

На правах рукописи



ЗАХАРОВ АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СМЕШАННЫХ  
ФОРМАХ ДВУХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

2016

Работа выполнена в ФГБУН Казанский научный центр Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

Шлянников Валерий Николаевич,  
доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:**

Шанявский Андрей Андреевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФАУ « Государственный центр «Безопасность полетов  
на воздушном транспорте», начальник отдела «Металлофизические  
исследования авиационных материалов»;

Вахрушев Александр Васильевич,  
доктор физико-математических наук,  
ФГБУН Институт механики Уральского отделения Российской  
академии наук, профессор кафедры «Нанотехнологии и  
микросистемная техника».

**Ведущая организация:**

ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита состоится «10» марта 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики сплошных сред УрО РАН и на сайте <http://www.icmm.ru>

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент



/ Зувев А.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Для многих элементов машиностроительных конструкций характерной является эксплуатация в условиях циклического двухосного напряженного состояния. Двухосное циклическое нагружение приводит к образованию трещин, плоскость расположения которых произвольно ориентирована по отношению к действующим максимальным напряжениям. В модельных представлениях поведения объектов, содержащих произвольно ориентированные трещины необходимо учитывать смешанные формы деформирования и разрушения. При решении упруго-пластических задач традиционные критерии, модели состояния и параметры механики трещин должным образом не учитывают специфику нелинейного деформирования. Влияние параметров смешанных форм деформирования реализуется через зону пластической деформации в вершине трещины, что предполагает проведение исследований в упруго-пластической постановке. Оценка и интерпретация характеристик циклической трещиностойкости при двухосном нагружении не однозначны даже при использовании экспериментальных образцов одинаковой формы в плане. Приложения результатов исследований скорости роста трещин при смешанных формах двухосного циклического деформирования к проблемам прогнозирования остаточного ресурса элементов конструкций требует адекватных моделей накопления и развития повреждений.

**Целью** диссертационной работы является разработка и обоснование упруго-пластических параметров состояния и развития трещин при смешанных формах двухосного циклического нагружения.

Цель исследования определяет следующие **задачи**:

- ввести и обосновать упруго-пластические параметры и характеристики состояния области вершины сквозной трещины при сложном напряженном состоянии;
- провести комплексную численную оценку совместного влияния вида двухосности и смешанных форм деформирования на поведение параметров упругих и упруго-пластических полей напряжений в области вершине трещины;
- разработать и обосновать конструкцию крестообразных образцов для исследования характеристик циклической трещиностойкости при двухосном нагружении;
- выполнить экспериментальные исследования влияния вида двухосного нагружения и исходного угла ориентации дефекта на характеристики циклической трещиностойкости конструкционных материалов;
- обосновать приложение развиваемых методов к задачам оценки остаточной долговечности элементов конструкций.

### **Научная новизна работы состоит в:**

- введении и обосновании обобщенного параметра сопротивления циклическому деформированию и разрушению в форме пластического коэффициента интенсивности напряжений для условий двухосного нагружения;
- установлении и описании упругих и упруго-пластических полей и параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) в полном диапазоне смешанных форм разрушения при двухосном нагружении с учетом положения сечения вдоль фронта трещины;
- разработке методики численного и экспериментального исследования количественных и качественных характеристик состояния сквозных трещин при смешанных формах двухосного циклического деформирования;
- в экспериментально установленных закономерностях, особенностях и обобщениях развития трещин при смешанных формах двухосного циклического деформирования в крестообразных образцах двух геометрий.

### **На защиту выносятся:**

- обобщенный параметр сопротивления разрушению в форме упруго-пластического коэффициента интенсивности напряжений для условий двухосного циклического нагружения;
- установленные упругие и упруго-пластические поля и параметры напряженно-деформированного состояния в полном диапазоне смешанных форм разрушения при двухосном нагружении с учетом положения сечения вдоль фронта трещины;
- метод численного исследования и интерпретации экспериментальных характеристик циклической трещиностойкости при двухосном нагружении произвольного направления;
- экспериментально установленные закономерности, особенности и обобщение развития наклонных трещин при смешанных формах двухосного циклического разрушения.

**Практическая значимость работы** состоит во введении и обосновании обобщенного параметра сопротивления деформированию и разрушению материалов и элементов конструкций. В результате выполненного исследования предоставлена возможность количественной оценки влияния смешанных форм деформирования на характеристики остаточной долговечности при сложном напряженном состоянии. Разработан и на примере диска паровой турбины реализован алгоритм оценки остаточной долговечности на основе пластического коэффициента интенсивности напряжений.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается установленными совпадениями частных численных и аналитических решений с решениями других авторов, а так же результатами экспериментальных исследований, поставленных в рамках данной работы. Численные исследования выполнялись на основе теории упругости,

деформационной теории пластичности и теории течения, метода конечных элементов, методов математического и компьютерного моделирования и программирования. Экспериментальные исследования выполнены на специализированных испытательных установках с применением высокоточных средств измерения.

**Личное участие соискателя в получении результатов**, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- разработка экспериментального оборудования и интерпретация характеристик циклической трещиностойкости при смешанных формах двухосного нагружения;
- выполнение комплекса численных расчетов упругих и упруго-пластических параметров напряженно-деформированного состояния в области вершины трещины в крестообразных образцах двух геометрий для полного диапазона смешанных форм разрушения при двухосном нагружении;
- обоснование введенных параметров упруго-пластического состояния и описание закономерностей влияния геометрии образцов, условий смешанных форм двухосного нагружения и пластических свойств материалов на исследуемые характеристики сопротивления разрушению;
- экспериментальные исследования характеристики циклической трещиностойкости при двухосном циклическом нагружении при нормальном отрыве и в условиях смешанных форм деформирования;
- обобщение экспериментальных результатов по исследованию скорости роста трещин в форме диаграммы циклической трещиностойкости для смешанных форм двухосного деформирования в нормализованных координатах;
- реализация алгоритма расчета остаточной долговечности диска паровой турбины с использованием пластического коэффициента интенсивности напряжений.

Выбор направлений исследований, разработка методов численных и экспериментальных работ, анализ результатов и подготовка публикаций осуществлялись совместно с научным руководителем.

**Реализация работы.** Результаты работы представлены в тематике научных исследований лаборатории Вычислительной и экспериментальной механики деформирования и разрушения Исследовательского центра проблем энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра Российской академии наук. Работа в течение трех лет поддерживалась грантами РФФИ № 09-08-97018-р\_поволжье\_a, РФФИ № 13-08-00813, РФФИ № 12-01-31469 мол\_a, РФФИ № 12-08-97085-р\_поволжье\_a, РФФИ № 13-08-92699 Инд\_a, РФФИ № 15-08-04556, РФФИ № 15-38-20169, РНФ 14-19-01716, ФЦП Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-

технологического комплекса России на 2007-2012 год Государственный контракт №16.516,11,6045, ФЦП Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 - 2013 год Государственный контракт №16.740.11.0432, 12. Хозяйственными договорами с ОАО «Генерирующая компания» (Набережночелнинская ТЭЦ) № Д 3/2011/314/101, (филиал Заинская ГРЭС) № Д 301/222, № Д 301-129, № Д 301/306, ОАО «ТГК-16» №1 (21-305/2011/К), ООО «Прогрестех-Сколково» №3/2011СІ-1, ООО «Прогрестех РЦ» №3/2013 СІ-3 от 07.2013.

**Апробация работы.** Результаты работы представлялись на аспирантских научных семинарах (Казань, ИЦПЭ КазНЦ РАН, 2011-2014 гг.), на итоговых научных конференциях КазНЦ РАН (Казань, 2011-2014 гг.); на VIII школе – семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (Казань, ИЦПЭ КазНЦ РАН, 2012 гг.); the 19<sup>th</sup> European Conference on Fracture (Russia, Kazan, 2012); the 13<sup>th</sup> International conference on New Trends in Fatigue and Fracture (Russia, Moscow, 2013); the 10<sup>th</sup> International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture (Japan, Kyoto, 2013); the 20<sup>th</sup> European Conference on Fracture (Norway, Trondheim, 2014); The 5th International Conference on Crack Paths (CP 2015) Ferrara, Italy, 16-18 September, 2015.

В полном объеме диссертация докладывалась в Исследовательском центре проблем энергетики КазНЦ РАН, в Институте механики сплошных сред Уро РАН, в Центре экспериментальной механики ПНИПУ, на кафедре Математического моделирования систем и процессов ПНИПУ.

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 15 печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка использованной литературы. Материал изложен на 169 страницах, содержит 76 рисунков, 6 таблиц, список литературы состоит из 142 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, дается ее общая характеристика, определяются направления исследований, устанавливаются перспективы научного и практического значения решаемой задачи.

**В первой главе** дана оценка современного состояния по предмету и направлениям исследований, рассматриваемых в диссертации.

Одно из главных направлений развития механики разрушения, обеспечивающих ее практическое приложение, состоит в анализе и расчете параметров НДС в элементах конструкций с трещиной. Становление и развитие этой дисциплины связано с именами отечественных и зарубежных ученых Д. Броека, Р.В. Гольдштейна, А.Я. Красовского, А.А. Лебедева, Н.А. Махутова, Н.Ф. Морозова, Н.И. Мухелишвили, Г.П. Никишкова, В.В. Панасюка, Г.С. Писаренко, Ю.Н. Работнова, Г.П. Черепанова, А.А.

Шаньявского, М.Л. Вильямса, М. Брауна, К. Миллера, Дж. Нотта, Дж. Райса, Дж. Си, Дж. Хатчинсона, Дж. Эфтиса и др.

В первой главе представлен обзор известных методов исследования и интерпретации характеристик циклической трещиностойкости при смешанных формах двухосного нагружения. Рассмотрены вычислительные аспекты определения параметров НДС в вершине трещины при смешанных формах двухосного нагружения.

На основе литературного анализа сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** описана разработанная методика исследования характеристик циклической трещиностойкости при смешанных формах двухосного нагружения.

Объектами исследования в диссертационной работе выступали крестообразные образцы двух геометрий: плоский крестообразный образец (рис.1а) и образец с утонением в рабочей зоне (Рис.1б).

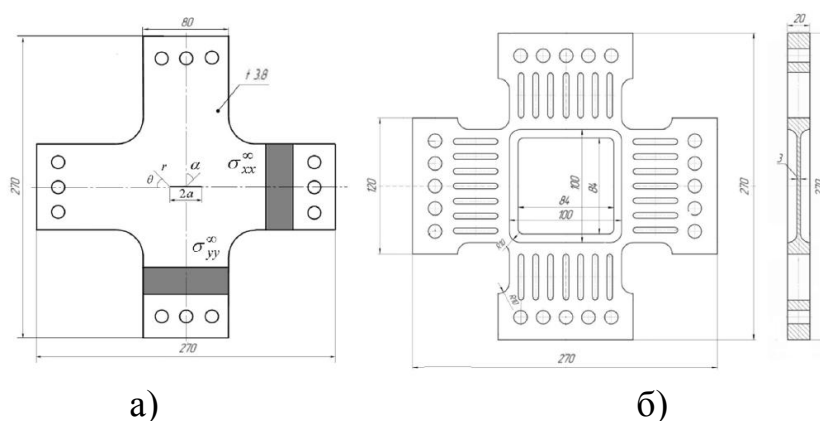


Рис.1 Крестообразные образцы для испытаний при двухосном нагружении

Посредством численных расчетов методом конечных элементов проведена оптимизация геометрии рассматриваемых конструкций образцов по параметру однородности напряженного состояния в рабочей зоне для широкого диапазона коэффициентов двухосности номинальных напряжений. В результате определены оптимальные конструкции крестообразных образцов, обеспечивающие однородность напряжений в пределах более 50% площади рабочей зоны образцов. Для крестообразных образцов рассматриваемых геометрий установлены зависимости между коэффициентом двухосности номинальных напряжений в рабочей зоне  $\eta = \sigma_{xx} / \sigma_{yy}$  и соотношением прикладываемых нагрузок к лепесткам образца  $\lambda = P_{xx} / P_{yy}$ . Полученные зависимости представлены в форме уравнений полиномиальных функций:

для плоского образца (рис.1а) -  $\eta = 0,19998\lambda^2 + 0,98885\lambda - 0,2013$ ;

для образца с утонением (Рис.1б) -  $\eta = 0,2114\lambda^2 + \lambda - 0,2117$ .

Для интерпретации скорости роста трещины при двухосном нагружении разработан алгоритм расчета параметров НДС в вершине трещины. Исходя из сформированной последовательности расчетов, на первом этапе вычислялись упругие Т-напряжения через узловые компоненты перемещений на верхней и нижней поверхностях трещины.

$$T = \frac{1}{2} E' [u_x(x, -\pi) + u_x(x, \pi)] \quad (1)$$

Для расчета упругих коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), учитывающих уровень и вид нагружения, а также форму и размеры образца с трещиной использовались следующие формулы:

$$K_1 = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{2} [(1+\eta) - (1-\eta)\cos 2\alpha] Y_1\left(\frac{a}{w}\right); \quad K_2 = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{2} [(1-\eta)\sin 2\alpha] Y_2\left(\frac{a}{w}\right) \quad (2)$$

В выражениях (2)  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты интенсивности напряжений для форм нормального отрыва и поперечного сдвига,  $a$  – длина трещины,  $Y_1$ ,  $Y_2$ , – К-тарировочные функции,  $(a/w)$  – относительная длина трещины,  $\alpha$  – угол исходной ориентации трещины

Дальнейшие расчеты упругих параметров проводились в системе координат  $(r, \theta)$  центрированной на вершину трещины, ось ординат которой совпадает с плоскостью исходного надреза. Входящие в формулы (2) К-тарировочные функции для расчета упругих КИН, определялись для трех положений полярного угла ( $\theta=0, +\pi, -\pi$ ) с учетом найденных Т-напряжений. По трем вариантам расчетов для заданного сочетания вида двухосности, относительной длины и угла ориентации трещины вычислялись средние значения К-тарировочных функций для крестообразных образцов рассматриваемых геометрий (3):

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} + T & Y_1\left(\frac{a}{w}\right) &= \frac{2(\sigma_{xx} - T)}{\sigma} \sqrt{\frac{2r}{a}} \frac{1}{[1 + \eta - (1 - \eta)\cos 2\alpha]} \\ \underline{\theta = 0^0} \quad \sigma_{yy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} & Y_1\left(\frac{a}{w}\right) &= \frac{2\sigma_{yy}}{\sigma} \sqrt{\frac{2r}{a}} \frac{1}{[1 + \eta - (1 - \eta)\cos 2\alpha]} \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_2}{\sqrt{2\pi r}} & Y_2\left(\frac{a}{w}\right) &= \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma} \sqrt{\frac{2r}{a}} \frac{1}{(1 - \eta)\sin 2\alpha} \\ \underline{\theta = +\pi} \quad \sigma_{xx} &= -2 \frac{K_2}{\sqrt{2\pi r}} + T & Y_2\left(\frac{a}{w}\right) &= \frac{(T - \sigma_{xx})}{\sigma} \sqrt{\frac{2r}{a}} \frac{1}{(1 - \eta)\sin 2\alpha}, \\ \underline{\theta = -\pi} \quad \sigma_{xx} &= 2 \frac{K_2}{\sqrt{2\pi r}} + T & Y_2\left(\frac{a}{w}\right) &= \frac{(\sigma_{xx} - T)}{\sigma} \sqrt{\frac{2r}{a}} \frac{1}{(1 - \eta)\sin 2\alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для интерпретации развития трещин при циклическом нагружении в условиях упругих смешанных форм двухосного деформирования в качестве



эквивалентной функции использовался параметр плотности энергии деформации (ПЭД). Выражение для вычисления упругого коэффициента ПЭД имеет традиционную форму записи для плоской задачи:

$$\begin{aligned}
 S &= b_{11}K_1^2 + 2b_{12}K_1K_2 + b_{22}K_2^2; \\
 b_{11} &= \frac{1}{16G}(k - \cos \theta)(1 + \cos \theta); b_{12} = \frac{2}{16G}(\cos \theta - k + 1)\sin \theta; \\
 b_{22} &= \frac{1}{16G}[(k + 1)(1 - \cos \theta) + (3\cos \theta - 1)(1 + \cos \theta)]; G = \frac{E}{2(1 + \nu)}; k = 3 - 4\nu
 \end{aligned} \tag{4}$$

Для учета влияния двухосности нагружения на напряженно-деформированное состояние в области вершины трещины, реализуемое через зону пластической деформации и интерпретации скорости роста трещин введен новый параметр сопротивления разрушению в форме пластического коэффициента интенсивности напряжений. Для вычисления пластического КИН при двухосном нагружении предложено следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 K_M^P &= \left[ \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 \frac{\pi \bar{a}}{4\alpha} \frac{[1 + \eta - (1 - \eta)\cos 2\alpha]^2 Y_1^2 + [(1 - \eta)\sin 2\alpha]^2 Y_2^2}{I_n^{FEM}(\theta, n, M_p, (a/w))} \right]^{1/(n+1)} \tag{5} \\
 I_n^{FEM} &= \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \frac{n}{n+1} (\tilde{\sigma}_e^{n+1})^{FEM} \cos \theta - \left[ \tilde{\sigma}_{rr}^{FEM} \left( \tilde{u}_\theta^{FEM} - \frac{d\tilde{u}_r^{FEM}}{d\theta} \right) - \tilde{\sigma}_{r\theta}^{FEM} \left( \tilde{u}_r^{FEM} + \frac{d\tilde{u}_\theta^{FEM}}{d\theta} \right) \right] \sin \theta - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{n+1} (\tilde{\sigma}_{rr}^{FEM} \tilde{u}_r^{FEM} + \tilde{\sigma}_{r\theta}^{FEM} \tilde{u}_\theta^{FEM}) \cos \theta. \right\} d\theta
 \end{aligned}$$

где  $I_n^{FEM}$  - управляющий параметр состояния в пластической области вершины трещины,  $\sigma$  - номинальные напряжения,  $\sigma_0$  - предел текучести,  $Y_1, Y_2$  - К-тарифовочные функции КИН,  $(c=a/w)$  - относительная длина трещины,  $\eta$  - коэффициент двухосности нагружения,  $\alpha$  - угол исходной ориентации трещины,  $\bar{a}$ ,  $n$  - константы модели Рамберга-Осгуда,  $M_p$  - параметр смешанности,  $\theta$  - полярная координата,  $\tilde{u}_i, \tilde{\sigma}_{ij}$  - нормированные функции перемещений и напряжений. Приведенные во второй главе параметры упругих и упруго-пластических полей напряжений в вершине трещины рассчитывались непосредственно через узловые компоненты действующих перемещений с учетом ориентации трещины по отношению к осям двухосного нагружения.

**В третьей главе** представлены численные значения введенных параметров НДС для экспериментального диапазона условий смешанных форм деформирования при двухосном нагружении. Для определения искомых упругих и упруго-пластических параметров напряженно-деформированного состояния в вершине трещины сформированы конечно-элементные модели крестообразных образцов двух геометрий, содержащие наклонные сквозные трещины (рис.2). Пластические свойства материалов в

нелинейных расчетах задавались по экспериментальным кривым деформирования для одноосного статического растяжения. Численные решения представлены для двух положений сечения вдоль фронта трещины (по толщине пластины): на свободной поверхности и в срединном сечении образца.

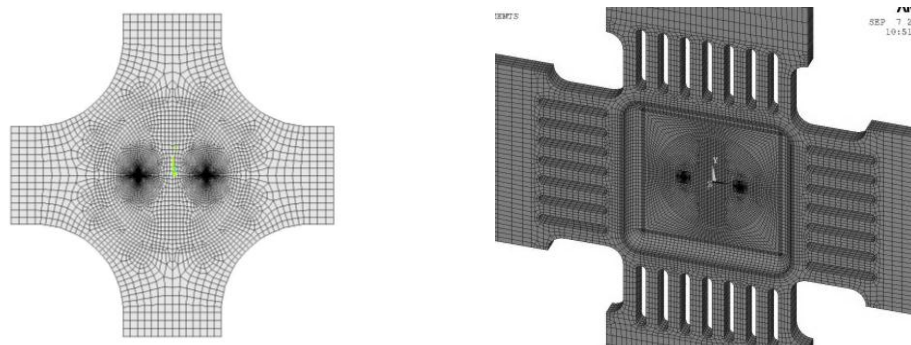


Рис.2 Конечно-элементные модели крестообразных образцов

Для каждой геометрии образцов и условий нагружения расчеты выполнялись в упругой и упруго-пластической постановке. В соответствии с разработанным алгоритмом на первом этапе упругих расчетов определены Т-напряжения в вершине трещины. Для условий нормального отрыва установлены закономерности влияния относительной длины трещины ( $a/w$ ) и вида двухосности нагружения  $\lambda$  на распределения Т-напряжений для двух геометрий крестообразных образцов (рис.3).

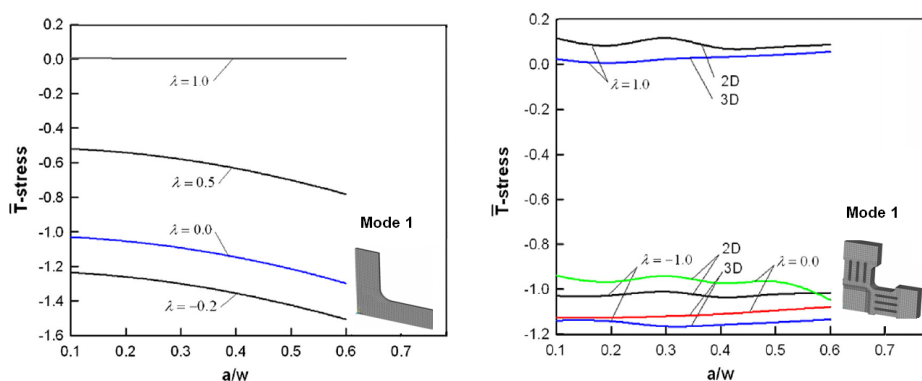


Рис.3 Распределения Т-напряжений при двухосном нагружении

По результатам расчетов Т-напряжений подтверждена корректность предложенной методики расчета на основе совпадения найденных значений Т-напряжений для частного случая равнодвухосного растяжения с теоретическим определением этого упругого параметра для пластины бесконечных размеров. Для рассматриваемых геометрий крестообразных образцов получены распределения К-тарировочных функций упругих КИН в зависимости от относительной длины трещины ( $a/w$ ) и вида двухосного нагружения  $\lambda$  (рис.4).

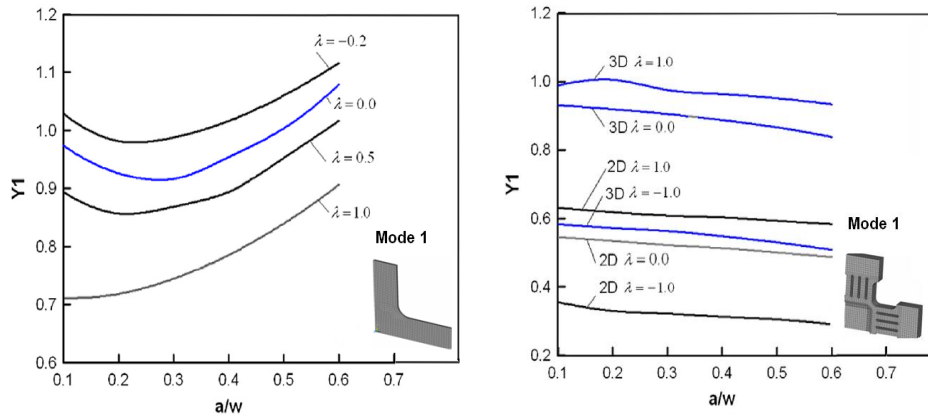


Рис.4 Распределения К-тарировочных функций КИН для нормального отрыва при двухосном нагружении

Установленные закономерности распределений Т-напряжений и К-тарировочных функций КИН в крестообразных образцах двух геометрий в зависимости от относительной длины трещины для условий нормального отрыва описаны следующими уравнениями:

для плоского крестообразного образца

$$T = A_1 \lambda \left(\frac{a}{w}\right)^2 + A_2 \lambda \left(\frac{a}{w}\right) + A_3 \lambda, \quad Y_1 = B_1 \lambda \left(\frac{a}{w}\right)^3 + B_2 \lambda \left(\frac{a}{w}\right)^2 + B_3 \lambda \left(\frac{a}{w}\right) + B_4 \lambda; \quad (6)$$

для крестообразного образца с утонением

$$T = C_1 \lambda \left(\frac{a}{w}\right)^3 + C_2 \lambda \left(\frac{a}{w}\right)^2 + C_3 \lambda \left(\frac{a}{w}\right) + C_4 \lambda, \quad Y_1 = D_1 \lambda \left(\frac{a}{w}\right)^2 + D_2 \lambda \left(\frac{a}{w}\right) + D_3 \lambda. \quad (7)$$

Второй этап упругих расчетов состоял в определении Т-напряжений и К-тарировочных функций КИН для условий смешанных форм деформирования. Установлено, что в отличие от плоского образца, в образце с утонением в рабочей зоне, распределения этих параметров зависят от положения сечения по фронту трещины и практически не зависят от относительной длины трещины (рис.5). Полученные зависимости Т-напряжений и К-тарировочных функций КИН для смешанных форм деформирования представлены в виде уравнений полиномиальных функций:

$$T = A_1 \alpha \left(\frac{a}{w}\right)^2 + A_2 \alpha \left(\frac{a}{w}\right) + A_3 \alpha; \quad (8)$$

$$Y_1 = B_1 \alpha \left(\frac{a}{w}\right)^3 + B_2 \alpha \left(\frac{a}{w}\right)^2 + B_3 \alpha \left(\frac{a}{w}\right) + B_4 \alpha; \quad Y_2 = C_1 \alpha \left(\frac{a}{w}\right)^3 + C_2 \alpha \left(\frac{a}{w}\right)^2 + C_3 \alpha \left(\frac{a}{w}\right) + C_4 \alpha. \quad (9)$$

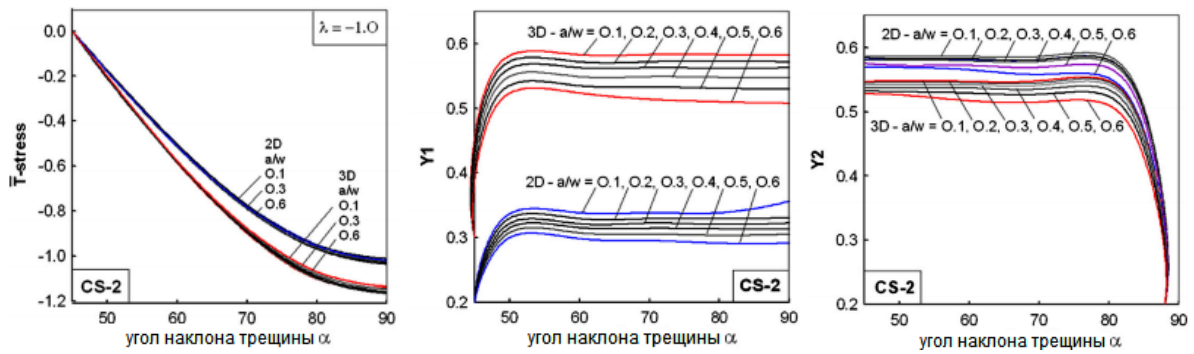


Рис.5. Коэффициенты интенсивности напряжений для смешанных форм деформирования в образце с утоненной рабочей частью

В соответствии с разработанной методикой расчета упруго-пластических параметров НДС в вершине трещины получены численные распределения введенного пластического КИН при смешанных формах деформирования в зависимости от относительной длины трещины и вида двухосного нагружения крестообразных образцов двух геометрий. Распределения пластического КИН представлены в форме  $I_n$ -интеграла на рис.6 для ситуаций плоской деформации и плоского напряженного состояния.

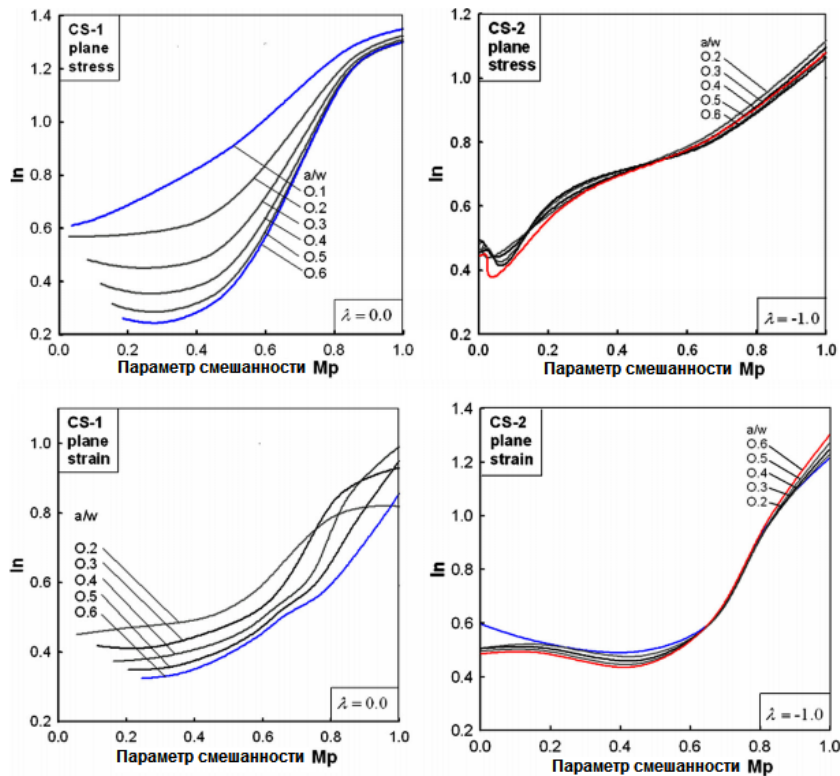


Рис.6. Распределения  $I_n$ -интеграла в полном диапазоне смешанных форм разрушения для плоского образца (CS-1) и образца с утонением (CS-2)

Установленные закономерности изменения  $I_n$ -интеграла в крестообразных образцах двух геометрий в зависимости от относительной длины трещины и вида напряженного состояния в полном диапазоне смешанных форм деформирования описаны следующими уравнениями:

$$\text{для плоского образца} - I_n = A_1 M_p \left(\frac{a}{w}\right)^3 + A_2 M_p \left(\frac{a}{w}\right)^2 + A_3 M_p \left(\frac{a}{w}\right) + A_4 M_p; \quad (10)$$

$$\text{для образца с утонением} - I_n = B_1 M_p \left(\frac{a}{w}\right)^3 + B_2 M_p \left(\frac{a}{w}\right)^2 + B_3 M_p \left(\frac{a}{w}\right) + B_4 M_p. \quad (11)$$

Для крестовидного образца с утонением в рабочей зоне из стали 34ХНЗМА численные расчёты выполнены для двух видов термической обработки. Аппроксимация диаграмм деформирования осуществлена по модели Рамберга-Осгуда. В результате установлено влияние пластических свойств материала на распределения  $I_n$ -интеграла в различных сечениях по фронту трещины (рис.7) в диапазоне от плоского напряженного состояния до плоской деформации.

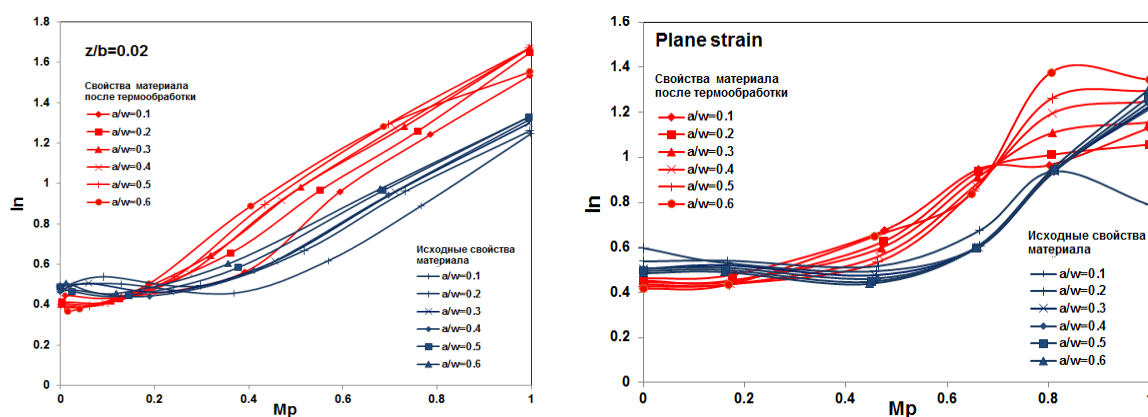


Рис.7. Влияние пластических свойств на распределения  $I_n$ -интеграла в крестообразном образце с утонением

На основе выполненных численных исследований в третьей главе обоснованы введенные параметры упруго-пластического состояния наклонных трещин в крестообразных образцах двух геометрий и представлены закономерности влияния геометрии образцов, условий нагружения и пластических свойств материала в полном диапазоне смешанных форм деформирования.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований развития наклонных трещин при двухосном циклическом нагружении и определены характеристики циклической трещиностойкости в широком диапазоне условий двухосного нагружения.

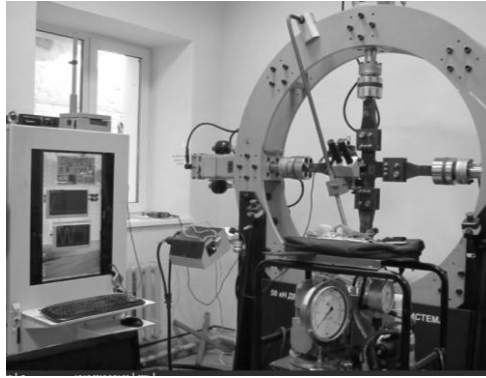


Рис.8. Установка для испытаний при двухосном нагружении

Испытания крестообразных образцов при двухосном нагружении проводились на специализированной экспериментальной установке (рис.8). Смешанные формы деформирования достигались за счет различных сочетаний угла наклона трещины к оси приложения максимальной нагрузки и двухосности номинальных напряжений. Приращение длины трещины на поверхности образцов фиксировалось с помощью оптического микроскопа МБС-10. Эксперименты в настоящей работе выполнены на плоских крестообразных образцах из стали Ст-3 и крестообразных с утонением рабочей части из стали 34ХНЗМА.

Первый раздел экспериментальных исследований состоял в определении характеристик циклической трещиностойкости в условиях нормального отрыва при изменении коэффициентов двухосности номинальных напряжений в диапазоне  $\lambda \in (+1; +0.5; 0; -1)$ .

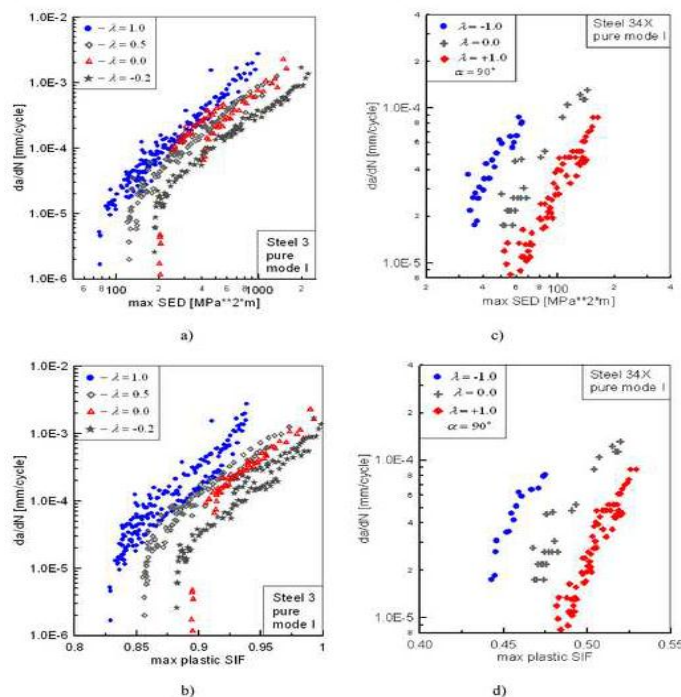


Рис.9. Диаграммы усталостного разрушения в терминах упругого параметра ПЭД и пластического КИН

Интерпретация экспериментальных диаграмм усталостного разрушения для исследованного диапазона двухосного нагружения представлена на рис.9 по упругому параметру плотности энергии деформации и пластическому КИН. Линейные участки диаграммы усталостного разрушения были описаны двумя уравнениями:

$$\begin{aligned} da/dN &= C K_{\max}^n \\ \frac{da}{dN} &= \left(\frac{da}{dN}\right)^* \cdot \left(\frac{K_{\max}}{K^*}\right)^n \end{aligned} \quad (12)$$

где  $C$  и  $n$  – константы материала в уравнении типа Париса,  $K^*$  - наибольший коэффициент интенсивности напряжения соответствующий скорости роста трещины  $\left(\frac{da}{dN}\right)^* = 10^{-4} \text{ мм/цикл}$ .

В результате статистической обработки экспериментальных данных для каждого вида напряженного состояния были получены параметры циклической трещиностойкости для условий нормального отрыва, приведенные в таблице 1 для стали Ст-3.

Таблица 1. Характеристики линейных участков диаграмм усталостного разрушения

Вид двухосного нагружения	$C$	$n$	$K^*$ [МПа/м]
+1	$2.5177 \times 10^{-10}$	4.2727	20.4367
+0.34	$2.2383 \times 10^{-10}$	4.0198	25.4430
-0.2	$1.2187 \times 10^{-11}$	4.7335	28.8851
-0.4	$3.8864 \times 10^{-10}$	3.6683	29.8485

В результате испытаний при нормальном отрыве установлены зависимости параметров циклической трещиностойкости от вида двухосного нагружения для двух геометрий крестообразного образца, представленные в виде уравнений полиномиальных функций, в частности для плоского образца -  $K^* = -3.089\lambda^2 - 5.367\lambda + 28.89$ .

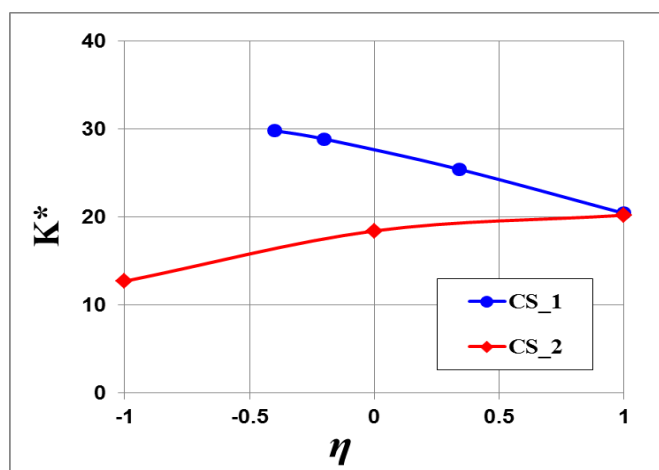


Рис.10. Зависимость параметра трещиностойкости от двухосности нагружения для плоского образца (CS-1) и образца с утонением (CS-2)

Экспериментально установлено, что для плоского образца из стали Ст-3 скорость роста трещины монотонно увеличивается от двухосного растяжения-сжатия ( $\lambda=-1$ ) к равнодвухосному растяжению ( $\lambda=+1$ ). Для крестообразного образца с утонением в рабочей зоне установлена противоположная тенденция изменения скорости роста трещины в зависимости от вида двухосного нагружения, что совпадает с литературными данными исследований скорости роста трещины при двухосном нагружении, полученными на крестообразном образце с утонением в рабочей части. Предполагается, что наблюдаемые различия в скорости роста трещин в крестовидных образцах одинаковой формы в плане обусловлены эффектами стеснения. Этот вывод совпадает с результатами упруго-пластических расчетов, согласно которым плоский образец является более чувствительным к проявлению эффектов стеснения в силу более высоких градиентов напряжений, чем образец с утонением с однородным распределением напряжений в рабочей части.

Второй раздел экспериментальных исследований состоял в определении скорости роста трещины в крестообразных образцах при смешанных формах двухосного деформирования. Испытания плоских крестообразных образцов проводились при растяжении с коэффициентом двухосности  $\lambda=0$  для начального угла наклона трещины  $\alpha=25^\circ$ . Образцы с утонением в рабочей зоне испытывались при различных комбинациях угла ориентации трещины ( $\alpha=25^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$ ) и коэффициента двухосности нагружения ( $\lambda= -1$ ,  $\lambda=0$ ,  $\lambda=0.5$ ,  $\lambda=1$ ). Интерпретация кинетических диаграмм усталостного разрушения для смешанных форм двухосного деформирования дана в терминах единого пластического КИН (Рис.11.).



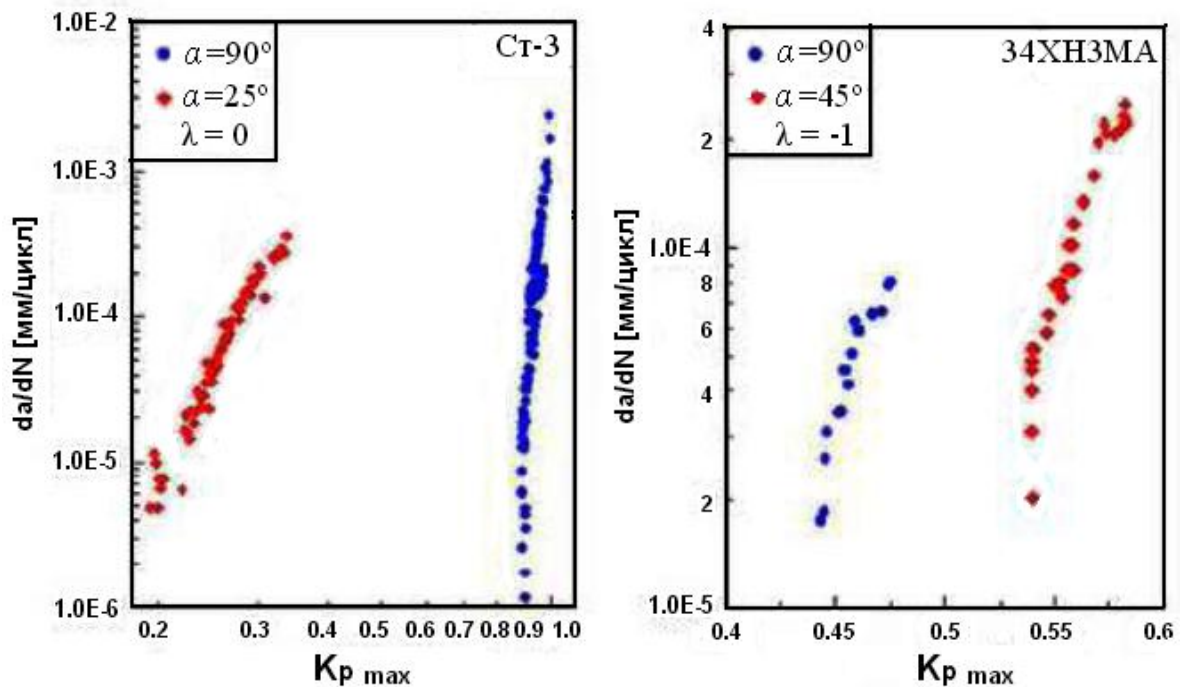


Рис.11. Скорость роста трещины при смешанных формах двухосного деформирования в терминах пластического КИН

Пластический КИН отражает влияние предела текучести и констант деформационного упрочнения материала, что недоступно в терминах традиционных упругих КИН. Для рассматриваемых геометрий образцов экспериментально установлен характер влияния смешанных форм деформирования и Т-напряжений на скорость роста трещины в широком диапазоне двухосного нагружения.

Обобщение экспериментальных результатов исследования скорости роста трещин представлено на рис.12 в форме диаграммы циклической трещиностойкости для смешанных форм двухосного деформирования в нормализованных координатах:

$$\eta = \frac{2 \log(v/v_s)}{\log(v_{fc}/v_{th})} \quad \xi = 2 \frac{\lg(K/K_s)}{\lg(K_{fc}/K_{th})} \quad (13)$$

где  $K_{fc}$  и  $K_{th}$  - значения критического и порогового КИН, а  $v_{fc}$  и  $v_{th}$  соответствующие им скорости роста трещин;  $v_s$  - скорость роста усталостной трещины при  $K_s = \sqrt{K_{fc} \cdot K_{th}}$ ;  $K$  и  $v$  - взаимосвязанная пара текущих экспериментальных значений КИН и скорости роста трещины.

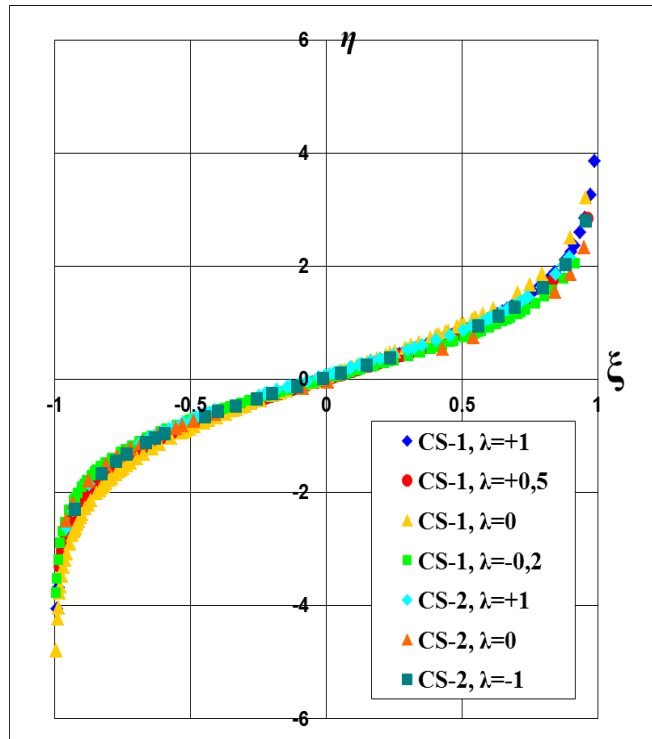


Рис.12. Обобщенная диаграмма циклической трещиностойкости

За счет выбранной нормировки все экспериментальные диаграммы, соответствующие отдельным видам нагружения, укладываются в одну общую кривую с минимальным разбросом экспериментальных точек. Удобство этой диаграммы состоит в возможности получения характеристик циклической трещиностойкости материала для интересующих видов двухосного нагружения, которые не были реализованы в натурном эксперименте.

**В пятой главе** представлено практическое приложение разработанных в диссертационной работе методов и экспериментальных результатов в порядке расчета остаточной долговечности на стадии роста трещины в диске паровой турбины. Расчеты скорости развития несквозного дефекта и остаточной долговечности диска осуществлены с использованием вычисленных значений введенного пластического КИН для эксплуатационных нагрузок и повреждений.

### Основные выводы

1. Введен и обоснован обобщенный параметр сопротивления циклическому деформированию и разрушению в форме пластического коэффициента интенсивности напряжений для условий двухосного нагружения.

2. Установлены закономерности распределения упругих и упруго-пластических параметров полей напряжений в вершине трещины и представлена их аппроксимация в зависимости от вида двухосного

нагружения, относительной длины и ориентации трещины, положения сечения вдоль фронта трещины в полном диапазоне смешанных форм деформирования.

3. Разработан метод и проведено комплексное расчетно-экспериментальное исследование характеристик циклической трещиностойкости при смешанных формах двухосного деформирования.

4. Экспериментально установлены закономерности и особенности развития наклонных трещин при смешанных формах двухосного циклического разрушения и дано их описание.

5. На основе обобщённых диаграмм циклической трещиностойкости предложен метод расчета характеристик сопротивления материала разрушению для заданных смешанных форм двухосного деформирования.

6. Разработан и реализован на примере диска турбины алгоритм оценки остаточной долговечности с использованием пластического коэффициента интенсивности напряжений.

### **Основные печатные работы по теме диссертации:**

*В международных изданиях Web of Science:*

1. Shlyannikov V.N., Tumanov A.V., Zakharov A.P., Gerasimenko A.A. Surface crack growth subjected to bending and biaxial tension-compression // *Frattura ed Integrita Strucurale*, 35 2016, p.257-267.

2. Shlyannikov V.N., Zakharov A.P. Multiaxial crack growth rate under variable T-stresses // *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, vol.123, p.86-99. +-

3. Shlyannikov V.N., Tumanov A.V., Zakharov A.P. Mixed mode crack growth rate in cruciform specimens subject to biaxial loading // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014 vol.53, p.185-193.

4. Shlyannikov V.N., Boychenko N.V., Tumanov A.V., Zakharov A.P. Unified characterization of crack growth parameters based on plastic stress intensity factor // *Procedia Materials Science*, 2014, 3, pp.1606 – 1611.

5. Shlyannikov V.N., Yarullin R.R., Zakharov A.P. Fatigue of steam turbine blades with damage on the leading edge // *Procedia Materials Science*, 2014, 3, pp.1792 – 1797.

*В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

6. Шлянников В.Н., Захаров А.П., Яруллин Р.Р. Характеристики долговечности материала дисков паровых турбин с учетом наработки в эксплуатации. // *Труды Академэнерго*, 2015, №3 с.78-90.

7. Шлянников В.Н., Захаров А.П. Образцы для испытаний при двухосном циклическом нагружении. // *Труды Академэнерго*, 2013, №3 с.73-80.

8. Шлянников В.Н., Захаров А.П., Герасименко А. А. Характеристики циклической трещиностойкости стали Ст-3 при двухосном нагружении // *Труды Академэнерго*, 2013, №4, с.89-103.

9. Shlyannikov V.N., Boychenko N.V., Zakharov A.P. The method for creep crack growth rate determination // Transactions of Akademenergo 2011 №4. с. 88-98.

10. Ильченко Б.В., Гиззатуллин Р.З., Яруллин Р.Р., Захаров А.П. Разработка и обоснование методики имитационного моделирования эксплуатационного нагружения рабочих лопаток паровых турбин // Труды Академэнерго 2012 № 3.с. 95-107.

*В других изданиях:*

11. Shlyannikov V.N., Zakharov A.P. Fatigue Crack Growth in Cruciform Specimens under Biaxial Loading // Proceedings of 13th International conference on New Trends in Fatigue and Fracture (NT2F13) 2013, Moscow, Russia. pp. 1-8.

12. Shlyannikov V.N., Zakharov A.P., Crack growth rate under variable T-stresses // Proceedings of The Tenth International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture. 2013. Kyoto. Japan, pp. 1-7.

13. Ilchenko, B.V., Yarullin R.R., Gizzatullin R.Z., Zakharov A.P. Residual life prediction of power steam turbine disk with fixed operating time // Proceedings of the 19th European Conference on Fracture (ECF19) 2012 Kazan. Russia. p. 277.

14. Захаров А.П., Яруллин Р.Р., Иштыряков И.С. Характеристики прочности и пластичности сплава Д16 при совместном нагружении растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением // Материалы XVIII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, 2013 ВМСППС'2009. с. 463.

15. Захаров А.П., Яруллин Р.Р. Прогнозирование остаточной долговечности диска паровой турбины с наработкой в эксплуатации // Материалы докладов VII Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики» 2012, с. 365-368.