

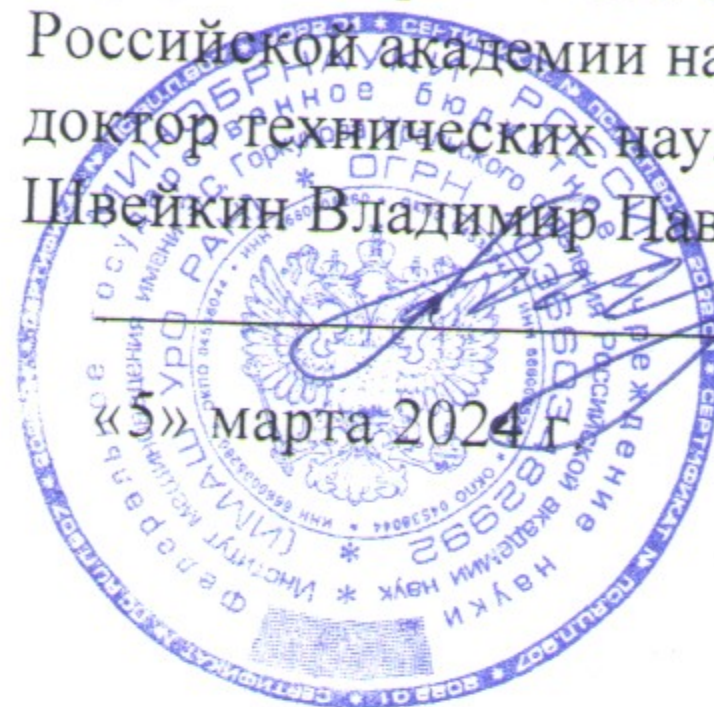
Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ
ИМЕНИ Э.С. ГОРКУНОВА
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИМАШ УрО РАН)

Комсомольская ул., 34, г. Екатеринбург, 620049
Тел.: (343) 374-47-25, факс: (343) 374-53-30
E-mail: ges@imach.uran.ru; http://www.imach.uran.ru
ОКПО 04538044, ОГРН 1036603482992
ИНН/КПП 6660005260/667001001

14.03.2024 № 16347/02-3479-28

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУН
"Институт машиноведения им. Э.С.
Горкунова Уральского отделения
Российской академии наук"
доктор технических наук, доцент
Швейкин Владимир Павлович



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук

на диссертацию Суламанидзе Александра Гелаевича «Анализ и закономерности развития трещин усталости при изотермическом и термомеханическом нагружении в жаропрочном сплаве», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Суламанидзе Александра Гелаевича является комплексным исследованием, которое включает численный анализ напряженно-деформированного и теплового состояния и экспериментальное изучение характеристик циклической трещиностойкости жаропрочного сплава при изотермическом и термомеханическом нагружении в неоднородных переходных полях высокой температуры. Определяющей в современном наукоемком машиностроении является тенденция исследования характеристик сопротивления деформированию и разрушению конструкционных материалов в условиях приближенных к эксплуатационным с учетом влияния условий нагружения на возникновение и процессы различных химических, термических и структурных превращений. Исследования характеристик сопротивления материала циклическому разрушению в условиях высокотемпературного нагружения традиционно проводятся в рамках стандартных испытаний в однородном и постоянном поле температуры. Однако, экспериментальное исследование скорости роста трещин усталости в условиях переходных температурных полей связано со сложностью учета термических напряжений или обеспечением однородности температуры. Известный из литературы опыт изучения развития трещин в термомеханических условиях показывает, что актуальной является задача комплексного исследования, включающего эксперимент, численный анализ напряженно-деформированного состояния и интерпретацию результатов по скорости роста трещин с учетом эффектов переменного температурного и напряженного состояния материала. Автор диссертации представил разработанный расчетно-экспериментальный метод исследования развития трещин для условий

изотермического и неоднородного переходного температурного состояния материала при циклическом механическом нагружении, предложил в качестве параметра сопротивления разрушению нелинейный параметр разрушающего воздействия и обосновал прогнозирование и интерпретацию результатов по скорости роста трещины на основе введенного параметра.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, и списка использованной литературы из 249 наименований. Общий объем диссертации состоит из 226 страниц, диссертация содержит 86 рисунков и 14 таблиц.

Во введении сформирована область исследования и ее актуальность, описана методология реализации работы и верификации результатов, сформулирована научная и практическая значимость решаемых задач.

В первой главе на основе тщательного анализа литературы определен круг актуальных вопросов проведения испытаний и интерпретации результатов в условиях повышенной температуры, а также прогнозирования развития трещин при термомеханической усталости. Проанализированы известные теоретические подходы и значимые практические результаты в порядке становления и развития экспериментальной и вычислительной механики деформирования и разрушения. Представлены методы к определению характеристик сопротивления деформированию и разрушению материалов при циклическом нагружении в условиях нестационарного теплового состояния. Основываясь на проведенном литературном обзоре, сформулированы цели и поставлены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе изложена методика экспериментальной части исследования скорости роста трещины в образце с односторонним надрезом при сложном термомеханическом и изотермическом, циклическом и монотонном нагружении. Термомеханическое нагружение реализуется при механическом нагружении или разгрузке совместно с протекающим индукционным нагревом или вынужденным воздушным конвективным охлаждением. Представлены экспериментальные данные в форме кривых монотонного растяжения гладких образцов из жаропрочного сплава ХН73МБТЮ в широком диапазоне температуры, а также результирующие значения основных механических характеристик исследуемого сплава. Описаны выявленные в эксперименте температурные особенности поведения материала. Представлена структура жаропрочного сплава ХН73МБТЮ, полученная на сканирующем электронном микроскопе. Во второй главе изложен разработанный автором алгоритм интерпретации характеристик роста трещин при термомеханическом нагружении с учетом формы цикла деформирования.

В третьей главе изложена методика и представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния в образце с односторонним надрезом при изотермической усталости и термомеханической усталости по параметрам цикла проведенных испытаний на скорость роста трещины для диапазона экспериментальных значений длин трещин. Автором разработан и реализован алгоритм нестационарных мультифизических сопряженных расчетов, воспроизводящий взаимодействие механического нагружения и индукционного нагрева и вынужденного конвективного охлаждения в проведенных испытаниях. В порядке реализации этого алгоритма построены численные модели расчетных областей для электромагнитного анализа, вычислительной гидродинамики и нелинейной механики деформируемого твердого тела. Обеспечение установившегося решения достигнуто верификацией каждой

из трех представленных численных моделей методом анализа чувствительности изменения результатов к изменению характеристик сетки элементов модели. Проведена валидация моделей путем сравнения измеренных экспериментально и численно полученных петель раскрытия берегов надреза. Выполнен представительный набор 3D-распределений температуры, напряжений и деформаций по фронту трещины в функции времени цикла деформирования. Численно оценен и показан вклад термических напряжений в общее напряженно-деформированное состояние образца в вершине трещины при экспериментально реализованном синфазном термомеханическом нагружении.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик циклической трещиностойкости сплава ХН73МБТЮ при нагружении в изотермических и переходных температурных полях в диапазоне температур до 650°C. Представлен детальный анализ и закономерности влияния тепловых и механических факторов на скорость роста трещины и сингулярность параметров напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины. Установлена существенная разница в скорости роста трещины между синфазным и противофазным термомеханическим циклом нагружения, а также гармоническим и трапециевидным циклами нагружения при повышенной температуре. На основе результатов экспериментов и соответствующих численных расчетов введен нелинейный параметр разрушающего воздействия. На его основе проведена интерпретация результатов испытаний по скорости роста трещины, а также представлены результаты прогнозирования распространения трещины. Установлена зависимость скорости роста трещины от параметра разрушающего воздействия в виде степенной функции. Прогнозирования долговечности показало хорошее соответствие экспериментальным значениям остаточной долговечности. В качестве практического приложения в диссертационной работе рассмотрено высокотемпературное усталостное распространение трещины в элементе диска турбины на основе методов имитационного моделирования. Разработана и реализована геометрия и способ нагружения имитационной модели ступицы диска турбины, выполненной из сплава ХН73МБТЮ. Проведена оценка остаточной долговечности диска турбины с начальным повреждением в виде полуэллиптической трещины.

В разделе «**Основные выводы**» сформулированы основные выводы диссертации.

Научная новизна и теоретическая значимость работы заключается в том, что

1. в диссертации разработан расчетно-экспериментальный метод анализа развития трещин при термомеханическом циклическом нагружении с учетом вариации сдвига фаз нагрузки и температуры;
2. на основе реализованного численного алгоритма сопряженного мультифизического расчета выявлено влияние механического нагружения в неоднородном переходном поле температуры на поля напряжений в вершине трещины;
3. введен параметр разрушающего воздействия, на основе которого проведена интерпретация скорости роста трещины и смоделировано распространение трещины в условиях стационарного и нестационарного теплового состояния материала при циклическом нагружении;
4. установлены и описаны закономерности влияния термомеханического деформирования на характеристики циклической трещиностойкости жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ.

Практическая значимость полученных результатов относится к приложениям в инженерной практике, включая авиацию и стационарную энергетику. Полученные экспериментальные результаты и разработанная методика предоставляют возможность количественной оценки эффектов термомеханического нагружения на характеристики остаточной долговечности элементов конструкции тепловых машин. (сама диссертационная работа выполнена в Институте энергетики и перспективных технологий федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»).

Полученные результаты будут востребованы в проектных организациях, в научно-исследовательской деятельности таких учреждений как 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, в учебной работе при создании новых спецкурсов в таких вузах как МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана и других.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации не вызывают сомнений, поскольку они получены с учетом валидации на основе экспериментальных измерений и верификации численных моделей на основе анализа чувствительности, с использованием корректных математических моделей и надежных, хорошо зарекомендовавших себя вычислительных конечно-элементных пакетов. В частных случаях результаты, полученные автором диссертационной работы, хорошо согласуются с результатами исследований других авторов.

Основные результаты диссертации отражены в 7 публикациях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов диссертаций, и журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science и Scopus. Результаты диссертационного исследования были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также на научных семинарах. Автореферат соответствует содержанию диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

Несомненным преимуществом диссертационной работы являются 1) большой объем выполненных на современном оборудовании новых экспериментов для жаропрочного сплава в условиях постоянных и переходных неоднородных полей температуры 2) связанный с ним большой объем вычислительных экспериментов, впервые позволивших корректно учесть влияние условий нагрева и охлаждения на напряженное состояние образца и 3) представление этапов моделирования распространения трещины, отличающегося доступностью и ориентированностью для использования в инженерной практике.

По тексту диссертации имеются следующие вопросы, замечания и комментарии.

- 1) В литературном обзоре не уделено место моделям поврежденности, в том числе CZM-моделям.
- 2) Отсутствуют убедительные обоснования выбора шевронной формы надреза, подтвержденные ссылками на библиографические источники (с.55 текста диссертации).
- 3) Не ясно зачем использована модель кинематического упрочнения при описании статического нагружения.

- 4) В п. 2.4 описаны возможные способы измерения перемещений при испытаниях, но не указано каким способом пользовался автор.
- 5) Из текста диссертации не ясно каким способом и при каких условиях наводилась исходная усталостная трещина.
- 6) Отсутствуют убедительные обоснования выбора индукционного метода нагрева образцов, так как именно это привело к многим проблемам для оценки динамики температурных полей в области развития трещины.
- 7) Не ясно из каких соображений выбирались параметры термоциклирования (время и количество циклов).
- 8) Отсутствуют выводы по главам.

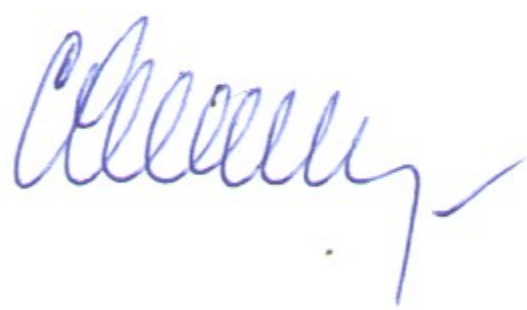
Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне, содержит новые результаты и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела, а её автор, Суламанидзе Александр Гелаевич, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук.

Результаты диссертации были доложены 27 февраля 2024 года на научном семинаре лаборатории микромеханики материалов федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук" и получили положительные отзывы специалистов.

Настоящий отзыв на диссертацию Суламанидзе Александра Гелаевича рассмотрен и одобрен 29 февраля 2024 года на заседании Ученого совета федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук" (Протокол № 1).

Зав. лабораторией микромеханики материалов, д.т.н.

Смирнов Сергей Витальевич




/ С.В. Смирнов/

620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

Тел. +7 (912) 631-11-26

E-mail: svb@imach.uran.ru

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Ученый секр.  Привалова В.В.