

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 29.04.2024 № 127

О присуждении Суламанидзе Александру Гелаевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Анализ и закономерности развития трещин усталости при изотермическом и термомеханическом нагружении в жаропрочном сплаве» по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 22.02.2024, протокол № 126, 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** Суламанидзе Александр Гелаевич 1995 г. рождения, в 2021 г. окончил ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ" по специальности «Теплоэнергетика и теплотехника». Тема диссертационной работы утверждена на Ученом совете ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН 25.11.2021 г., протокол № 7. В период с 2022 по 2023 гг. сдал кандидатские экзамены по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела. В настоящее время работает младшим научным сотрудником Испытательной лаборатории Института энергетики и перспективных технологий ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН. Диссертация выполнена в ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН.

**Научный руководитель** – д.т.н., профессор, руководитель научного направления "Энергетика" ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН Шлянников Валерий Николаевич.

**Официальные оппоненты:**

1. Бережной Дмитрий Валерьевич, доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор кафедры теоретической механики Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет" (г. Казань);
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 бюджетное учреждение науки "Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук" (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург, в своем положительном заключении, составленным С.В.Смирновым, д.т.н., главным научным сотрудником, заведующим лабораторией микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН, и

утвержденном директором ФГБУН ИМАШ УрО РАН, д.т.н., доцентом В.П.Швейкиным, указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой разработан расчетно-экспериментальный метод исследования развития трещин для условий изотермического и неоднородного переходного температурного состояния материала при циклическом механическом нагружении, предложен и обоснован нелинейный параметр разрушающего воздействия для интерпретации экспериментальных результатов и прогнозирования скорости роста трещины. Полученные экспериментальные данные и разработанные методы предоставляют возможность количественной оценки влияния эффектов термомеханического нагружения на характеристики остаточной долговечности элементов конструкций. Достоверность и обоснованность результатов диссертации не вызывают сомнений. Работа имеет комплексный характер с сочетанием обширных экспериментальных и численных исследований. Представленная диссертационная работа «Анализ и закономерности развития трещин усталости при изотермическом и термомеханическом нагружении в жаропрочном сплаве» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Суламанидзе Александр Гелаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела.

**Соискателем опубликовано 7 статей** в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Shlyannikov V., **Sulamanidze A.**, Yarullin R. Fatigue and creep-fatigue crack growth in aviation turbine disk simulation models under variable amplitude loading // Engineering Failure Analysis. 2022. V. 131. Art. id. № 105886. (WoS, Scopus Q1).

*В работе проведено исследование поведения параметров сопротивления разрушению при усталости и ползучести в элементе ступицы диска ТРДД, выполненного из сплава ХН73МБТЮ.*

2. Shlyannikov V., **Sulamanidze A.** Crack tip field analysis for thermo-mechanical fatigue loading // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2023. V. 125. Art. id. № 103945. (WoS, Scopus Q1).

3. **Sulamanidze A.**, Shlyannikov V., Kosov D. Verification and validation of multi-physics numerical analysis of thermomechanical fatigue test conditions under induction heating and forced convection // Thermal Science and Engineering Progress. 2023. V. 45. Art. id. № 102124. (WoS, Scopus Q1).

*Исследования [2, 3] были направлены на моделирование полей параметров НДС в вершине трещины при термомеханической усталости с учетом как синфазной, так и противофазной истории нагружения. Разработан и реализован алгоритм мультифизических численных расчетов в сопряженной постановке с использованием этапов электромагнитного анализа, вычислительной гидродинамики и механики твердого тела. На основе анализа чувствительности проведена верификация численных моделей, а также валидация результатов при анализе измерений инфракрасной термографии и раскрытия берегов надреза образца при нагружении.*

4. Shlyannikov V., **Sulamanidze A.**, Kosov D. Isothermal and thermo-mechanical fatigue-

crack-growth analysis of XH73M nickel alloy // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2024. V. 129. Art. id. № 104182. (WoS, Scopus Q1).

*В статье представлены экспериментальные данные о развитии трещин при изотермической усталости и взаимодействии усталости и ползучести, а также синфазных и противофазных условий термомеханического нагружения. Результаты испытаний поликристаллического сплава на основе никеля ХН73МБТЮ для всего диапазона рассмотренных условий деформирования позволили установить порядок расположения диаграмм усталостного разрушения с точки зрения ускорения роста трещины.*

5. **Sulamaniidze A.**, Shlyannikov V. Multi-physics FE-analysis and measurements for thermo-mechanical fatigue crack growth rate testing applications // Procedia Structural Integrity. 2022. V. 42. P. 412-419. (Scopus).

*Представленные результаты анализа методом конечных элементов и прямые измерения с помощью инфракрасной камеры и экстензометра выявили сдвиг по фазе между номинальными параметрами ТМУ цикла по нагрузке и температуре, и фактическими параметрами напряженно-деформированного состояния и температурой в окрестности вершины трещины.*

6. Яруллин Р.Р., Шлянников В.Н., Суламанидзе А.Г. Развитие трещины в имитационной модели диска турбины ГТД при эксплуатационных условиях нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 2. С. 203-217. (Scopus Q3, ВАК).

7. Суламанидзе А.Г., Шлянников В.Н., Яруллин Р.Р. Обоснование геометрии и условий нагружения имитационной модели диска турбины газотурбинного двигателя // Известия ВУЗов. Авиационная Техника. 2021. № 1. С. 18-26. (ВАК).

*В работах [6, 7] предложена и обоснована конфигурация и способ нагружения имитационной модели ступицы диска турбины, выполненной из жаропрочного сплава ХН73МБТЮ. Получены количественные характеристики процессов циклического разрушения в условиях, моделирующих эксплуатационные.*

Публикации содержат в сумме 106 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 Бережного Д.В. 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:

- вопрос о выборе и обосновании конечно-элементного алгоритма при численном расчете распространения фронта;
- вопрос об учете геометрической нелинейности при численных расчетах;
- вопрос о значении задания коэффициента конвекции для полученных результатов;
- замечание по поводу перетяженности диссертации для кандидатской работы и сложности для восприятия.

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

- замечание об опечатках и неудачно составленных предложениях на стр. 15, 33, 35, 42, 43, 49, 54, 185;
- замечание о неудачной формулировке предложения на стр. 23;
- пожелание по поводу указания во введении существующего для рассматриваемых задач экспериментального оборудования;
- пожелание по поводу упоминания в тексте диссертации метода граничных элементов;
- вопрос об учете выделения тепла при деформировании в рамках численного моделирования;
- вопрос об охлаждении фронта трещины в рамках численного моделирования;
- замечание об отличии геометрии охлаждающего сопла на фотографиях и на рис. 3.1.3 в рамках численного моделирования;
- замечание о корректности уравнения (3.1.64);
- замечание об обозначениях на рисунке 4.5.14.

3. Положительный отзыв ведущей организации ИМАШ УрО РАН. В отзыве отмечается, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, в частных случаях результаты, полученные автором диссертационной работы, хорошо согласуются с результатами исследований других авторов. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость – разработанный автором расчетно-экспериментальный метод анализа полей напряжений в вершине трещины при термомеханической усталости имеет перспективы применения для интерпретации результатов испытаний, проводимых в подобных условиях другими авторами, а введенный параметр разрушающего воздействия отличается рядом преимуществ по отношению к известным подходам и может быть востребован в инженерных приложениях, включая авиацию и стационарную энергетику, а также в проектных, научных и учебных организациях: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, институт прикладной физики РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова, МГТУ им. Н.Э.Баумана и на других предприятиях. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание об отсутствии упоминания моделей поврежденности, в том числе CZM-моделей;
- замечание об отсутствии обоснования шевронной формы надреза, подтвержденного ссылками на библиографические источники;
- вопрос о причине использования модели кинематического упрочнения при описании статического нагружения;

- замечание об отсутствии указаний на способ измерения перемещений при испытаниях;
- вопрос о способе и условиях получения исходной усталостной трещины;
- замечание об отсутствии в тексте диссертации обоснования выбора индукционного метода нагрева;
- вопрос о выборе параметров термоциклирования (время и количество циклов);
- замечание об отсутствии в тексте диссертации выводов по главам.

**На автореферат поступило 14 отзывов:**

1. Положительный отзыв от Богданова М.А., к.т.н., начальника управления прочности; Немцева Д.В., ведущего конструктора управления прочности, ОКБ им. А.Люльки ПАО "ОДК-УМПО", г. Москва (3 замечания);
2. Положительный отзыв от Ботвиной Л.Р., д.т.н., профессора, главного научного сотрудника лаборатории структурной механики и физики разрушения материалов ФГБУН "Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН", г. Москва (без замечаний);
3. Положительный отзыв от Великановой Н.П., д.т.н., профессора кафедры реактивных двигателей и энергетических установок ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ", г. Казань (5 замечаний);
4. Положительный отзыв от Гладштейна В.И., д.т.н., старшего научного сотрудника, заместителя научного руководителя ОАО "Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт", г. Москва (2 замечания);
5. Положительный отзыв от Казанцевой Н.В., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории аддитивных технологий ФГБУН "Институт физики металлов им. М.Н.Михеева УрО РАН", г. Екатеринбург (4 замечания);
6. Положительный отзыв от Каюмова Р.А., д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры механики ФГБОУ ВО "Казанский государственный архитектурно-строительный университет", г. Казань (3 замечания);
7. Положительный отзыв от Матвеева А.Е., к.т.н., доцента кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО "Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А.Соловьева", г. Рыбинск (4 замечания);
8. Положительный отзыв от Матвиенко Ю.Г., д.т.н., профессора, заведующего отделом прочности, живучести и безопасности машин ФГБУН "Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН", г. Москва (2 замечания);
9. Положительный отзыв от Москвичева В.В., д.т.н., профессора, научного руководителя Красноярского филиала ФГБУН "Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий", г. Красноярск (2 замечания);
10. Положительный отзыв от Никитина А.Д., к.т.н., ведущего научного сотрудника ФГБУН "Институт автоматизации проектирования РАН", г. Москва (без замечаний);
11. Положительный отзыв от Пепелюха А.И., д.т.н., доцента, доцента кафедры материаловедения в машиностроении ФГБОУ ВО "Новосибирский государственный технический университет", г. Новосибирск (4 замечания);
12. Положительный отзыв от Семенова А.С., д.ф.-м.н., профессора Высшей школы

- механики и процессов управления ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", г. Санкт-Петербург (5 замечаний);
13. Положительный отзыв от Степановой Л.В., д.ф.-м.н., доцента, заведующей кафедрой математического моделирования в механике ФГАОУ ВО "Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева", г. Самара (2 замечания);
14. Положительный отзыв от Шанявского А.А., д.т.н., профессора, начальника отдела металлофизических исследований авиационных материалов ФАУ "Авиационный регистр Российской Федерации", г. Москва, а/п Шереметьево-1 (без замечаний).

**В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:**

- вопрос по поводу трактовки параметра  $A$ , и его отличие от коэффициента плотности энергии;
- вопрос о применении коэффициента интенсивности напряжений в упругой постановке, учитывая термо-силовое деформирование, наличие пластических деформаций и проявление эффектов ползучести;
- вопрос об обосновании выбора и указании номинальных параметров цикла нагружения и объекта исследования;
- вопрос об ограничении использования упругих коэффициентов интенсивности напряжения;
- замечания об опечатках, неточностях в окончаниях, некорректных обозначениях и отсутствии расшифровки аббревиатур;
- замечание о рассмотрении всех проявлений эксплуатационных факторов, влияющих на сопротивление разрушению материалов;
- замечание об отсутствии влияния на результаты увеличения количества рассматриваемых положений длины трещины;
- вопрос о влиянии упрощения геометрии разрушенных поверхностей берегов трещины на распределения напряжений;
- вопрос об использовании модуля электромагнетизма и его вкладе в полученные экспериментальные и расчетные данные;
- замечание о степени готовности публикации всех результатов работы;
- замечание о неконкретной формулировке выводов;
- вопрос об установленных закономерностях и их проявлении;
- замечание о неполном обозначении марки материала ХН73МБТЮВД (ЭИ698-ВД);
- вопрос о деталях процесса численного моделирования и размерности представленных результатов;
- вопрос о частоте нагружения в испытаниях при гармоническом изотермическом нагружении;
- комментарий о влиянии типа нагружения на значение критического диапазона КИН;
- вопрос о процедуре нормировки величин и размерностях;
- вопрос о сомножителях в уравнении 5 автореферата;
- вопрос о разбросе результатов для сплава ХН73МБТЮ.
- вопрос об актуальности использования упруго-вязко-пластической модели материала и учета эффектов ползучести;
- вопрос о сравнении с критериями  $J$ -интеграл,  $C$ -интеграл, COD, CTOD и др.;

- вопрос об учете эффекта Элбера;
- вопрос о выборе диска ТНД для иллюстрации возможностей предложенного подхода на практике.

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 прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные** оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области фундаментальных основ прочности и пластичности, математических методов моделирования, вычислительной механики деформирования и разрушения, практических приложений по оценке несущей способности элементов конструкций; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ИМАШ УрО РАН является одним из ведущих научных центров в области исследований термического и механического воздействия на характеристики материалов и элементов конструкций, в котором активно выполняются фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру проблем теоретической, прикладной, вычислительной и экспериментальной механики, инженерным приложениям в наукоемком машиностроении. Научные школы ИМАШ УрО РАН поддерживаются грантами ведущих научных фондов и контрактами с предприятиями промышленности. Объектами исследований сотрудников ИМАШ УрО РАН выступают конструкционные и жаропрочные сплавы с учетом процессов накопления повреждений и деградации материалов с привлечением электромагнитных инструментов анализа, в том числе сплавах на основе никеля. 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 научном семинаре лаборатории микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработан** расчетно-экспериментальный метод исследования развития трещин для условий стационарного и нестационарного температурного состояния материала при циклическом деформировании, с помощью которого обосновано прогнозирование и интерпретация результатов эксперимента;

**введен** новый параметр для оценки эффектов совместного влияния нестационарного температурного поля и нелинейного циклического деформирования материала на скорость роста трещины и остаточную долговечность;

**доказано** влияние выявленных закономерностей термомеханического нагружения образца на характеристики циклической трещиностойкости жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ;

**разработан** алгоритм численного анализа циклического деформирования образца в условиях индукционного нагрева и конвективного воздушного охлаждения.

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

**доказано** преимущество использования предложенного нелинейного параметра разрушающего воздействия по сравнению с упругим коэффициентом интенсивности напряжений для задач интерпретации и прогнозирования развития трещин с учетом влияния температуры.

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** комплекс численных методов анализа напряжено-деформированного и температурного состояния по фронту трещины в упруго-пластической постановке, а также экспериментальных методов исследования скорости роста трещины при изотермическом и циклическом термомеханическом нагружении в заданном диапазоне температур;

**раскрыты** особенности распределения параметров полей напряжений, деформаций и температуры в образцах при индукционном нагреве и вынужденном воздушном конвективном охлаждении, и дано обоснование необходимости учета влияния термических напряжений на поля параметров НДС в окрестности вершины трещины при возникновении высоких градиентов температуры;

**установлены** эффекты совместного влияния режимов термического и механического воздействия на характеристики циклической трещиностойкости жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ.

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

**разработаны и внедрены** методы расчетно-экспериментального исследования количественных и качественных характеристик состояния материала при сложном термомеханическом нагружении;

**определены** количественные характеристики циклической трещиностойкости для неизотермических и изотермических условий усталостного нагружения жаропрочного сплава ХН73МБТЮ и дано их обобщение в форме уравнения скорости роста трещины, удобного к применению на стадии выбора материала и обоснования оптимальных режимов работы тепловых машин;

**представлено** приложение развиваемого подхода для оценки остаточной долговечности элемента диска турбины газотурбинного двигателя с эксплуатационным повреждением.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ:** результаты получены на сертифицированном испытательном оборудовании с использованием поверенных высокоточных средств измерений и современных методов обработки экспериментальных данных;

**теория** построена на известных и проверяемых данных, которые в частных случаях согласуются с опубликованными ранее результатами других исследований по теме диссертации в смежных областях знаний;

**идея базируется** на анализе результатов численного и экспериментального исследования плотности энергии деформации в окрестности вершины трещины, свойствах конструкционного материала и характеристиках трещиностойкости при сложном термомеханическом нагружении;

**использованы** апробированные модели материала и численные методы;

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных численных и экспериментальных данных;

**Личный вклад соискателя состоит в анализе методических вопросов проведения численных и экспериментальных исследований, выполнении комплекса численных расчетов, обработке результатов расчетов, проведении всего комплекса экспериментальных исследований, обобщении результатов испытаний, формулировке и обосновании параметра разрушающего воздействия, а также в оценке остаточной долговечности на основе предложенного параметра разрушающего воздействия для изотермических и неизотермических условий проведенных испытаний образцов из никелевого сплава ХН73МБТЮ.**

**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 трещин для условий изотермического и нестационарного температурного состояния материала при циклическом механическом нагружении и обоснование прогнозирования и интерпретации результатов в терминах нового параметра разрушающего воздействия.

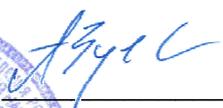
На заседании 29 апреля 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Суламанидзе А.Г. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человека, из них 9 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 – 16, против – 0, не проголосовало – 0.

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

 / Матвеев В.П.

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

  
 / Зуев А.Л.

30 апреля 2024 г.

М.П.