

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 10.03.2016 № 102

О присуждении Захарову Александру Павловичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Характеристики циклической трещиностойкости конструкционных материалов при смешанных формах двухосного нагружения» по специальности 01.02.04 «Механика твердого деформируемого тела» принята к защите 24.12.2015, протокол № 96 диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Захаров Александр Павлович 1988 года рождения, в 2011 году окончил «Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Казанский государственный энергетический университет» по специальности «Теплоэнергетика». Соискатель окончил аспирантуру очной формы обучения в Исследовательском центре проблем энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра Российской академии наук по научной специальности 01.02.06 – Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры в 2014 году. Решением ученого совета от 11 ноября 2014 изменена и утверждена новая специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории вычислительной и экспериментальной механики деформирования и разрушения КазНЦ РАН. Диссертация выполнена в лаборатории вычислительной и экспериментальной механики деформирования и разрушения КазНЦ РАН.

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор Шлянников Валерий Николаевич, заместитель председателя ФГБУН Казанского научного центра Российской академии наук, заведующий лабораторией «Вычислительная и экспериментальная механика деформирования и разрушения».

**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», дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация:** ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, в своем положительном заключении, под-

писанным Коноваловым А.В., доктором технических наук, профессором и утвержденном директором ИМАШ УрО РАН, доктором технических наук, профессором Смирновым С.В. указала, что диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, которая содержит новое решение актуальной задачи, заключающееся в разработке современной методики определении характеристик циклической трещиностойкости конструкционных материалов при смешанных формах двухосного нагружения, имеющую важное научное и прикладное значение. Работа полностью удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Захаров Александр Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Соискатель имеет 15 опубликованных работ по теме диссертации, из них 5 статей в изданиях, индексируемых в базе Web of Science и 5 – в рецензируемых научных изданиях (в журналах, рекомендуемых ВАК). Наиболее значительные работы:

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

5. 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.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Шанявского Андрея Андреевича. В отзыве указывается на то, что проблема, рассматриваемая в рамках представленной диссертационной работы, является актуальной, научно важной, а её результаты необходимыми для практического использования. Оппонент отмечает, что автор в литературном обзоре не уделил внимание расчёту эффективного коэффициента интенсивности напряжений. Было бы нагляднее в обзоре поместить для сравнения хотя бы несколько кинетических кривых, особенно это касается результатов, моделирующих траекторию трещин. К сожалению, в методической главе не нашли отражение сведения о материалах и их характеристиках, которые исследовал автор. Оппонент указывает на ошибки в обозначении горизонтальной оси на рис. 2.6 и 2.7. Отмечается, некорректное обозначение предела текучести материала в формуле 2.18. Необходимо было пояснить, что в работе речь идёт о численном моделировании по формуле 2.20, но, на самом деле, это тот, же самый параметр, что и представлен в формуле 2.15. Оппонент спрашивает, с какого размера надёжно выявлялась и фиксировалась трещина? В тексте сказано, на рис. 3.10 и 3.11 представлены «Распределения упругих Т-напряжений для смешанных форм

двуосного деформирования в плоском образце», однако приведена зависимость от угла наклона начального надреза. Оппонент указывает на то, что наклон трещины не однозначно характеризует две или более форм разрушения. Для этого нужно провести анализ рельефа излома. В работе представлены два выражения для определения одного и того же параметра плотности энергии деформирования, причём коэффициенты в формулах разные. Оппонент отмечает, что сведения об исследуемых материалах, представленные в Главе 3 должны были быть представлены во второй главе. На стр.105 приведены графики, на которых показано распределение параметра  $In$  с утверждением, что распределение напряжений при разном напряжённом состоянии. Как кажется, оппоненту правильнее было бы сохранить указание на место определения полей изменения параметров относительно фронта трещины. На стр.106 появляется параметр смешанности, представленный через  $\arctang$ , тогда как во втором разделе приведена формула 2.17 для определения этого параметра через  $\tang^{-1}$ . Как кажется рецензенту, полученные показатели степени для кинетических кривых не отражают поведения материала. Это скорее погрешности эксперимента или обработки данных испытаний. К сожалению, автор приводит формулу для порогового КИН (4.5) не давая обоснования того, каким образом она получена. Не совсем ясно, как получен минимальный пороговый КИН, если речь идёт о расчёте, а не об экспериментальной оценке. Оппонент отмечает, что в работе установлен критический размер дефекта в диске турбины. При этом даётся ссылка на рис.5.15в, хотя размер дефекта указан на рис.5.15в и рис.5.15г. Оппонент делает замечание, почему на рис.5.17, 5.19, рис.5.20 все «в английском». Следовало бы оговорить те граничные условия, для которых реализовано моделирование предельного состояния диска. Не совсем ясно, для какого случая рекомендовано моделировать рост трещин в дисках, тем более, что форма фронта трещины углковая.

2. Положительный отзыв официального оппонента Вахрушева Александра Васильевича. В отзыве указано на то, что актуальность исследований представленных в диссертации обусловлена необходимостью разработки и обоснования новых параметров сопротивления циклическому деформированию и разрушению, учитывающих специфику нелинейного деформирования при смешанных формах двуосного нагружения. Оппонент отмечает, что не ясно, каким образом автором при построении конечно-элементных моделей крестообразных образцов учитывалась сингулярность в вершине трещины. В результате численных исследований в упругой постановке автором были получены упругие коэффициенты интенсивности напряжений. Однако в четвертой главе на кинетических диаграммах усталостного разрушения (Рис.4.1а, Рис.4.2а) скорость роста трещины представлена в зависимости от параметра плотности энергии деформации. Требует дополнительных комментариев, каким образом результаты экспериментальных исследований скорости роста используются в расчете остаточной долговечности диска паровой турбины.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается актуальность темы диссертации, основные научные результаты, теоретическая и практическая значимость работы. В целом, оценивая работу положительно, ведущая организация отмечает, что не ясно как обеспечено необходимое требование однородного напряженно-деформированного состояния в рабочей зоне крестообразных образцов. Не ясно, поч-

му компонента тензора напряжений  $\sigma_{yy}$  выбрана в качестве критериальной величины. В работе используется понятие относительной длины трещины, но не понятно по какому параметру нормируется её размер. Также в работе не введен параметр толщины образца, и поэтому не ясно для каких элементов можно применять методику. Не ясно как для стали Ст3, имеющую площадку текучести (Рис.3.14), проведена аппроксимация диаграммы деформирования по модели Рамберга-Огуда. Иллюстративный материал расчетов (Рис. 2.13, Рис. 3.5 и др.) приведен без соответствующих размерностей.

На автореферат поступило 8 положительных отзывов, из них 1 отзыв – без замечаний от Каюмова Р.А., д.ф-м.н., профессора Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 7 отзывов с замечаниями от: Махутова Н.А., д.т.н., член-корреспондента РАН, советника РАН; Баженова В.Г., д.ф-м.н, профессора Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского; Гецова Л.Б., д.т.н., ведущего научного сотрудника ОАО «НПО ЦКТИ»; Москвичева В.В., д.т.н., профессора ФГБУН Специального конструкторско-технологического бюро «Наука» КНЦ СО РАН; Панина С.В., д.т.н., профессора ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН; Степановой Л.В., д.ф-м.н., профессора Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева; Калугина Р.Н., к.т.н., заведующего отделением материалов ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт».

В качестве замечаний отмечено следующее: при упругопластическом циклическом деформировании имеет место изменение параметров уравнений состояния, зависящее от уровня деформаций и циклических свойств материала, остается неясной погрешность расчетов, не учитывающих это изменение; в автореферате следовало бы охарактеризовать изменение траекторий роста трещин при варьировании условий нагружения; отсутствие в автореферате сведений о механических свойствах, исследуемых в работе материалов; каким образом экспериментальные результаты развития сквозных трещин использовались при расчете остаточной долговечности диска паровой турбины; неясно, какой конечно-элементный пакет использует автор и учитывается ли в расчете возможность изменения фронта трещины при циклическом нагружении; какая модель упругопластичности используется; по видимому, в автореферате опечатка насчет того, что в формуле (2)  $a$  – угол исходной ориентации, не дано определение  $w$  в этой же формуле; следовало бы и в автореферате пояснить, из каких предположений предложены формулы (5). Для полного описания следовало бы привести формулу для Т-напряжений для сдвига; отсутствие в автореферате информации о характеристиках использованных конечных элементов и сеточных областей в окрестности вершины трещины; в автореферате утверждается, что "сформированы конечно-элементные модели крестообразных образцов, содержащие наклонные сквозные трещины", однако на иллюстрациях моделей трещины явно не являются наклонными; в тексте автореферата никак не отражено, в чем заключалась разработка оборудования; хотелось бы видеть в автореферате сравнение значений пластического коэффициента интенсивности напряжений с учетом и без учета Т-напряжений. Для каких конфигураций образцов и условий нагружения учет Т-напряжений обязателен, а для каких случаев Т-напряжениями можно пренебречь; связывалась ли скорость роста трещины с предложенным автором пластическим коэффи-

циентом напряжений с помощью уравнения по типу Пэриса; не ясен учет влияния кинетики основных механических свойств материала диска турбины по наработке в эксплуатации в рамках реализации предлагаемого алгоритма оценки остаточной долговечности; не оговорены условия и особенности применения предлагаемой последовательности расчетов долговечности на стадии роста несквозных дефектов по отношению к другим типам турбомашин.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и практическую значимость, вносят значительный вклад в решение фундаментальных вопросов нелинейной механики твердого деформируемого тела.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**предложен** основанный на введении пластического коэффициента интенсивности напряжений новый параметр сопротивления деформированию и разрушению материалов и элементов конструкций при смешанных формах двухосного циклического нагружения; **разработаны и реализованы** методики численного и экспериментального исследования характеристик состояния сквозных трещин при смешанных формах двухосного циклического деформирования;

**показана** эффективность использования нового параметра пластического коэффициента интенсивности напряжений при интерпретации экспериментальных данных по скорости роста трещины при смешанных формах двухосного деформирования и оценки остаточной долговечности элементов конструкций с трещиной;

**введена** обобщенная форма диаграмм усталостного разрушения.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

– введенное выражение для пластического коэффициента интенсивности напряжений учитывает влияние вида двухосного нагружения и смешанных форм деформирования на поведение упругих и упруго-пластических полей напряжений в области вершины трещины;

– установлены и описаны закономерности изменения параметров упруго-пластического состояния в широком диапазоне смешанных мод двухосного деформирования;

– за счет предложенной в работе нормировки базовых координат кинетических диаграмм усталостного разрушения, все экспериментальные данные по скорости роста трещины, соответствующие отдельным видам двухосного нагружения, укладываются в одну общую кривую с минимальным разбросом экспериментальных точек.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован** комплекс численных методов анализа напряжено-деформированного состояния в области вершины трещины в упругой и упруго-пластической постановках, а также новые экспериментальные методики определения скорости роста трещины и интерпретации результатов;

**изложены** результаты расчетов упругих и пластических параметров полей напряжений в окрестности вершины трещины и экспериментальных исследований скорости роста трещин при смешанных формах двухосного циклического нагружения;

**раскрыты** особенности распределения упругих и упруго-пластических параметров в окрестности вершины 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; **изучены** эффекты совместного влияния вида двухосности нагружения и смешанных форм деформирования на поведение параметров упругих и упруго-пластических полей напряжений в окрестности вершины трещины в крестообразных образцах двух геометрий;

**представлена модифицированная формулировка** известных феноменологических моделей скорости роста трещины, использующая пластический коэффициент интенсивности напряжений.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны** методы численного и экспериментального исследования характеристик состояния сквозных трещин при смешанных формах двухосного циклического деформирования;

**определенны** характеристики циклической трещиностойкости при смешанных формах двухосного деформирования, обеспечивающие практическое приложение в оценке несущей способности элементов конструкций на стадии развития дефектов;

**создан** и реализован алгоритм расчета остаточной долговечности элементов конструкций с дефектами на основе пластического коэффициента интенсивности напряжений;

**представлены** возможности количественной и качественной оценки влияния смешанных форм деформирования на характеристики остаточной долговечности при сложном напряженном состоянии.

**Другие научные достижения, свидетельствующие о научной новизне и значимости полученных результатов:**

Впервые для крестообразных образцов вычислены значения  $I_n$ -интеграла, характеризующего упруго-пластическое состояние в области вершины трещины. Получены новые экспериментальные данные о скорости роста трещин для исследуемых материалов при смешанных формах двухосного нагружения.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** результаты получены на сертифицированном испытательном оборудовании с использованием поверенных высокоточных средств измерений; **теория** построена на известных, проверяемых данных и в частных случаях согласуется с опубликованными ранее результатами исследований по теме диссертации и смежным областям;

**идея базируется** на обобщении передового опыта по численному и экспериментальному исследованию задач о наклонных трещинах при смешанных формах двухосного деформирования;

**использованы** современные апробированные численные методы, высокоточные методы регистрации и обработки экспериментальных данных, проведено сравнение авторских результатов и данных, полученных в ранее выполненных исследованиях по рассматриваемой тематике;

**установлено** удовлетворительное соответствие частных численных и аналитических решений и экспериментальных результатов с теоретическими и экспериментальными данными, представленными в литературе;

**Личный вклад соискателя состоит** в обосновании пластического коэффициента интенсивности напряжений для условий двухосного нагружения, в разработке и оптимизации конструкции крестообразных образцов, создании экспериментального оборудования, проведении комплекса численных исследований упругих и упруго-пластических параметров напряженно-деформированного состояния в области вершины трещины в крестообразных образцах в полном диапазоне смешанных форм двухосного деформирования, проведении экспериментальных исследований скорости роста трещины при двухосном циклическом нагружении, обобщении экспериментальных результатов, реализации 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.

**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.**

На заседании 10 марта 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Захарову А.П. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Зам. председателя  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета

10.03.2016 г.



М.П.

Роговой Анатолий Алексеевич

Зуев Андрей Леонидович