

На правах рукописи



ИШТЫРЯКОВ Иван Сергеевич

**РАЗВИТИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ
В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ, НОРМАЛЬНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ
ТЕМПЕРАТУРАХ**

01.01.08 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в Институте энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань.

Научный руководитель: **Шлянников Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Шанявский Андрей Андреевич**, доктор технических наук, профессор, начальник отдела ФАУ «Авиационный регистр Российской Федерации», г. Химки Московской области.

Федулов Борис Никитович, доктор физико-математических наук, профессор Механико-математического факультета кафедры «Теория пластичности» ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени акад. С.П. Королева», г. Самара.

Защита состоится **07 октября 2021 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » сентября 2021 г.

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

 А.П. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Поведение конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии на протяжении многих лет является предметом теоретических, экспериментальных и численных исследований. Актуальность работ данного направления поддерживается возрастающими требованиями к характеристикам несущей способности, обусловленными условиями эксплуатации элементов конструкций. Определяющими условиями для многих изделий современной техники являются сочетания нескольких компонент нагружения, включая нормальные силы, внутреннее и внешнее давление, изгибающие и крутящие моменты в широком диапазоне температур эксплуатации. Наиболее распространенными повреждениями в эксплуатации являются поверхностные дефекты различной формы в плане и ориентации, которые развиваются от исходных до критических размеров в локальных зонах упруго-пластической концентрации напряжений и деформаций при циклическом нагружении.

Современные концепции и практика проектирования ответственных элементов конструкций наукоемкого машиностроения предполагают оценку безопасной и экономически целесообразной эксплуатации на основе принципов допускаемой повреждаемости. Реализация этих концепций требует проведения широких комплексных расчетно-экспериментальных исследований в условиях, моделирующих эксплуатационные.

Несмотря на большое количество теорий прочности, моделей нелинейного деформирования, критериев и параметров механики трещин и накопленным результатам численных расчетов, актуальной является задача комплексного расчетно-экспериментального исследования и описания поведения поверхностных дефектов при сочетании многоосности циклического нагружения, температуры и вариации основных физико-механических характеристик конструкционных материалов.

Целью диссертационной работы является разработка расчетно-экспериментального метода исследования развития поверхностных трещин в широком диапазоне температур в полых цилиндрических и компактных образцах при сложном напряженном состоянии и обоснование интерпретации результатов в терминах нелинейных параметров сопротивления разрушению с приложением к элементам авиационных конструкций.

Цель исследования определяет следующие **задачи**:

1. Разработать методику экспериментального исследования развития поверхностных трещин в условиях сложного напряженного состояния при отрицательной, нормальной и повышенной температурах в рамках которой:

- разработать и обосновать геометрию полых цилиндрических образцов и выполнить экспериментальные исследования влияния вида нагружения и температуры на характеристики циклической трещиностойкости алюминиевых и титанового сплавов;

- ввести и обосновать упругие и упругопластические параметры сопротивления разрушению для интерпретации эффектов влияния сложного напряженного состояния (СНС) на скорость роста трещины с учетом влияния температуры.

2. Провести комплексную численную оценку влияния вида напряженного состояния, температуры и свойств алюминиевых и титанового сплавов и предоставить обобщение поведения параметров сопротивления разрушению для рассмотренного диапазона вариации условий нагружения и формы поверхностных дефектов.

3. Установить и описать закономерности развития поверхностных трещин в условиях сложного напряженного состоянии при отрицательной, нормальной и повышенной температурах с учетом упруго-пластических свойств алюминиевых и титанового сплавов.

4. Обосновать приложение развиваемых методов к задаче оценки остаточной долговечности диска компрессора ГТД с замковым соединением типа «ласточкин хвост» с эксплуатационными повреждениями.

Научная новизна работы состоит в:

- разработке расчетно-экспериментального метода исследования развития поверхностных трещин при сложном напряженном состоянии с учетом влияния температуры и алгоритме его реализации;

- экспериментальном обосновании обобщенной диаграммы циклического разрушения в терминах пластического коэффициента интенсивности напряжений для поверхностных дефектов в полых образцах в диапазоне от отрицательных до повышенных температур испытаний исследованных алюминиевых сплавов;

- экспериментальном установлении и описании в форме нового параметра сопротивления разрушению закономерностей и особенностей развития поверхностных трещин в алюминиевых сплавах Д16ЧАТ и В95АТ1 при сложном напряженном состоянии с учетом влияния температуры испытаний.

На защиту выносятся:

- методика и алгоритм исследования и интерпретации характеристик циклической трещиностойкости в полых цилиндрических образцах с поверхностным дефектом при сложном напряженном состоянии с учетом влияния температуры испытаний;

- обобщенный параметр сопротивления разрушению в форме упруго-пластического коэффициента интенсивности напряжений при циклическом нагружении в условиях смешанных форм разрушения;

- результаты численного анализа и аппроксимации поведения упругих и пластических параметров НДС по фронту трещины для различных сочетаний вида нагружения, температуры, исходной ориентации поверхностного дефекта и свойств алюминиевых сплавов;

- экспериментально установленные закономерности и особенности развития поверхностных дефектов при сложном напряженном состоянии в диапазоне от отрицательных до повышенных температур в алюминиевых сплавах Д16ЧАТ и В95АТ1.

Практическая значимость работы состоит в обосновании возможности количественной оценки влияния вида нагружения и условий окружающей среды (температуры) на характеристики остаточной долговечности элементов конструкций при сложном напряженном состоянии. В работе разработан и на примере диска компрессора ГТД реализован алгоритм оценки остаточной долговечности на основе нелинейного параметра сопротивления циклическому разрушению.

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.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, состояло в анализе методических вопросов исследования, выполнении комплекса численных расчетов в упругой и упруго-пластической постановке, проведении всего комплекса экспериментальных исследований, обобщении результатов испытаний и реализации практического приложения разработанных методов к оценке остаточной долговечности диска компрессора ГТД.

Реализация работы. Результаты работы представлены в тематике научных исследований лаборатории Механики деформирования и разрушения Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

Работа поддерживалась грантами РФФИ № 16-38-00786, РФФИ 13-08-92699 инд_а, РФФИ 13-08-00813, РФФИ 16-08-00744, РФФИ 17-08-01401, РФФИ 14-08-31496 мол_а, РФФИ 15-38-20169 мол_а_вед, РФФИ 15-08-04556 а, РФФИ 20-38-70030_Стабильность, РНФ 17-19-01614, РНФ 14-19-01716, РНФ 19-79-10160.

Апробация работы. Результаты работы представлялись на XVIII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам ВМСППС (Крым, Алушта 22-31 мая 2013г), на итоговых научных конференциях КазНЦ РАН (Казань, 2012-2019гг.); на XI всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань 20-24 августа 2015г.), the 21st European Conference of Fracture (ECF21) (Catania, Italy June 20-24, 2016), the XVIII International Colloquium Mechanical Fatigue Of Metals (Gijón, Spain September 5-7, 2016), the First International Workshop on Challenges in Multiaxial Fatigue (Urbino, Italy 22-24 April 2015), the 2nd IJF & FFEMS challenges in multiaxial fatigue workshop (Bonifacio, France 12-14 April 2017), на VII международной конференции деформирования и разрушение материалов и наноматериалов (Москва 7-10 ноября 2017г.), the 22nd European Conference on Fracture (ECF22) (Belgrad, Serbia 26-31 августа 2018), the 2018 International Symposium on Structural Integrity (ISSI-2018) (Nanjing, China Nov2-5, 2018), the Characterisation of Crack Tip Fields (Heidelberg, Germany April 8-10, 2019), the 15th International Conference on Engineering Structural Integrity Assessment (ESIA15) (Granta Park Cambridge, UK, 8-9 May 2019), the 12h International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF12) (Bordeaux, France June 24-26, 2019), the IGF25 - 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity Catania (Italy, June 12-14, 2019).

В полном объеме диссертация докладывалась в ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН, в Институте механики сплошных сред Уро РАН, на кафедре Математического моделирования систем и процессов ПНИПУ, на кафедре Механики композиционных материалов и конструкций ПНИПУ, на кафедре Экспериментальной механики и конструкционного материаловедения ПНИПУ.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 17 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка использованной литературы. Материал изложен на 185 страницах, содержит 102 рисунка, 25 таблиц, список литературы состоит из 188 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. Становление и развитие механики сопротивления деформированию и разрушению связано с именами отечественных и зарубежных ученых: Н.И. Мухелишвили, В.В. Панасюка, Ю.Н. Работнова, Г.П. Черепанова, Р.В. Гольдштейна, А.А. Лебедева, Н.А. Махутова, Н.Ф. Морозова, В.И. Владимирова, А.Я. Красовского, А.А. Шанявского, М.Л. Вильямса, Д. Броека, К. Миллера, Дж. Нотта, Дж. Райса, Дж. Си, П. Париса, Дж. Хатчинсона и др.

В первой главе представлен обзор экспериментальных методов определения характеристик деформирования и разрушения материалов при сложном напряженном состоянии. Рассмотрены вычислительные аспекты определения параметров НДС в вершине трещины при сложном напряженном состоянии. Дан анализ алгоритмов расчета долговечности методами механики повреждений.

На основе литературного анализа сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе изложены методические вопросы расчетно-экспериментальных исследований скорости роста трещины в полых цилиндрических и компактных образцах при сложном напряженном состоянии в диапазоне от отрицательных до повышенных температур.

Основными объектами исследований в диссертационной работе были полые цилиндрические образцы с поперечными (рис.1а) и продольными (рис.1б) поверхностными дефектами. Цилиндрические образцы изготовлены из авиационных сплавов Д16ЧАТ и В95АТ1, стандартные компактные образцы из титанового сплава ВТ3-1.

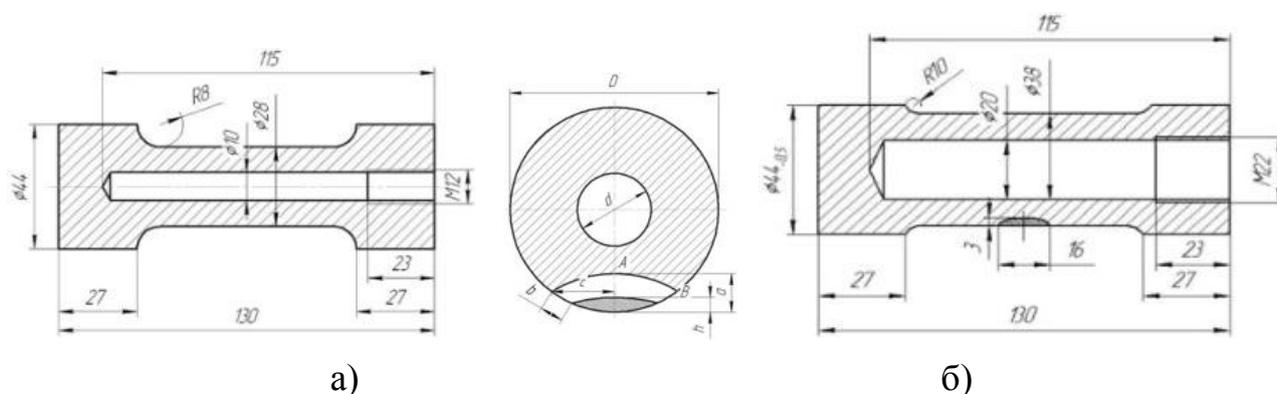


Рис.1. Полые цилиндрические образцы с поперечным (а) и продольным (б) расположением исходного дефекта

Программа испытаний на полых цилиндрических образцах включала комбинации одноосного растяжения (сжатия), внутреннего давления и кручения при отрицательной (-60°C), нормальной (+23°C) и повышенной (+250°C) температурах и компактных образцах при различных видах нагружения и температурах испытаний. Компактные образцы из титанового сплава ВТ3-1 испытывались при нормальной (+23°C) и повышенной (+300°C) температурах.

Для определения и интерпретации скорости роста поверхностных трещин в полых цилиндрических образцах была разработана методика, которая представлена в виде блок-схемы (рис.2). При интерпретации результатов испытаний в рамках упругой задачи для общего случая смешанных форм деформирования, включающего формы нормального отрыва I, продольного II и поперечного сдвига III, использовано выражение для эквивалентного упругого коэффициента интенсивности напряжений (КИН):

$$K_{eqv} = (1 - \nu^2) (K_1^2 + K_2^2) + (1 + \nu) K_3^2 \quad (1)$$

Для интерпретации скорости роста трещины в терминах нелинейных параметров сопротивления разрушению использовался обобщенный параметр в форме пластического коэффициента интенсивности напряжений

$$\bar{K}_M^P = \left[\left(\frac{K_{eqv}}{\sigma_0^2} \right) \frac{1}{\bar{\alpha} I_n(\theta^*) L} \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (2)$$

где $\bar{\alpha}$, n - параметры упрочнения материала по модели Рамберга-Осгуда, σ_0 - предел текучести материала. Входящий в состав выражения для расчета пластического КИН (2) $I_n(\theta)$ -интеграл является функцией геометрии образца с трещиной, пластических свойств материала, формы и размеров трещины и вида нагружения.

Основным результатом проведения испытаний полых цилиндрических образцов является получение исходной информации в виде зависимостей скорости роста трещины от упругого или пластического КИН $da/dN=f(K)$, необходимой для определения искомых характеристик сопротивления материала росту трещины в форме констант C и m уравнения типа Париса.

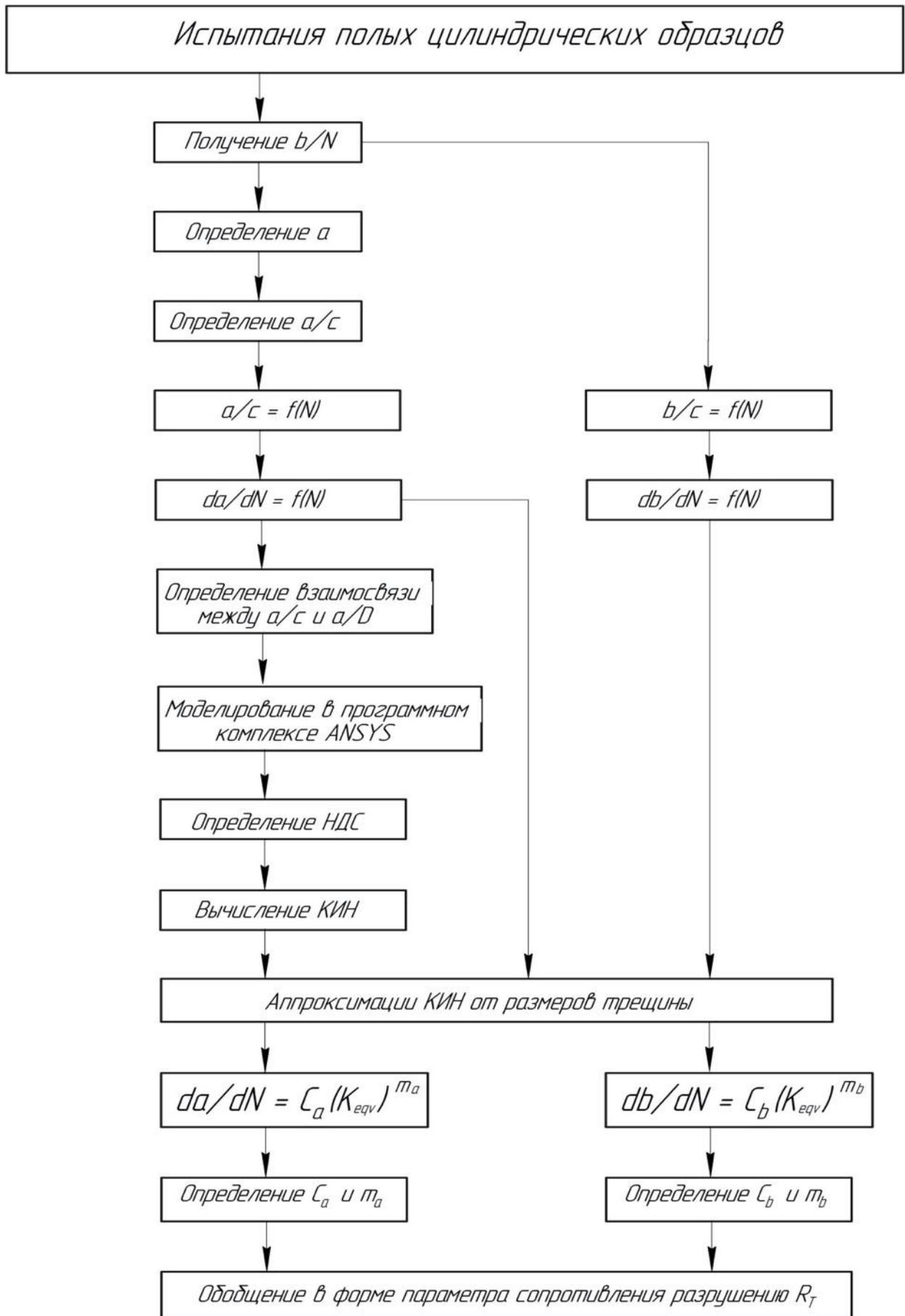


Рис. 2. Блок-схема реализации методики определения скорости роста поверхностных трещин на полых цилиндрических образцах

Данные константы, описывающие закономерности роста трещин в алюминиевых и титановом сплавах в исследованном диапазоне температур, являются основой для формулировки безразмерного параметра циклической трещиностойкости.

Полученные во второй главе первичные экспериментальные данные в форме положений фронтов поверхностных трещин в функции от количества циклов нагружения, являются основой для последующих численных расчетов.

В третьей главе представлены результаты расчетов упругих и пластических параметров полей напряжений в вершине трещины в зависимости от вида нагружения, относительной длины и ориентации трещины при различных комбинациях вида деформирования и температуры испытаний.

На рисунке 3 показаны типичные положения развивающейся трещины при испытаниях на растяжение (поперечный дефект) и внутреннее давление (продольный дефект), соответственно.



Рис. 3. Типичные положения поперечного и продольного фронта развивающейся трещины

Для определения искомых упругих и упруго-пластических параметров напряженно-деформированного состояния в вершине трещины сформированы конечно-элементные модели полых цилиндрических образцов с продольным и поперечным расположением дефекта (рис.4). По результатам численных расчетов были найдены компоненты перемещений и действующих напряжений в области вершины трещины (рис. 5), на основе которых вычислялись упругие и упруго-пластические параметры для интерпретации скорости роста трещины.



Рис. 4. Расчетные схемы МКЭ полого цилиндрического образца с продольным и поперечным расположением дефекта

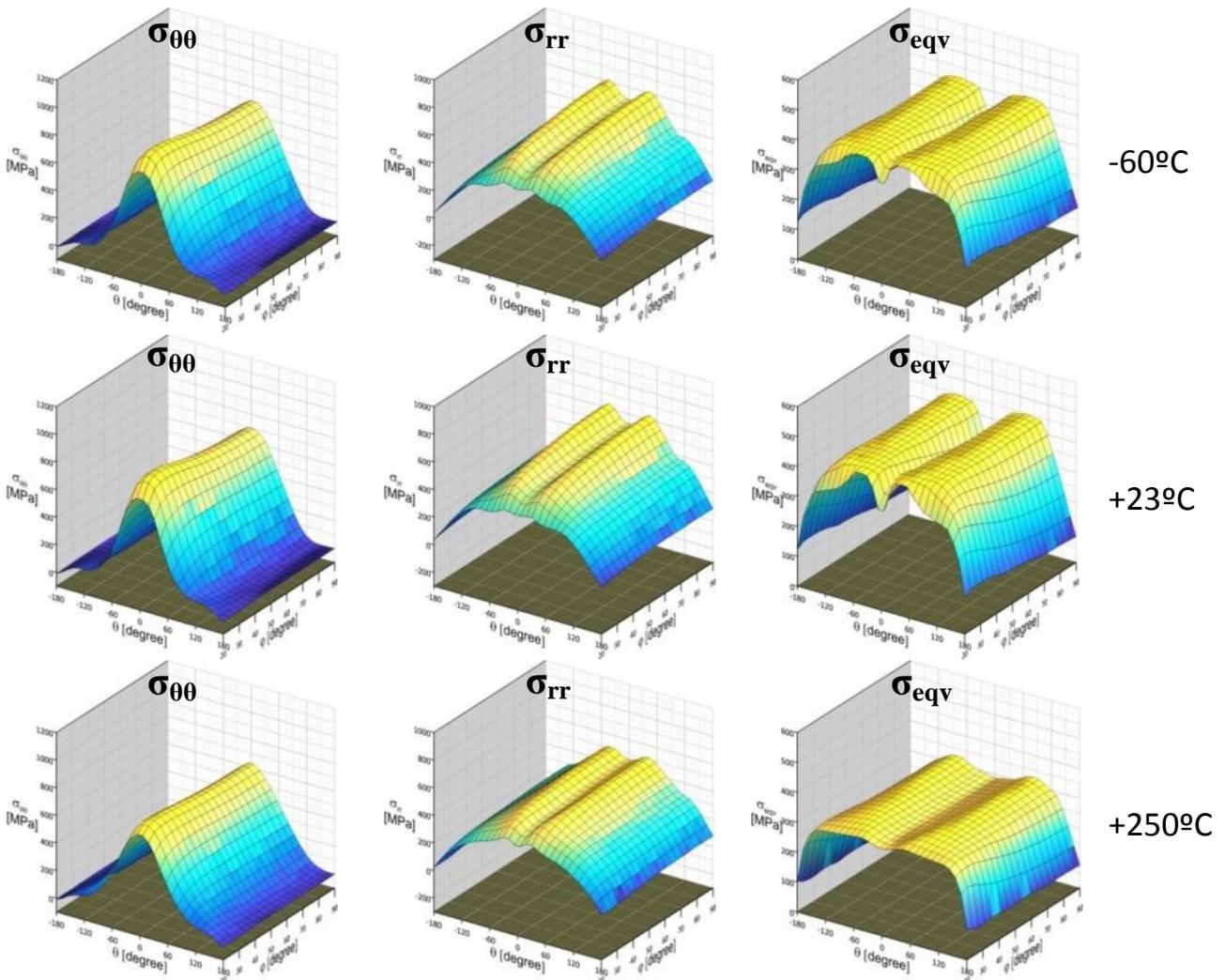


Рис. 5. Распределение напряжений по фронту трещины в цилиндрическом образце при растяжении в диапазоне температур от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$

Различия в распределениях упругих и пластических КИН в полых образцах из алюминиевых сплавов Д16ЧАТ и В95АТ1 в диапазоне температур от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$ для одинакового поперечного расположения фронта трещины и нагрузки представлены на рис.6. С целью сопоставления распределений КИН вдоль экспериментальных фронтов трещин введены безразмерные координаты,

где $R=0$ - свободная поверхность образца, а $R=1$ принадлежит срединному сечению на оси симметрии полого образца. Результаты упругого решения на рис.6а укладываются в одну общую кривую и не чувствительны к изменению температуры испытаний. В противоположность этому на рис. 6б и рис. 6в в терминах пластического КИН K_P имеет место набор отдельных распределений в зависимости от свойств материалов и температуры испытаний для тех же условий нагружения и формы фронта трещины в полом цилиндрическом образце.

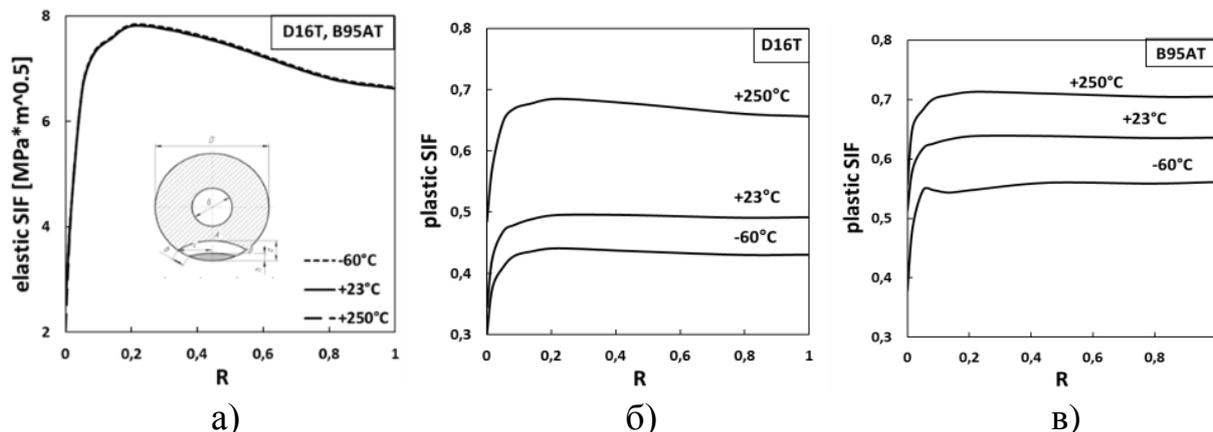


Рис. 6. Распределения упругих (а) и пластических (б, в) КИН в полых образцах из сплавов Д16ЧАТ и В95АТ1 по фронту поперечной трещины при растяжении

Представленные на рис.6 результаты имеют принципиальное значение для методологии настоящей работы и дают наглядную иллюстрацию необходимости учета пластических свойств материала при интерпретации характеристик сопротивления материалов циклическому разрушению с учетом влияния температуры.

На основе выполненных численных исследований в третьей главе обоснованы введенные параметры упруго-пластического состояния поверхностных трещин в полых цилиндрических и компактных образцах при сложном напряженном состоянии для рассмотренного диапазона температур испытаний.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований развития усталостных трещин в полых цилиндрических образцах с различной ориентацией поверхностного дефекта при растяжении, совместном действии растяжения и кручения, а также внутреннего давления при отрицательной, нормальной и повышенной температурах.

Получены зависимости скорости роста трещины на поверхности db/dN от величины раскрытия трещины на боковой поверхности цилиндрических образцов из сплавов Д16ЧАТ и В95АТ1 при одноосном растяжении и

комбинации растяжения и кручения. Установлено, что данные зависимости укладываются в одну общую кривую с узкой полосой разброса и получено уравнение аппроксимации скорости роста трещины в функции ее раскрытия.

По экспериментальным данным с привлечением численных результатов для упругого и пластического КИН построены диаграммы скорости роста трещин в полых цилиндрических образцах для различных видов нагружения с вариацией температуры испытаний и ориентацией исходного дефекта. На рис.7а и на рис.7б приведены типовые диаграммы при одноосном растяжении с поперечным расположением дефекта в функции упругого и пластического КИН для сплава Д16ЧАТ в диапазоне температур от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$. В терминах упругого КИН имеют место три отдельных диаграммы для каждой температуры на свободной поверхности цилиндрического полого образца.

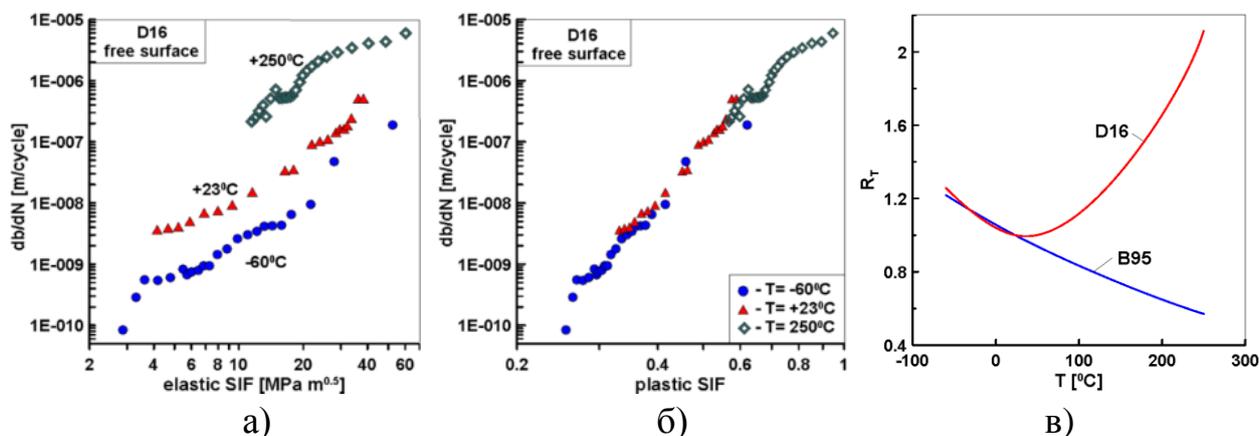


Рис. 7. Диаграммы скорости роста трещин в функции упругого (а) и пластического КИН (б) и поведение R_T -параметра (в) для алюминиевых сплавов в зависимости от температуры испытаний

В отличие от этого при интерпретации тех же самых экспериментальных диаграмм скорости роста трещин в терминах пластического КИН, для боковой поверхности (рис.7б) полых цилиндрических образцов из сплава Д16ЧАТ в исследованном диапазоне температур результаты отдельных испытаний при фиксированной температуре образуют одну общую экспериментальную кривую с частичным перекрытием диапазонов скоростей. Результаты, представленные на рис.7а,б доказывают предпочтительность анализа роста трещин через введенный пластический КИН в силу его возможностей учета изменения именно упруго-пластических свойств материала по температуре, что принципиально невозможно в рамках упругого подхода.

Для количественной характеристики сопротивления материала разрушению введен безразмерный параметр циклической трещиностойкости для учета влияния температуры. Предложенный параметр записывается как

произведение отношений значений констант при произвольной температуре испытаний C_t и m_t к их величинам при комнатной температуре C_{23} и m_{23} :

$$R_T = \frac{m_t}{m_{23}} \frac{C_{23}}{C_t} \quad (3)$$

На рис. 7в показаны результаты обработки экспериментов по уравнению (3), которые представляют однопараметрическую оценку характеристик сопротивления циклическому разрушению в зависимости от температуры испытаний посредством введенного параметра R_T . Получено, что в области отрицательных температур оба алюминиевых сплава показывают одинаковое сопротивление циклическому разрушению, а с повышением температуры их поведение становится различным. Таким образом, данный параметр может быть рекомендован для количественной характеристики свойств сопротивления материалов циклическому разрушению при развитии поверхностных дефектов с учетом влияния температуры.

В пятой главе на основе развиваемых подходов нелинейной механики деформирования и разрушения представлен и реализован алгоритм оценки остаточной долговечности диска компрессора авиационного ГТД с повреждением поверхностным дефектом в замковом соединении типа «ласточкин хвост» при сложном упруго-пластическом напряженном состоянии (рис.8а). Численные расчеты НДС диска с эксплуатационными повреждениями (рис.8б,в) проведены для трех фронтов трещины при комнатной и повышенной температуре, для которых определены значения упругого и упруго-пластического КИН.

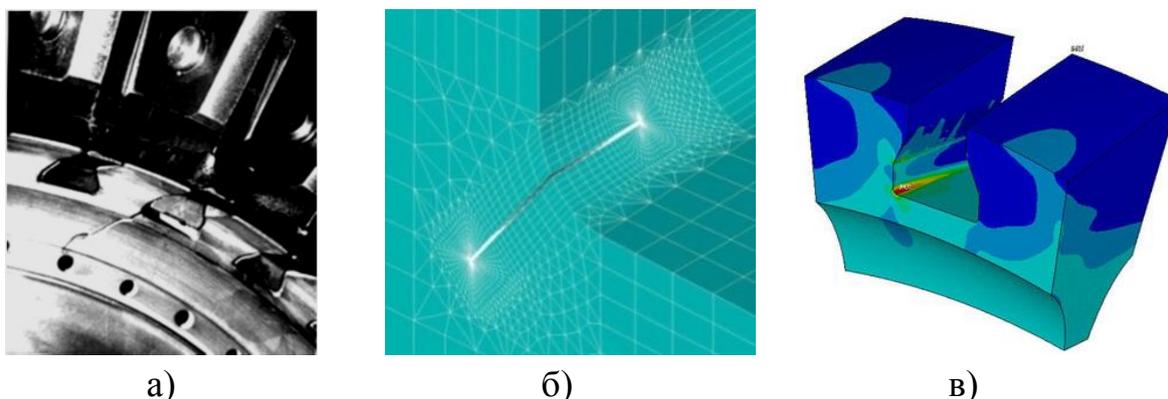


Рис. 8. Диск компрессора ГТД с повреждением (а), сетка МКЭ (б) и напряжения в замковом соединении типа «ласточкин хвост» (в)

В настоящем исследовании разработан алгоритм расчета скорости роста трещины, который имеет следующую последовательность:

$$\begin{array}{c}
 \xrightarrow{i+1} \\
 \downarrow \\
 a_0(\phi) \rightarrow r_0 \rightarrow a_1 = (a_0 + r_0) \rightarrow K_1 \rightarrow (da/dN)_1 \rightarrow N_1 \rightarrow a_i = f(N_i) \\
 \uparrow
 \end{array}$$

На первом этапе расчета, для начальной длины трещины a_0 , размер ЗПР определялся по уравнению 4. В результате получали новую длину трещины, как сумма начальной длины и размера ЗПР. Для этой длины трещины a_1 были рассчитаны значения упругих и упругопластических КИН. Затем, используя уравнение 5, рассчитывалась скорость роста трещины. Путем численного интегрирования уравнения 5 определялось количество циклов нагружения N_1 . Значения a_1 и N_1 задают точку на кривой усталости. Размер трещины a_1 возвращается в начало цикла как новый начальный размер трещины, и расчет повторяется снова. Аналогичная процедура реализуется для каждой из 90 точек криволинейного фронта трещины.

$$\bar{r}_f = \left(\frac{\Delta K_{eqv}^2}{E} \right) \left[\frac{(\kappa - 1)(1 + \nu)}{4\pi a} + \frac{n'}{(n' + 1)} \frac{\tilde{\sigma}_e^{n'+1}}{I_n w} \right] / \left[4\sigma_f^* \varepsilon_f^* (2N_f)^{-\beta} \right] \quad (4)$$

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{fatigue} = 2\delta^* \left\{ (\Delta K_1^2 - \Delta K_{th}^2) \left[\frac{(\kappa - 1)(1 + \nu)}{4\pi} + \frac{n'}{(n' + 1)} \frac{\tilde{\sigma}_e^{n'+1}}{I_n^f} \left(\frac{a}{w} \right) \right] / (4E\sigma_f^* \varepsilon_f^* \delta^*) \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

где $\beta = -(b + c)$

Для апробации предложенной модели были построены экспериментальные диаграммы усталостного разрушения в координатах скорости роста трещины в зависимости от значений коэффициентов интенсивности напряжений для компактного образца при одноосном растяжении (рис. 9).

На рис. 9 приведены зависимости скорости роста трещин от упругих и упругопластических КИН в титановом сплаве ВТЗ-1, где точками представлены экспериментальные результаты. Сплошные линии представляют результаты теоретического прогнозирования скорости роста трещины при малоцикловом деформировании полученные из уравнения 5. Экспериментальные данные попадают в относительно узкую полосу разброса и хорошо согласуются с теоретическим прогнозом.

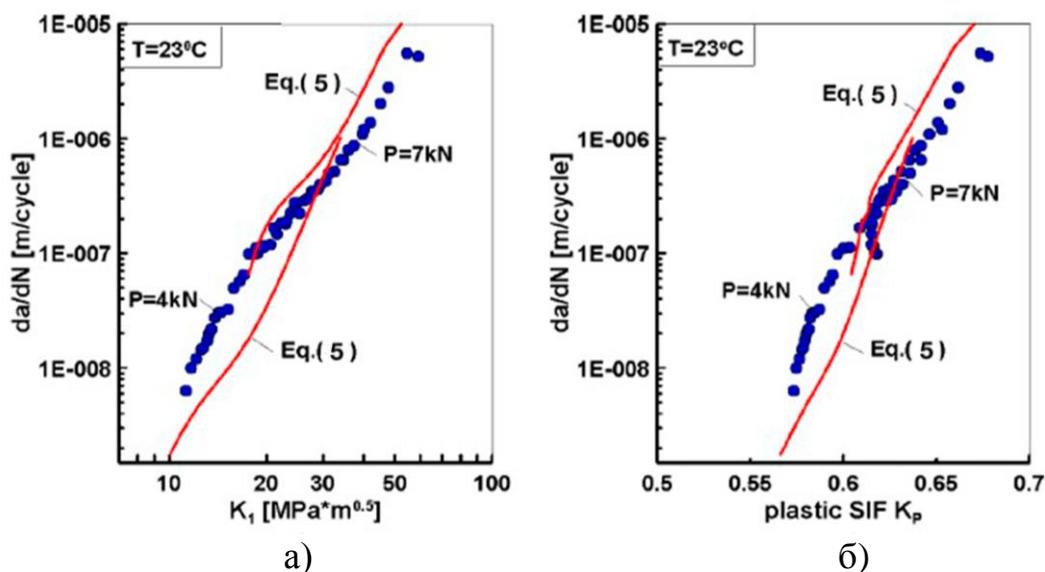


Рис. 9. Сопоставление прогнозирования скорости роста трещины с экспериментальными данными для титанового сплава ВТЗ-1

На основе концепции зоны процесса разрушения проведены расчеты остаточной долговечности для развивающихся в диске компрессора поверхностных трещин, результаты которых представлены на рис.10 в терминах упругих и пластических КИН. Сплошная линия на рис. 10 относится к прогнозу по модели (5), а штриховые линии относятся к расчету по упрощенной модели (5), в которой было исключено второе слагаемое, учитывающее вклад пластических свойств материала.

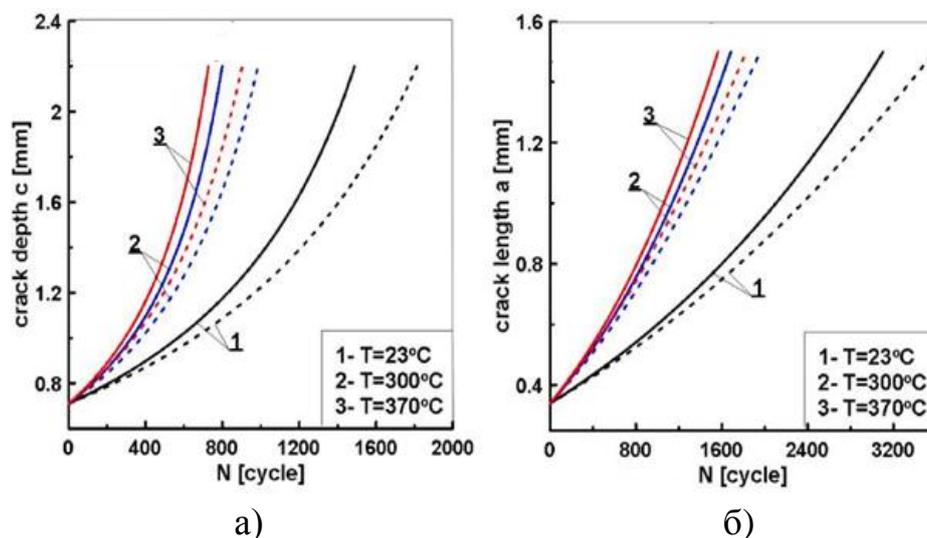


Рис. 10. Зависимости размеров поверхностной трещины от количества циклов нагружения на внутренней (а) и свободной (б) поверхности паза

Установлено что, упругое решение дает завышенные значения долговечности, по сравнению с упруго-пластическим расчетом. Разница в долговечностях при комнатной температуре достигала 22%, а в случае

повышенных температур - 24%. Представленные в работе результаты показывают очевидные преимущества использования пластических КИН при определении характеристик материала сопротивления разрушению и прогнозировании остаточной долговечности элементов конструкций ГТД.

Основные выводы

1. Разработана методика экспериментального исследования развития поверхностных трещин при сложном напряженном состоянии в диапазоне температур от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$ и реализована в процессе испытаний образцов из алюминиевых сплавов Д16ЧАТ и В95АТ1 и титанового сплава ВТ3-1.

2. Обосновано применение и показаны преимущества пластического коэффициента интенсивности напряжений в исследовании скорости роста трещин с учетом влияния температуры и в задачах оценки остаточной долговечности элементов конструкций.

3. На основе развернутого численного параметрического исследования получены и описаны аппроксимационными функциями распределения упругих и пластических параметров напряженно-деформированного состояния по фронту трещины для различных сочетаний вида нагружения, температуры, исходной ориентации поверхностного дефекта и свойств алюминиевых сплавов.

4. Проведены экспериментальные исследования влияния вида нагружения и температуры на характеристики трещиностойкости и получены обобщенные диаграммы циклического разрушения в терминах пластического коэффициента интенсивности напряжений для поверхностных дефектов в полых образцах из исследованных алюминиевых сплавов.

5. Представлено описание в форме нового параметра сопротивления разрушению закономерностей и особенностей развития поверхностных трещин в алюминиевых сплавах Д16ЧАТ и В95АТ1 при сложном напряженном состоянии в диапазоне температур от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$.

6. Разработан и реализован на примере замкового соединения типа "ласточкин хвост" в диске компрессора авиационного ГТД алгоритм оценки остаточной долговечности с использованием предложенного нелинейного параметра сопротивления разрушению.

Основные печатные работы по теме диссертации:

В международных изданиях Web of Science:

1. Shlyannikov V., Ishtyryakov I., Tumanov A. Characterization of the nonlinear fracture resistance parameters for an aviation GTE turbine disc // Fatigue Fract Eng Mater Struct. – 2020. - V.43. - P. 1686-1702.

2. Shlyannikov V., Ishtiryakov I. Crack growth rate and lifetime prediction for aviation gas turbine engine compressor disk based on nonlinear fracture mechanics parameters // *Theoret Appl Fract Mech.* – 2019. - V.10. - P. 1-8.

3. Shlyannikov V., Yarullin R., Ishtyriakov I. Failure analysis of an aircraft GTE compressor disk on the base of imitation modeling principles // *Proc Struct Integrity* – 2019. - V.18. - P. 322-329.

4. Boychenko N., Ishtyryakov I. Characterization of the stress-strain state in a gas turbine engine compressor disc taking into account damage accumulation // *Frat Ed Integrità Strutt.* – 2019. - V.50. - P. 54-67.

5. Shlyannikov V., Yarullin R., Ishtyryakov I. Effect of temperature on the growth of fatigue surface cracks in aluminum alloys // *Theoret Appl Fract Mech.* – 2018. - V.96. - P. 758-767.

6. Yarullin R., Zakharov A., Ishtyriakov I. Nonlinear fracture resistance parameters for cracked aircraft GTE compressor disk // *Proc Struct Integrity.* – 2018. - V.13. - P. 902-907.

7. Shlyannikov V., Yarullin R., Ishtyriakov I. Effect of different environmental conditions on surface crack growth in aluminum alloys // *Frat Ed Integrità Strutt.* – 2017. - V.41. - P. 31-39.

8. Citarella R., Sepe R., Giannella V., Ishtyryakov I. Multiaxial fatigue crack propagation of an edge crack in a cylindrical specimen undergoing combined tension-torsion loading // *Proc Struct Integrity.* – 2016. - V.2. - P. 2706-2717.

9. Yarullin R., Ishtyryakov I. Fatigue surface crack growth in aluminum alloys under different temperatures // *Proc Engineering.* – 2016. - V.160. - P. 199–206.

10. Shlyannikov V., Yarullin R., Ishtyryakov I. Surface crack growth in cylindrical hollow specimen subject to tension and torsion // *Frat Ed Integrità Strutt.* – 2015. - V.33. - P. 335-344.

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Шлянников В. Н., Яруллин Р. Р., Иштыряков И. С. Оценка долговечности диска компрессора на основе пластического коэффициента интенсивности напряжений // *Авиац.Техн.* – 2019. - №1. - С.15-24.

2. Иштыряков И. С., Яруллин Р. Р. Влияние ориентации дефекта на характеристики разрушения в полом цилиндре при комбинированном нагружении // *Труды Академэнерго.* – 2018. - №1. - С. 105-118.

3. Шлянников В. Н., Яруллин Р. Р., Иштыряков И. С. Влияние температуры на скорость развития поверхностных трещин в алюминиевом сплаве Д16Т // *Труды Академэнерго.* – 2016. - №4. - С. 85 – 97.

4. Шлянников В. Н., Яруллин Р. Р., Иштыряков И. С. Развитие поверхностных трещин в полых цилиндрических образцах при комбинированном циклическом нагружении // *Заводская лаборатория.* – 2016. - №8. - С. 47-54.

5. Шлянников В. Н., Иштыряков И. С., Яруллин Р. Р. Эффекты перераспределения напряжений в полем цилиндре при внутреннем давлении // Труды Академэнерго. – 2016. - №1. - С. 117-127.

6. Шлянников В. Н., Иштыряков И. С., Яруллин Р. Р. Характеристики деформирования сплава Д16 при совместном нагружении растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением // Труды Академэнерго. – 2014. - №3. - С. 78-90.

7. Шлянников В. Н., Захаров А. П., Иштыряков И. С. Пластический коэффициент интенсивности напряжений в задачах механики разрушения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. - №2. - С. 18-26.