-mail: [koltsoun\\_y.i@mail.ru](mailto:koltsoun_y.i@mail.ru). Область научных интересов: механика разрушения, механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность машин, мезомеханика, синергетика.

**Khibnik Tatiyana Alekseevna**, the assistant of the department of the basis designing, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-10. 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.

**Koltsoun Yuriy Ivanovich**, doctor of the technical sciences, professor of the department of the strength materials, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezomechanics, synergetics.