

---

На правах рукописи

*Хибник*

Хибник Татьяна Алексеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ  
РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ДЕТАЛЕЙ  
НА БАЗЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКРОРЕЛЬЕФА ИЗЛОМОВ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» на кафедре основ конструирования машин.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Кольцун Юрий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Пономарёв Юрий Константинович  
кандидат технических наук  
Григорьев Валерий Михайлович

Ведущая организация: государственный научный центр Российской Федерации научно-производственное объединение "Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения", г. Москва

Защита состоится 28 декабря 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва (национальный исследовательский университет)» (СГАУ), по адресу: 443086, г. Самара, Московские шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 25 ноября 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного  
совета Д 212.215.02  
доктор технических наук



Головин А.Н.

2011А

25276

3

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
С.-Петербург  
03 2011 акт/012

**Актуальность темы.** В настоящее время актуальным с точки зрения экономических соображений становится вопрос, связанный с продлением ресурса деталей машин, в опасных зонах которых имеются усталостные трещины. Как показывает практика, стадия развития этих трещин весьма продолжительна и носит временной период, в который входит безопасное время эксплуатации. Возникает вопрос, каков гарантированный остаточный срок безопасной эксплуатации и возможно ли его продление после обработки конструкцией заданного ресурса? Поскольку в настоящее время проектирование деталей основано на принципе безопасного ресурса, в этой связи назрела необходимость разрабатывать методики расчёта долговечности по принципу безопасного повреждения деталей, которые допускают наличие трещин малой глубины, скорость которых относится к медленному росту, т.е. меньше  $10^{-5}$  мм/цикл. Однако, учитывая сложность и дороговизну испытаний, проводимых в области исследования трещинообразования, в настоящей работе предложен оригинальный подход, основанный на исследовании морфологии усталостных изломов.

**Цель работы** – обеспечение безопасности в процессе эксплуатации деталей с усталостными трещинами в пределах ресурса за счёт разработки методики количественной оценки кинетики медленного роста усталостных трещин на базе исследования макрорельефа усталостных изломов.

### Задачи исследования:

1. Провести сравнительный анализ усталостных изломов цилиндрических с концентратором и компактных без концентратора образцов из стали 45 с одинаковыми габаритами опасного сечения при наличии и отсутствии технологических остаточных напряжений, испытанных при различных частотах внешнего нагружения и различных методик испытаний в условиях простого и сложного нагружения для анализа макрорельефа усталостных изломов.
2. Провести анализ состояния поверхностного слоя, упрочнённого методами ШД с точки зрения обобщения эпюр остаточных напряжений.
3. Провести макроструктурный анализ рельефа и неоднородности линии фронта усталостной трещины на изломах цилиндрических и компактных образцов.
4. Разработать методику оценки роста усталостной трещины, включающая в себя: расчёт периода роста усталостной трещины, определения её скорости. Построить кинетическую диаграмму медленного роста усталостной трещины в системе координат 3D и 2D, определить критериальный параметр безопасного повреждения деталей.

**Методы исследования.** Общий методологический подход к решению задачи базируется на системном анализе морфологии усталостных изломов исследуемых образцов и деталей с остаточными напряжениями и без них. Теоретические исследования проводились на базе фундаменталь-

ных разработок в области технологии машиностроения, теории математического моделирования, механики разрушения, механики деформируемого твердого тела и волновой механики. Экспериментальные исследования проводились в научной лаборатории кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

**Достоверность** полученных результатов и правомерность принятых допущений основана на сходимости теоретических и экспериментальных данных, полученных расчетным путем по разработанной методике для ранее испытанных цилиндрических образцов и экспериментальным путем на установке INSTRON 8801 для компактных образцов. Разработанные положения макроструктурного анализа подтверждены ранее проведенным анализом микроструктуры усталостных изломов.

**Объект исследования** – процессы взаимной связи напряжений и деформаций, определяющие зарождение усталостных трещин и распространение их линии фронта, приводящей к геометрическим особенностям формирования последующего разрушения деталей.

**Предмет исследования** – геометрия макрорельефа в области усталостных изломов и их окрестности, определяемая наличием пластических деформаций на линии фронта трещины и на прилегающей к зоне разрушения поверхности цилиндрических образцов с концентратором и компактных образцов без концентратора.

#### **Научная новизна.**

1. Установлено, что для различных сталей существует определенная частота внешнего нагружения, при которой в области пластических деформаций формируются волновые деформационные процессы.

2. Предложен новый подход к оценке оптимизации режимов поверхностного пластического упрочнения с точки зрения двух механизмов зарождения усталостных трещин, выраженный в оценке эффективного коэффициента качества технологического упрочнения поверхностного слоя –  $K_{UT}$ , который можно рассматривать как критерий качества ППД, определяемый диапазоном безразмерных значений 0,3...0,7.

3. Установлена связь между теоретическим коэффициентом концентрации напряжений и геометрией усталостного излома при кручении по профилограмме контура излома.

4. Разработана методика оценки роста усталостной трещины.

5. Построена кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины (КДмРТУ) в системе координат  $\Delta K, da/dN$  (декартовой системе координат 2D) и в трёхмерной системе координат 3D с учётом числа циклов  $N$ .

**Практическая ценность.** Полученный эффективный коэффициент качества технологического упрочнения  $K_{UT}$  дает возможность разрабатывать технологические рекомендации для режимов упрочнения ППД по оптимальному распределению остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентраторами, благодаря которым обеспечивается повышение сопротивления усталости деталей машин в процессе их эксплуатации. Ис-

следование макрорельефа усталостных изломов деталей позволяет устанавливать закономерности и причины усталостного разрушения, прогнозировать остаточную долговечность деталей с трещиной в условиях простого и сложного нагружения, рассчитывать безопасную глубину медленно растущей усталостной трещины для деталей из пластичных металлов и сплавов. Разработанная инженерная методика количественной оценки кинетики медленного роста усталостной трещины позволяет оценивать остаточный ресурс деталей с трещиной путём расчёта периода роста усталостной трещины, выраженного в количестве циклов и определения её скорости в процессе эксплуатации на этапе дефектоскопического контроля детали.

**Реализация работы на практике.** Разработанная методика оценки роста усталостной трещины деталей внедрена в ЦИЛ Государственного центра безопасности полётов на воздушном транспорте, г. Москва и в инженерном центре «Экспертиза, диагностика, освидетельствование», г. Самара.

**Апробация работы.** Результаты диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях (НТК) и семинарах (НТС): XII, XIII Межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (СамГУ, Самара, 2002-2003г.г.), Международной НТК «Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения» (RELMAS 2008), (СПбГПУ, С-Пб., 2008г.), Международной НТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (СГАУ, Самара, 2009г.), Международной НТК «Первые московские чтения по проблемам прочности материалов» (Институт Кристаллографии им. А.В. Шубинкова РАН, Москва, 2009г.), НТС кафедры основ конструирования машин СГАУ (СГАУ, 2009-2011г.), НТС кафедры математического моделирования в механике СамГУ (СамГУ, 2011г.)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе: 9 статей (из которых 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК), 9 тезисов докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включает 86 рисунков, 26 таблиц. Список литературы содержит 139 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, даётся краткая характеристика работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы. Выполнен анализ научной литературы в таких областях, как механика разрушения, механика твёрдого деформируемого тела, механика остаточных напряжений, мезомеханика, синергетика, волновая механика, а также сфор-

мулированы задачи исследования. Дан анализ Российских научных школ и методов исследований в области трещинообразования Г.П. Черепанова, В.З. Партона, Н.А. Махутова, С.В. Серенсена, И.В. Кудрявцева, Н.Ф. Морозова, Е.М. Морозова, Б.Е. Мельникова, В.С. Ивановой, И.А.Биргера, С.И. Иванова, а также зарубежных учёных: А.А. Griffith, G.R. Irvin, P.C. Paris и др.

Во второй главе дан сравнительный анализ усталостных изломов упрочнённых методами ППД цилиндрических образцов ( $D=25\text{мм}$ ) с концентратором и неупрочнённых компактных образцов (размером  $25\times 25$ ) без концентратора, испытанных по различным методикам. Усталостные изломы цилиндрических образцов из стали 45 получены ранее на опытной машине МИ 11 в результате испытаний по ГОСТ 25.502-79 «Испытание металлов на многоцикловую усталость» при симметричных циклах ( $R=-1$ ) с частотой  $f=19,5$  Гц на базе  $N=3$  млн. и 10 млн. циклов в условиях простого нагружения (изгиб, кручение). Усталостные изломы компактных образцов получены в настоящей диссертационной работе на испытательной сервогидравлической системе INSTRON 8801 (Великобритания) в результате испытаний на внецентренное растяжение по асимметричному циклу с коэффициентом асимметрии  $R=0,1$ . Испытания проводились по разработанной программе на базе британского стандарта BS 7448 «Испытания на вязкость разрушения на основе механики разрушения», что соответствует ГОСТ 25.506-85, но впервые при частотах  $f$  равных 19,5; 20; 50; 70; 100 Гц для материалов (сталь 45, 30ХГСА). В результате сравнительного анализа усталостных изломов цилиндрических и компактных образцов получены геометрические характеристики рельефа - это критическая глубина усталостной трещины  $a$  и неоднородность её линии фронта в области пластических деформаций. Глубина усталостной трещины зависит от класса материала, частоты нагружения и величины внешней нагрузки, при этом на критический размер трещины не оказывает существенное влияние упрочнение поверхностного слоя, расхождение по глубине составляет 4%.

В третьей главе проведён анализ состояния поверхностного слоя, упрочнённого методами ППД, как источника двух механизмов зарождения и развития трещин: 1) с поверхности и вглубь материала, 2) из под поверхности и к поверхности. Данный анализ на примере кривых распределения осевых сжимающих остаточных напряжений (ОН) по толщине поверхностного слоя после различных видов ППД позволил выявить их основные формы: вогнутая, выпуклая, выпуклая с подповерхностным максимумом (рис.1). Предложенные обобщённые модели форм эпюр распределения ОН по толщине упрочнённого поверхностного слоя  $r=100, 200, 300, 500$  мкм и последующая их обработка с определенным средневзвешенной интегральной величины  $\bar{\sigma}_{ост}$  по формуле (1) позволили установить эффективный диапазон коэффициента качества технологического упрочнения поверхностного слоя --  $K_{\tau} = \bar{\sigma}_{ост} / \sigma_{ост}^{пов}$ .

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{ост}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ост}(\xi)$  — осевые остаточные технологические напряжения,

$\xi = \frac{y}{t} = \cos \theta$  — текущая толщина залегания осевых остаточных напряжений  $d(\xi)$ .



Рисунок 1 — Типичные эпюры осевых остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  после ПЦД сталей: 1-обработка микрошариками; 2-обкатка роликом; 3-гидродробеструйная обработка.

Значения  $K_{vt}$  находится в диапазоне от 0,3 до 0,7, которое рекомендуется использовать технологам. Оптимальное значение  $K_{vt}$  лежит в пределах от 0,65 до 0,7 и соответствует выпуклой форме остаточных напряжений (рис. 1 п.2). В случае при  $K_{vt} < 0,5$  зарождение трещины происходит с поверхности за счёт концентрации местных растягивающих нормальных напряжений в устье субмикротрещин. При  $K_{vt} > 0,7$  трещина зарождается под поверхностью, как результат резко-

го повышения сдвиговых деформаций на границе раздела упрочненного слоя и основного материала.

В четвертой главе проведён анализ макрорельефа усталостных изломов цилиндрических и компактных образцов, испытанных в условиях простого и сложного нагружения. Характерные изломы образцов, реальной детали шпильки крепления кронштейна к силовой нервюре ГТД самолёта ЯК-42 представлены на рис. 2. Впервые установлено, что усталостные трещины в изломах компактных образцов (рис.2 д,е,ж,з), имеют отличие не только по глубине, но и по геометрии (рис. 3) и неоднородности её линии фронта в области скосов пластических деформаций, в которой металл чувствителен к частоте циклического нагружения и имеет волновой характер сдвиговых деформаций (рис.4 а,б,в,г). Установленный волновой деформационный процесс в изломах компактных образцов, испытанных на различных частотах внешнего нагружения от 19,5 Гц до 100 Гц в области мало и многоциклового усталости наглядно виден в зоне скосов пластических деформаций на боковой поверхности усталостных изломов (рис. 4 п.1). Для стали 45 — это остаточный процесс в виде «застывших» бегущих волн, для сплава 30 ХГСА это уменьшение амплитуды и скорости движения волн при увеличении частоты нагружения от 20 Гц до 100 Гц. Характерный гармонический рисунок представлен в зоне пластических деформаций на линии фронта усталостной трещины в опасном поперечном сечении (рис. 4 п. 2), в зоне долома (рис. 4 п. 3).

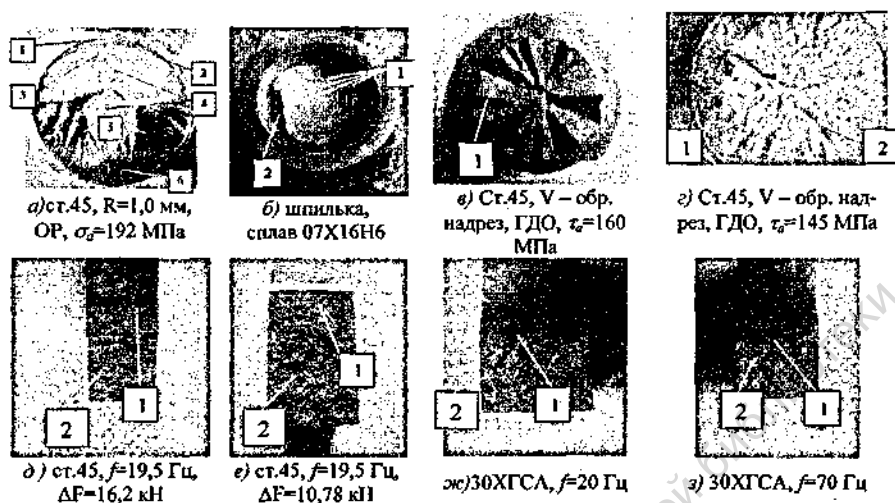


Рисунок 2 – Изломы образцов с усталостными трещинами, испытанные на МИ11 (а,в,г) с частотой  $f=19,5$  Гц, INSTRON 8801 (д,е,ж,з) с частотой  $f=19,5; 20; 70$  Гц: а) 1,2 – медленно растущая серповидная трещина комбинированного вида тип III + тип I; 3 – область охрупчивания; 4 – зона долома; 5 – магистральная трещина; 6 – медленно растущая полуэллиптическая трещина; б) деталь – шпилька: 1 – серповидная трещина; 2 – зона долома; в) 1 – радиальные сдвиговые ступени (тип III); г) 1 – кольцевая макротрещина (тип I); 2 – радиальные сдвиговые ступени (тип III); д,е,ж,з) 1 – быстро растущая усталостная трещина (тип I); 2 – зона долома

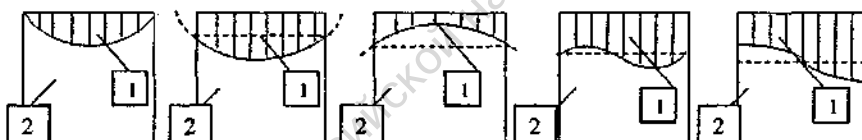


Рисунок 3 – Обобщенная геометрия линии фронта усталостной трещины (1) в углеродистых и легированных сталях при частотах внешнего нагружения от 19,5 Гц до 100 Гц в зоне долома (2)

Графоаналитическая обработка изломов цилиндрических и компактных образцов с усталостными трещинами проводилась на примере сплава АК путем анализа формы линии фронта трещины в зонах пластических деформаций в виде замеров длин волн, амплитуд и периодов остаточных деформаций с последующим описанием рельефа поверхности при помощи волновых уравнений в продольных и поперечных направлениях.

Расчёты показали, что при полученных длинах волн и амплитуд остаточных деформаций частота собственных колебаний фрактальной области (зона пластических деформаций)  $\nu$  находится в диапазоне ультразвука ( $2 \cdot 10^4 \dots 10^{10}$  Гц). Для объяснения механизма волновых процессов, как одного из предлагаемых вариантов, полученные частоты ультразвукового диапазона были приняты за частоту собственных колебаний детали и определены перемещения по направлению статического действия внешней нагрузки, исходя из аналогии с теорией изгиба балки. Расчётные значения перемещений оказались в диапазоне (от 0,1 нанометров до 0,1 микрона)



расстояний взаимодействия как атомов или группы атомов, так и кристаллов или групп кристаллов.

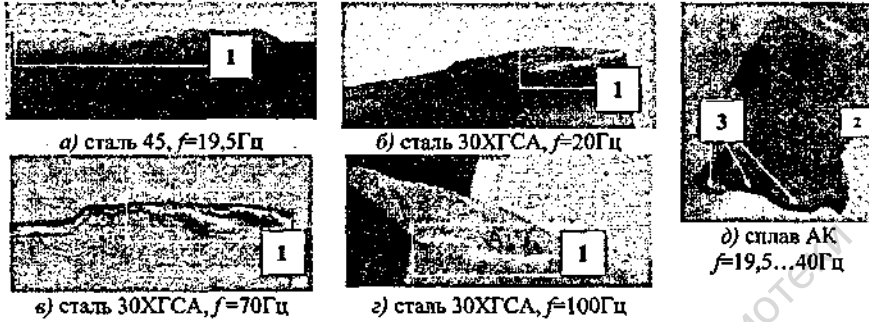


Рисунок 4 – Неоднородность линии фронта трещины в области пластических деформаций компактных образцов: 1 – область сколов пластических деформаций; 2 – область пластических деформаций на линии фронта усталостной трещины в опасном поперечном сечении; 3 – область пластических деформаций в зоне долома

Следовательно, при изменении частоты внешнего нагружения от 19,5 Гц до 100 Гц на уровне наноструктуры материала стали 45 и сплава 30ХГСА возникает усиление колебаний в локальных зонах пластических деформаций, вызывая тем самым, на макроуровне движение линии фронта усталостной трещины по гармоническому закону.

Анализ геометрии усталостных изломов, испытанных при кручении (рис.2в,г) позволил по профилограмме контура излома впервые установить связь между теоретическим коэффициентом концентрации напряжений  $\alpha_r$ , как физического параметра и геометрией поверхности разрушения.

Формула данной связи имеет вид:

$$\alpha_r - 1 = \frac{K_r - 1}{q_r} = \frac{A_{\text{плос}}}{A_{\text{конц}} - \Delta A \left( \frac{\tau_0}{\tau_{-1}} - 1 \right)} - 1, \quad (2)$$

где  $K_r$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений для детали с кольцевым надрезом V – образного профиля;

$q_r$  – коэффициент чувствительности к виду концентратора;

$A_{\text{плос}} = A_{\text{пол}} / \sin \theta$  – площадь разрушения гладкого цилиндрического образца без концентратора;

$A_{\text{конц}}$  – площадь сечения излома цилиндрического образца с конструктивным концентратором;

$\Delta A$  – часть фрагмента рельефа развернутой поверхности, равная  $A_{\text{конц}} - A_{\text{плос}}$ .

Полученная формула (2) показала, что на фрактографическую картину усталостного излома, влияет уровень амплитуды рабочих напряжений. На уровне предела выносливости и в области многоциклового усталости поверхность излома в поперечном сечении представляет собой множественные сдвиговые ступени с малой угловой податливостью (см. рис. 2г, рис. 7 п.1).

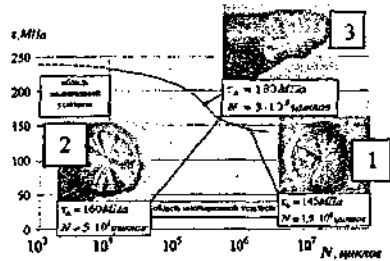


Рисунок 7 – Фрактография усталостных изломов: 1,2,3 – вид изломов

В случае, когда амплитуда рабочих напряжений превышает предел выносливости  $\tau_a > \tau_{-10}$  и величина  $N$  стремится к границе малоциклового усталости, в образцах эффект концентрации напряжений определяет наличие сдвиговых ступеней по всему поперечному сечению с большей угловой податливостью (см. рис. 2 в, рис. 7 п.2). Дальнейшее увеличение  $\tau_a$  приводит к снижению эффективности влияния концентрации

напряжений на характер излома, помимо сдвиговых ступеней появляется разрушающая поверхность приблизительно под углом  $45^\circ$  (см. рис. 7 п.3). Впервые установленная связь имеет практическую ценность, так как позволяет аналитическим путем по геометрии поверхности разрушения, в современных условиях это лазерное сканирование поверхности, определять предел выносливости по разрушению.

В пятой главе на базе макроструктурного анализа рельефа типичного усталостного излома цилиндрического образца (см. рис. 2, а), учитывая геометрические характеристики рельефа, такие как глубина усталостной трещины, берега которой в работе считаются не плоскими, а рельефными волновыми за счёт приходящейся на них энергии, разработана аналитическая методика оценки роста усталостной трещины, основанная на механике разрушения с использованием коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Образец разрушился при количестве циклов нагружения  $N_0 = 10$  млн. циклов. Методика оценки роста усталостной трещины деталей состоит из расчёта её периода и скорости. В её основу был положен анализ глубин серповидной комбинированного типа и полуэллиптической трещины  $a$  (рис. 8) при соответствующих им номинальных напряжениях с последующим определением предельных КИН –  $K_L$  на различных глубинах. Построенная диаграмма предельных КИН, изображенная на рис. 9, имеет характерный участок АВ, полученный при уменьшении коэффициента интенсивности напряжений  $K_{II}$ , 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. Преобразованная диаграмма КИН в относительные величины (см. рис. 10) позволила, используя дифференциальное отношение  $dK/da$ , как тангенс наклона касательной к кривой диаграммы и известную формулу Паррса для скорости роста усталостной трещины  $\frac{da}{dN} = C \cdot K^n$ , выделив при этом дифференциал глубины  $da$  из отношения  $dK/da$  и формулы Паррса и приравняв полученные соот-

пошения, получить путем интегрирования впервые формулу (3) периода роста усталостной трещины -  $N_p$ .

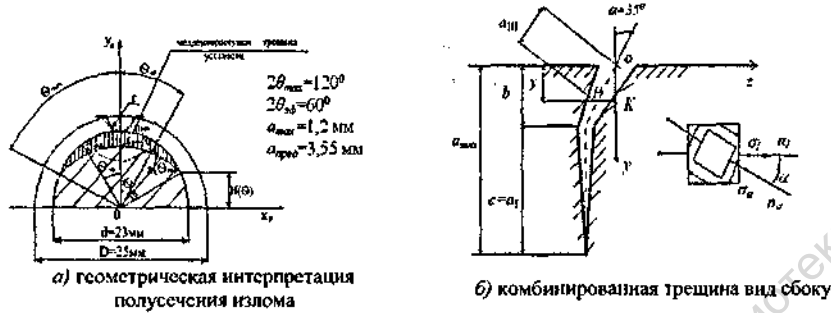


Рисунок 8 – Медленнорастущая усталостная трещина  $a$  комбинированного типа (тип III+тип I) в изломе

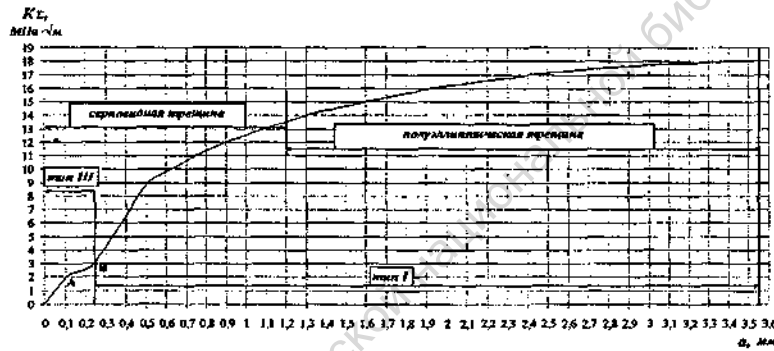


Рисунок 9 – Диаграмма предельных коэффициентов интенсивности напряжений (КИИ)

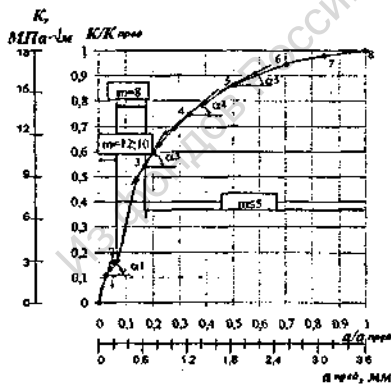


Рисунок 10 – Диаграмма относительных КИИ

Применение формулы Париса обусловлено тем, что показатель степени (коэффициент)  $m$  при КИИ изменяется при увеличении глубины усталостной трещины (см. рис. 10). Формула периода роста усталостной трещины имеет практическую ценность, так как позволяет оперативно оценивать работоспособность детали с зарегистрированной докритической глубиной усталостной трещины до момента разрушения. Погрешность методики расчёта периода роста усталостной трещины  $N_p$  составила 3%.

$$N_p = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{a_{пред}}{(m_i - 1)K_{пред} \cdot C_i} \left\{ (K_0^{m-1} \cdot \text{tg}\alpha)^{-1} + (K_0^{m-1} \cdot \text{tg}\alpha)^3 - (K_i^{m-1} \cdot \text{tg}\alpha)^{-1} \right\} \right] \quad (3)$$

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;

$a_0, a_{пред}$  - начальная (зарегистрированная) глубина усталостной трещины и соответственно предельная (критическая);

$C, m$  - постоянные формулы Париса.

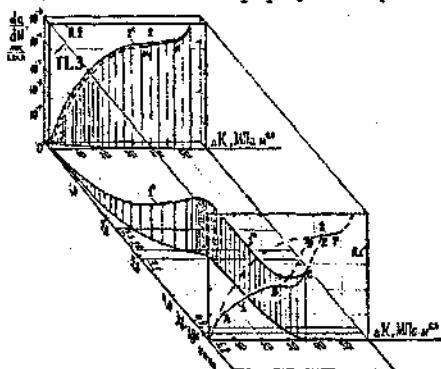


Рисунок 11 - Кинетическая диаграмма роста усталостной трещины.

1 - медленный рост трещины (КДМРУТ),  
2 - быстрый рост трещины (КДРУТ)

Приближенный расчёт периода роста усталостной трещины  $N_p$ , т.е. определение количества циклов до разрушения детали, по формуле (3) позволил оценить скорость роста усталостной трещины путём построения впервые, кинетической диаграммы медленного роста усталостной трещины (КДМРУТ) для усталостного излома цилиндрического образца. На основании связи между размахом КИН -  $\Delta K = (1-R)K_S$ , количеством циклов -  $N$  и скоростью роста трещины -  $da/dN$  данная диаграмма впервые представлена на рис.11 в трехмерном изображении, начиная со скорости роста  $10^{-7}$  мм/цикл.

Для общей оценки скорости роста усталостной трещины была приведена кинетическая диаграмма роста усталостной трещины (КДРУТ), полученная в результате испытаний компактных образцов из стали 45 при такой же частоте испытаний  $f=19,5$  Гц и определяемая началом скорости роста с  $10^{-4}$  мм/цикл, что соответствует быстрому распространению усталостной трещины. Анализ проекций кривых КДМРУТ и КДРУТ на плоскость П1 (рис. 12) показал, что скорость серповидной трещины, отмеченной участком АВ сопровождается медленным ростом, этому свидетельствует большое количество циклов - более 2 млн. Далее серповидная трещина переходит в полуэллиптическую, являющуюся результатом исчезновения эффекта концентрации напряжений от кольцевого надреза, что говорит о качественном переходе от «детали» к материалу. Имея примерно одинаковые площади усталостных трещин (серповидной и полуэллиптической), разрушение в материале (в гладкой рабочей зоне) происходит быстрее, чем в детали с концентратором, так как на формирование полуэллиптической трещины требуется меньший прирост энергии и меньшее количество циклов, чем в случае роста серповидной трещины. Проекция КДМРУТ на плоскость П3 (рис.13) позволила определить подрастание усталостной трещины при любом значении количества циклов в диапазоне, соответствующем многоциклового усталости.

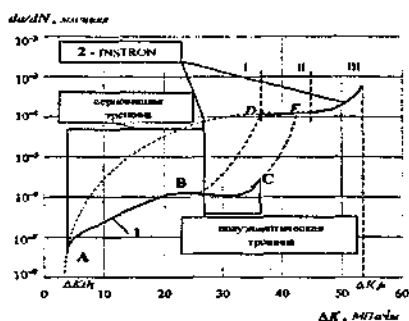


Рисунок 12 – Проекция на плоскость II.1 пространственных кривых КДмРУТ (МИ-11) – 1, КДРУТ (INSTRON) – 2

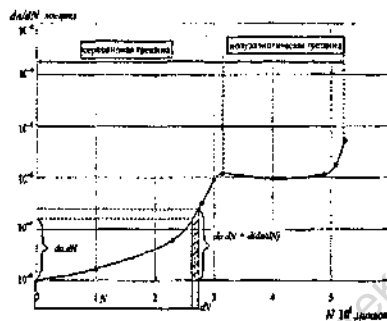


Рисунок 13 – Проекция на плоскость II.3 пространственной кривой КДмРУТ

Анализ усталостного излома с серповидной трещиной по рис. 8 позволил определить безопасную (эффективную) глубину  $a_{безоп}$  усталостной трещины (4), которую можно использовать в качестве критерия безопасного повреждения детали. Данный критерий определяет максимально допустимую эксплуатационную глубину усталостной трещины при изгибе детали до которой гарантируется безопасная работа детали в течение всего ресурса.

$$a_{безоп} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n a_{\phi}(\theta_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_{max}}{3} \left[ 1 + 2 \cdot \left( 1 - \frac{tg \theta_i}{tg \theta_{max}} \right) \right] \frac{K_d(2H(\theta_i))}{K_\sigma}, \quad (4)$$

где  $a_{\phi}$  – расчетная глубина усталостной трещины в пределах угла  $2\theta_{\phi}$ ,

$a_{max}$  – максимальная глубина усталостной трещины,

$n$  – количество измерений в пределах угла  $\theta_i$ ,

$tg \theta_i$  – отношение размаха серповидной трещины к минимальной жесткости  $H(\theta_i)$ .

Предлагаемая методика количественной оценки кинетики медленно-го роста усталостной трещины подходит к деталям круглого поперечного сечения. Это валы, балки, оси, болты, шпильки, диаметром от 20 и более из конструкционных сталей и сплавов. Она может распространяться и на детали различного поперечного сечения, так как построена на принципе перехода от детали, имеющую серповидную трещину, как результат концентрации напряжений, к материалу, как результат отсутствия концентрации напряжений, т.е. полуэллиптическую трещину. Область применения методики имеет широкий диапазон, как в авиа и судостроении, так и в общем машиностроении.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На базе сравнительного анализа усталостных изломов цилиндрических и компактных образцов, испытанных по различным методикам в условиях простого и сложного нагружения получены геометрические и си-

ловые характеристики, которые позволяют для соответствующего материала на различных диаметрах и опасных поперечных сечениях прогнозировать параметры усталостной трещины.

2. Получен эффективный коэффициент качества технологического упрочнения  $K_{VT}=0,65...0,7$ , который позволяет совершенствовать технологические режимы ПЦД, дающие соответствующие эпюры остаточных напряжений трех видов: вогнутой, выпуклой и выпуклой с подповерхностным максимумом, что влияет на механизм зарождения усталостных трещин.
3. На базе макроструктурного анализа рельефа усталостных изломов цилиндрических и компактных образцов установлены закономерности формирования макрорельефа, которые позволяют уточнить расчётную схему детали при оценке её прочности и давать рекомендации для её проектирования.
4. На базе исследования макрорельефа разработана методика оценки роста усталостной трещины деталей, которая позволяет оценивать остаточный ресурс детали с трещиной путём расчёта периода роста усталостной трещины и определения её скорости в процессе эксплуатации деталей машин. Разработанные положения методики могут заложить фундаментальную основу проектирования деталей по их безопасному повреждению. Методика внедрена в ООО Инженерном центре «Экспертиза, диагностика, освидетельствование» (г. Самара) и в ЦИЛ государственного центра «Безопасность полётов на воздушном транспорте» (г. Москва).

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ:**  
в рецензируемых журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ:

1. Хибник, Т.А. Прогнозирование предела выносливости по разрушению деталей, изготовленных методами опережающего поверхностного пластического деформирования [Текст] / В.Ф. Павлов, С.А. Бордаков, Ю.Н. Сургутанова, Т.А. Хибник, О.В. Каранаева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математические науки. – 2005. – № 34. – С.60-67.
2. Хибник, Т.А. Влияние частоты и нагрузки на волновые деформационные процессы при многоциклового усталости [Текст] / Ю.И. Кольцун, Б.Е. Мельников, Т.А. Хибник, А.А. Прохоров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета – 2009. – № 3. Ч.2. – С. 274-282.
3. Хибник, Т.А. Методика расчёта периода роста усталостной трещины и ее графическое обобщение [Текст] / Ю.И. Кольцун, Т.А. Хибник, // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.– 2009. – № 3. Ч.2. – С. 70-79

**В других изданиях:**

4. Хибник, Т.А. Математическое моделирование эффективной величины нераспространяющейся трещины усталости [Текст] / Ю.И. Кольцун, Е.А. Денискина, Т.А. Хибник // Математическое моделирование и краевые задачи: сборник научных трудов XII научно-технической конференции – Самарский государственный технический университет. – Самара, 2002. – С.87-91.
5. Хибник, Т.А. Математическая оценка критерия безопасности при эксплуатации деталей с трещинами [Текст] / Ю.И. Кольцун, Е.А. Денискина, Т.А. Хибник, // Математическое моделирование и краевые задачи: сборник научных трудов XIII научно-технической конференции – Самарский государственный технический университет. – Самара, 2003. – С.88-92.
6. Хибник, Т.А. Определение предела выносливости по образованию первой макротрещины в условиях простого и сложного нагружения [Текст] / Ю.И. Кольцун, А.А. Прохоров, Т.А. Хибник // Труды Международной научно-технической конференции – Самарский государственный аэрокосмический университет. – Самара, 2003. – С.40-42.
7. Хибник, Т.А. Прогнозирование предела выносливости по трещинообразованию на основе механики остаточных напряжений [Текст] / Т.А. Хибник // Тезисы докладов XXV Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 60-летию Победы – Межрегиональный совет по науке и технологиям. – Миасс, 2005. – С.26.
8. Khibnick, T.A. An engineering method calculation of fatigue crack growth period / Yu. I. Koltoun., T.A. Khibnick, A.Yu. Koltoun // International Conference Assessment of reliability of materials and structures: problems and solutions RELMAS'2008.–St.Petersburg, Russia, 17-20 June, 2008.– p.173-177.
9. Хибник, Т.А. Аналитическая связь физических параметров нагружения и математических параметров разрушения [Текст] / Т.А. Хибник, Ю.И. Кольцун, А.А. Прохоров // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 24-26 июня 2009г. – Самара: СГАУ, 2009. – В 2ч. Ч.1.– с.69-70.
10. Хибник, Т.А. Неоднородность фронта трещины [Текст] / Ю.И. Кольцун, Б.Е. Мельников, Т.А. Хибник // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 24-26 июня 2009г. – Самара: СГАУ, 2009. – В 2ч. Ч.1. – с.71-72.
11. Хибник, Т.А. Методика построения кинстической диаграммы медленного роста усталостной трещины [Текст] / Ю.И. Кольцун, Т.А. Хибник // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 24-26 июня 2009г. – Самара: СГАУ, 2009. – В 2ч. Ч.1. – с.205-206.

2011А - 25276  
16 25276

12. Хибник, Т.А. Чувствительность зон пластических деформаций к частоте циклического нагружения при разрушении стали [Текст] / Ю.И. Кольцун, Т.А. Хибник // Первые московские чтения по проблемам прочности материалов: тезисы докладов научно-технической конференции 1-3 декабря 2009г. – Москва: ИК РАН, 2009. – С. 102.
13. Хибник, Т.А. О высвобождающейся энергии при волновом формировании берегов усталостной трещины в стальных сплавах [Текст] / Ю.И. Кольцун, Б.Е. Мельников, Т.А. Хибник // Первые московские чтения по проблемам прочности материалов: тезисы докладов научно-технической конференции 1-3 декабря 2009г. – Москва: ИК РАН, 2009. – С. 103.
14. Хибник, Т.А. Объем работы коэффициента интенсивности напряжений в условиях мало и многоциклового усталости. Уравнения энергетического баланса МЦУ и МнЦУ [Текст] / Ю.И. Кольцун, Т.А. Хибник, А.Ю. Кольцун // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности: материалы докладов научно-технической конференции 13-15 апреля 2010г. – Санкт-Петербург, 2010г. – Ч.2. – С. 364-368.
15. Хибник, Т.А. Автогенерация колебаний ультразвукового диапазона на уровне наноструктуры стали при многоциклового усталости [Текст] / Ю.И. Кольцун, Т.А. Хибник, Н.А. Шептунова, М.А. Арестова // 50 Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности»: материалы докладов научно-технической конференции 27 сентября-1 октября 2010г. – Витебск, Беларусь, 2010г. – С. 186-189.
16. Хибник, Т.А. Связь частоты нагружения детали и волновых процессов в зонах пластических деформаций [Текст] / Т.А. Хибник, Ю.И. Кольцун // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 28-30 июня 2011г. – Самара: СГАУ, 2011. – В 2ч. Ч.1. – с.115-116.
17. Хибник, Т.А. Методика оценки остаточной долговечности детали с усталостной трещиной [Текст] / Т.А. Хибник, Ю.И. Кольцун // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции конф. 28-30 июня 2011г. – Самара: СГАУ, 2011. – В 2ч. Ч.1. – с.123-124.
18. Хибник, Т.А. Оценка качества технологического процесса поверхностного пластического деформирования по экиграмм остаточных напряжений [Текст] / Т.А. Хибник, Ю.И. Кольцун // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 28-30 июня 2011г. – Самара: СГАУ, 2011. – В 2ч. Ч.1. – с.126-127.

Подписано в печать 23.11.11.

Формат 60 x 84/16

Бумага ксероксная. Печать оперативная.

Объем – 1,0 усл. п. л. Заказ № 204. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии «Инсома-пресс»

ул. Санфировой, 110А, оф. 22А, тел. 222-92-40