

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 07.10.2021 № 79

О присуждении Иштырякову Ивану Сергеевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Развитие поверхностных дефектов в условиях сложного напряженного состояния при отрицательной, нормальной и повышенной температурах» по специальности 1.1.8 (01.02.04) «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 05.08.2021, протокол № 71, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Иштыряков Иван Сергеевич 1989 г. рождения, в 2012 г. окончил ГОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет по специальности «Теплоэнергетика». В 2016 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в ФГБУН Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук" по научной специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории механики деформирования и разрушения Института энергетики и перспективных технологий ФГБУН ФИЦ Казанский научный центр Российской академии наук. Диссертация выполнена в ФГБУН ФИЦ Казанский научный центр РАН.

Научный руководитель – д.т.н., профессор, руководитель научного направления "Энергетика", заведующий испытательной лабораторией ФГБУН ФИЦ Казанский научный центр РАН Шлянников Валерий Николаевич.

Официальные оппоненты:

1. Шанявский Андрей Андреевич, доктор технических наук (01.02.06), профессор, начальник отдела металлофизических исследований авиационных материалов ФАУ "Авиационный регистр Российской Федерации" (г. Химки, Москва);
2. Федулов Борис Никитович, доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор кафедры теории пластичности ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова" (г. Москва);
дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева" (СамНИУ), г. Самара, в своем положительном заключении, составленным Л.В.Степановой, д.ф.-м.н., доцентом, заведующей кафедрой математического моделирования в механике ФГАОУ ВО СамНИУ, и утвержденном

проректором по научно-исследовательской деятельности ФГАОУ ВО СамНИУ, д.т.н., доцентом А.Б.Прокофьевым, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой разработан расчетно-экспериментальный метод анализа развития поверхностных трещин в широком температурном диапазоне в полых цилиндрических образцах, предложено в качестве параметра сопротивления разрушению упругопластический параметр – пластический коэффициент интенсивности напряжений и дано приложение разработанной экспериментально-расчетной методики к элементу авиационных конструкций, обосновывающий развитый метод. Работа базируется на результатах обширных экспериментальных и численных исследований и вносит существенный вклад в раздел сопротивления деформированию и нелинейному разрушению механики деформируемого твердого тела. Представленная диссертационная работа «Развитие поверхностных дефектов в условиях сложного напряженного состояния при отрицательной, нормальной и повышенной температурах» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Иштыряков Иван Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (01.02.04) – Механика деформируемого твёрдого тела.

Соискателем опубликовано 8 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

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.

В работе проведено исследование параметров сопротивления разрушению поведения при малоцикловой усталости и ползучести в диске авиационном ГТД. Представлена формулировка модели скорости роста трещины с учетом поврежденности при ползучести. Выполнено прогнозирование скорости роста и трещины и остаточного ресурса при взаимодействии усталости и ползучести для различных комбинаций условий нагружения и повреждения диска турбины ГТД.

2. Shlyannikov V., **Ishtyryakov 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.103 – P. 1-8.

В работе представлены уравнения скорости роста трещины, основанные на концепции размера зоны процесса разрушения и пластического коэффициента интенсивности напряжений; дана оценка остаточной долговечности вращающегося диска компрессора с эксплуатационным повреждением в упругой и упругопластической трактовке.

3. 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.

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

В работах [3, 4] проведены численные и экспериментальные исследования развития поверхностных трещин в полых цилиндрических образцах из алюминиевого сплава Д16Т при циклическом растяжении в условиях нормальных, отрицательных и повышенных

температур. Показаны очевидные преимущества использования пластического КИН при определении характеристик материала сопротивления разрушению.

5. 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 работе установлены эффекты влияния вида нагружения и ориентации исходного поверхностного дефекта на развитие трещин для двух типов алюминиевых сплавов. Интерпретация скорости роста усталостных трещин представлена в терминах упругих и пластических КИН. Показаны преимущества использования пластического КИН в силу его чувствительности к комбинированному нагружению вследствие учета пластических свойств материала.

6. Шлянников В.Н., Яруллин Р.Р., **Иштыряков И.С.** Оценка долговечности диска компрессора на основе пластического коэффициента интенсивности напряжений // Авиационная Техника. – 2019 – С.15-24.

В работе представлены уравнения скорости роста трещины, основанные на концепции размера зоны процесса разрушения и пластического коэффициента интенсивности напряжений. Дана оценка остаточной долговечности вращающегося диска компрессора в упругой и упругопластической трактовке.

7. 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.

В работе установлена взаимосвязь между раскрытием берегов трещины и длиной трещины на свободной поверхности использованы для прогнозирования скорости роста трещины в наиболее глубокой точке фронта. На основе численных расчетов интерпретация скорости развития поверхностных трещин выполнена с использованием упругих КИН и пластического КИН.

8. 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.

В работе представлена трактовка разрушающих напряжений и деформаций по классическим теориям прочности и предельных деформаций. Установлено, что деформационный критерий статического разрушения является предпочтительным для описания поведения упрочняющегося материала при сложном напряженном состоянии.

Публикации содержат в сумме 99 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

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

1. Положительный отзыв официального оппонента Федулова Б.Н. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; новизна, научная и практическая значимость полученных результатов; обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- неудачно написано введение;
- непонятны, для чего были введены такие параметры как M_e и M_p ;

- во введении и в самой работе не хватает иллюстраций и графиков демонстрирующих отклонения классических теорий от экспериментов;
- не всегда понятно, как подсчитывались коэффициенты интенсивности;
- после получения из экспериментов и получения аппроксимаций для скорости роста трещин не всегда понятно, где происходит проверка результатов по независимым экспериментам, а где показаны эксперименты, на которых данные были получены;
- отсутствует наглядная связь параметров, характеризующих влияние вида напряженного состояния на параметры роста дефектов, не показано изменение характеристик трещиностойкости от их величины;
- нигде не анализируется повторяемость результатов, разброс данных, а также влияние технологии производства материала.

2. Положительный отзыв официального оппонента Шанявского А.А. В отзыве отмечено, что проблема, рассматриваемая в рамках представленной диссертационной работы, является актуальной и своевременной задачей научного исследования, а её результат требует скорейшего использования в научной и практической среде конструкторов, а также эксплуатантов, занимающихся оценкой, обоснованием и продлением ресурса элементов авиационных конструкций. Оппонент отмечает следующие замечания:

- не обоснован выбор параметров цикла нагружения образцов;
- непонятно какой продолжительности выбирались маркерные режимы для оценки скорости роста трещин при разных условиях нагружения образцов;
- выбранные соотношения для сложного напряжённого состояния следовало бы связать с каким-нибудь конструктивным элементом;
- не ясна роль компактных образцов выбранной формы образца и условия его нагружения в рамках заявленной темы диссертации;
- почему в таблице 3.7.2 уравнения аппроксимации приведены для конкретных образцов, в то время как в таблице 3.7.1 приведены расчетные функции для тех же материалов и тех же точек фронта трещины, но без нумерации образцов;
- выражение «безразмерное эквивалентное напряжение» не передаёт тот смысл, который заложен авторами в эту характеристику;
- оппонент спрашивает, верно ли, что данные в таблице 4.2.1 приведены для сравнения того, как растёт трещина в разных условиях испытаний;
- почему трещины, представленные в таблице 4.2.1, растут при одном и том же виде нагружения симметрично и несимметрично, а также при низкой температуре изломы для двух сопоставляемых материалов разные;
- нигде не сказано, для какого размера начальной трещины получена величина N_0 ;
- отсутствует в четвертой главе номера образцов, приведенных в таблице 3.7.2;
- необходимо указать границы по уровню КИН или скорости роста трещины, участка кинетической кривой, на которых были определены константы уравнения Париса;
- значения показателя степени в уравнении Париса около 46 и 37 свидетельствует о том, что это не участок Париса, а припороговая область скоростей роста трещины;
- оппонент спрашивает, будет ли находится максимум деформации на поверхности для меньшего соотношения трещины и является ли рассматриваемое соотношение

некоторой критической величиной;

- в уравнении 5.3.6, определяется только период роста трещины, а долговечность ещё в себя включает период зарождения трещины.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, результаты, полученные автором диссертационной работы, хорошо согласуются с результатами исследований других авторов. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость пригодные для использования в инженерной практике. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечания по обзору научной литературы;
- как учитываются особенности циклического нагружения в конечно-элементной модели и как учитывается зона пластического деформирования при разгрузке образца;
- некорректно использованы фразы «упругопластические напряжения»;
- отсутствует указание размерности в аппроксимационных функциях;
- почему не использовали известные трехмерные упругие поля, полученные при решении пространственных задач.

На автореферат поступило 6 отзывов:

1. Положительный отзыв от Гецова Л.Б., д.т.н., бывшего (до 1 августа 2021) главного научного сотрудника ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург (1 замечание);
2. Положительный отзыв от Каюмова Р.А., д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры механики КГАСУ ФГБОУ ВО "Казанский государственный архитектурно-строительный университет", г. Казань (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Костина В.А., д.т.н., профессора, заведующего кафедрой прочности конструкций ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева", г. Казань (без замечаний);
4. Положительный отзыв от Москвичева В.В., д.т.н., профессора, директора Красноярского филиала Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск (3 замечания);
5. Положительный отзыв от Паймушина В.Н., д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры прочности конструкций ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева", г. Казань (2 замечания);
6. Положительный отзыв от Панина С.В., д.т.н., профессора РАН, заведующего лабораторией механики полимерных композиционных материалов; Еремина А.В., к.т.н., младшего научного сотрудника ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (3 замечания).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- неполно описана блок-схема методики определения скорости роста трещин;
- почему не использовать пластический КИН при расчете безразмерного параметра RT ;
- уточняется работоспособность модели прогнозирования остаточного ресурса;
- нет указаний на материаловедческие исследования кинетики трещин усталости, поверхностей разрушения, размеров зон пластического деформирования, траекторий развития трещин;

- отсутствует ясное понимание, как учитывалось влияние объёмности напряженного состояния в вершине трещины, вид номинального напряженного состояния на характеристики пластичности, разрушающие напряжения и деформации в уравнениях;
- предлагается дать более четкую трактовку пластическому коэффициенту интенсивности напряжений;
- отсутствуют сведения об основных механических свойствах, исследуемых материалов;
- не сказано, чем обусловлен выбор сплавов Д16ЧАТ, В95АТ1 и ВТЗ-1, а также диапазон рассматриваемых температур;
- вопрос о способе получения экспериментальных фронтов трещины;
- отсутствие в автореферате информации о характеристиках расчетных схем МКЭ, а также недостаточно информации по численным расчетам диска компрессора ГТД;
- сохраняются ли представлены зависимости на рис. 7 на сплаве В95АТ1;
- в автореферате отсутствует упоминания влияния периода цикла – ползучести.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области фундаментальных основ прочности, пластичности и разрушения, математических методов моделирования, численных расчетов, металлографических и фрактографических исследований механизмов и процессов разрушения, оценки несущей способности элементов авиационных конструкций; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБОУ ВО СамНИУ является одним из ведущих научных центров в области математического моделирования в механике деформируемого твердого тела, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру проблем теоретической, прикладной, вычислительной и экспериментальной механики, инженерным приложениям в машиностроении, авиации и энергетике. Научные школы Университета поддерживаются грантами ведущих научных фондов Российской Федерации и контрактами с предприятиями. Университет является учредителем 6 научных изданий, среди которых: «Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки», «Технические науки» включенные в международные базы WoS и Scopus. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании кафедры математического моделирования в механике в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан расчетно-экспериментальный метод исследования развития поверхностных трещин в широком диапазоне температур в полых цилиндрических и компактных образцах при сложном напряженном состоянии и обоснована интерпретация результатов в терминах нелинейных параметров сопротивления разрушению с приложением к элементам авиационных конструкций;

предложен новый количественный параметр оценки сопротивления разрушению алюминиевых сплавов Д16ЧАТ и В95АТ1 при развитии поверхностных трещин при сложном напряженном состоянии в диапазоне температур от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$;

доказано существование обобщенной диаграммы циклического разрушения в терминах нелинейного коэффициента интенсивности напряжений в рассмотренном диапазоне температур и установлены различия в скорости развития поверхностных дефектов по фронту трещины;

разработан алгоритм оценки остаточной долговечности с использованием предложенного нелинейного параметра сопротивления разрушению и реализован на примере замкового соединения типа "ласточкин хвост" в титановом диске компрессора авиационного газотурбинного двигателя (ГТД).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана эффективность использования нелинейного коэффициента интенсивности напряжений по сравнению с упругим КИН для интерпретации задач и прогнозирования развития поверхностных дефектов в образцах и элементах конструкций с учетом влияния температуры.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы комплекс численных методов анализа напряжено-деформированного состояния по фронту поверхностного дефекта в упругой и упруго-пластических постановках, а также экспериментальные методы исследования скорости роста трещины при сложном напряженном состоянии в диапазоне от отрицательной до повышенной температур;

раскрыты особенности распределения упругих и пластических параметров полей напряжений во фронте трещины и дано их обобщение в форме аппроксимационных функций зависимости от вида нагружения, температуры, исходной ориентации поверхностного дефекта и свойств алюминиевых сплавов;

установлены эффекты совместного влияния вида нагружения, температуры, исходной ориентации и формы поверхностного дефекта и свойств алюминиевых сплавов на скорость роста трещины в различных точках ее фронта.

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

разработаны и внедрены методы численного и экспериментального исследования количественных и качественных характеристик состояния поверхностных дефектов при сложном напряженном состоянии в диапазоне от отрицательных до повышенных температур в алюминиевых сплавах Д16ЧАТ и В95АТ1;

определены количественные характеристики циклической трещиностойкости поверхностных дефектов в алюминиевых сплавах при сложном напряженном состоянии с учетом влияния температуры испытаний и дано их обобщение в форме нового параметра сопротивления разрушению, удобного к применению на стадии выбора материала и оценки несущей способности элемента конструкции;

представлена и обоснована возможность приложения развиваемых методов к задаче оценки остаточной долговечности диска компрессора ГТД с замковым соединением типа «ласточкин хвост» с эксплуатационными повреждениями.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены в сертифицированной лаборатории на аттестованном 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 знаний;

идея базируется на обобщении передового опыта по численному и экспериментальному исследованию задач о поверхностных дефектах при сложном напряженном состоянии в диапазоне от отрицательных до повышенных температур;

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 качественное и количественное совпадение частных численных и аналитических решений и экспериментальных результатов с теоретическими и экспериментальными данными, имеющимися в литературе;

Личный вклад соискателя состоит в разработке 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. Выбор направлений исследований, составление планов работ и анализ результатов 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.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи исследования развития поверхностных трещин в широком диапазоне температур в полых образцах при сложном напряженном состоянии и обоснование интерпретации результатов в терминах нелинейных параметров сопротивления разрушению с приложением к элементам авиационных конструкций.

На заседании 07 октября 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Иштырякову И.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человека, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 15, против – 0, не проголосовало – 0.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеевко Валерий Павлович

 / Матвеевко В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович

 / Зуев А.Л.

08 октября 2021 г.

