

ОТЗЫВ

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

Циклические изменения нагрузки и температуры возникают при эксплуатации высоконагруженных деталей тепловых машин, узлов трения, компонентов микроэлектроники и других устройств. В условиях сложного теплообмена и быстрых скоростей изменения температуры возникают термические напряжения из-за неоднородного распределения температуры в объеме детали. Одним из важных направлений механики деформирования и разрушения является разработка научно обоснованных и практически-ориентированных модельных представлений и формирование базы данных для прогнозирования ресурса ответственных элементов конструкций подверженных термомеханическому нагружению в эксплуатации. Составляющей этого комплекса работ являются весьма затратные экспериментальные и численные исследования в широком диапазоне сочетаний циклических изменений температуры и механического нагружения. Постановка и реализация подобного состава работ доступна очень ограниченному кругу исследовательских коллективов в мире.

В этой связи представленная А. Г. Суламанидзе диссертационная работа является актуальной для прогнозирования остаточного ресурса дисков турбомашин в силу рассматриваемых условий совместного механического и температурного воздействия на материал, а также методов испытаний, численного анализа напряженно-деформированного состояния и интерпретации результатов по скорости роста трещин с учетом эффектов переменного температурного и напряженного состояния материала.

В первой главе диссертации автором представлен литературный обзор теоретических основ, модельных представлений, особенностей численных исследования и экспериментального определения характеристик сопротивления деформированию и разрушению материалов при циклическом нагружении в условиях повышенных температур и термомеханической усталости.

Предметом литературного обзора выступили наиболее известные теории линейной и нелинейной механики разрушения, а также параметры сопротивления разрушению и различные классы моделей распространения трещины в термомеханических условиях циклического нагружения. Методы

численного моделирования напряженно-деформированного состояния рассмотрены в приложении к особой области окрестности вершины трещины.

Подробный анализ литературных данных позволил автору диссертации сформулировать цель и задачи работы, которые заключались в разработке расчетно-экспериментального метода исследования развития трещин для условий изотермического и нестационарного температурного состояния материала при циклическом механическом нагружении и обосновании прогнозирования и интерпретации результатов в терминах параметра разрушающего воздействия.

Вторая глава описывает методику экспериментальной части комплексного термомеханического исследования скорости роста трещины. Представлена общая программа циклических изотермических и термомеханических испытаний и определены диапазоны реализованных в исследовании номинальных параметров цикла для нагрузки и температуры. Объектом экспериментальных и численных исследований выбран образец с односторонним надрезом. Также представлены экспериментально определенные основные механические характеристики и микроструктура сплава на основе никеля ХН73МБТЮ при монотонном нагружении.

В главе дано описание используемого уникального испытательного комплекса и средств измерений для проведения экспериментов при усталости, взаимодействии усталости и ползучести и термомеханическом нагружении. Указаны характеристики компонентов испытательной системы и принципов их работы. Детально описаны методы определения длины трещины и тарировки задействованных автором устройств дистанционного измерения и контроля температуры по характеристикам состояния материала на поверхности испытательных образцов. Глава завершается изложением разработанного автором алгоритма интерпретации характеристик роста трещин при термомеханическом нагружении.

Автором уместно указана последовательность использования содержания этой главы в качестве исходных данных для последующих разделов работы. Таким образом, завершено формирование методических основ разработанного расчетно-экспериментального метода исследования развития трещин при термомеханической усталости с учетом сдвига фаз нагрузки и температуры.

Содержание **третьей главы** диссертации включает в себя постановку и результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния в образце с односторонним надрезом, что является частью комплексного расчетно-экспериментального исследования. Приведены разработанные автором метод и алгоритм численного сопряженного

мультифизического анализа циклического механического нагружения при нестационарном температурном состоянии материала в условиях индукционного нагрева и конвективного воздушного охлаждения.

Для обеспечения установившегося решения, автором проведена верификация численных моделей на основе анализа чувствительности и дана оценка результатов расчетов в сопряженной мультифизической постановке в сравнении с экспериментально измеренными данными о температуре и перемещениях в условиях сложных теплообменных процессов термомеханического нагружения. Сформулированы краевые задачи взаимосвязанных этапов численного моделирования электромагнетизма, вычислительной гидродинамики и нелинейной механики. Автор представил оценки погрешности вычислений в количественном и качественном виде, что позволяет дать положительную оценку достоверности полученных результатов.

Далее автором показаны и проанализированы результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния, в результате чего установлены особенности распределений упруго-пластических полей напряжений по фронту трещины под действием неоднородных переходных полей температуры. Выявлены различия в поведении параметров напряженно-деформированного состояния между синфазным и противофазным профилем изменения нагрузки и температуры в цикле нагружения.

Таким образом, автором корректно выполнена серия расчетов, моделирующих условия проведенных испытаний с учетом температурной зависимости основных свойств материала и задействованных способов нагрева и охлаждения. Полученные результаты являлись входными данными для последующей формулировки и определения введенного автором нелинейного параметра разрушения.

Четвертая глава диссертации объединяет экспериментальные и расчетные данные для интерпретации скорости роста трещины в терминах линейного и нелинейного параметра сопротивления разрушения, а также прогнозирования распространения трещины.

В начале главы автором показано, что условия неоднородных переходных полей температуры влияют на величину упругого коэффициента интенсивности напряжений, как по мере роста трещины, так и в пределах времени отдельных циклов термомеханического нагружения. Дана оценка влияния типов термомеханического циклического деформирования путем сравнения диаграмм усталостного разрушения для гармонического и трапецеидального цикла изотермической усталости, а также профилей синфазного и противофазного термомеханического нагружения.

Сформирован порядок расположения диаграмм усталостного разрушения с точки зрения ускорения роста трещины: взаимодействие усталости и ползучести при температуре 650°C, изотермическая усталость при температуре 650°C, синфазный цикл термомеханического нагружения и противофазный цикл термомеханического нагружения, изотермическая усталость при температуре 400°C, изотермическая усталость при температуре 23°C.

На основе численных данных сформулирован новый нелинейный параметр разрушающего воздействия, а также дано экспериментальное обоснование его приложений. Параметр основан на корреляции нормированной накопленной в вершине трещины плотности энергии деформации и в порядке интерпретации скорости роста трещины имеет смысл обобщенной характеристики циклической трещиностойкости для условий гармонической усталости и термомеханического синфазного и противофазного нагружения. Проведенное прогнозирование распространения трещины показало его применимость в оговоренном диапазоне параметров цикла по нагрузке и температуре. В качестве практического приложения в завершении четвертой главы рассмотрено распространение усталостной трещины в имитационной модели ступицы диска турбины авиационного двигателя с начальным дефектом в виде полуэллиптической трещины.

В порядке дискуссии можно высказать следующие замечания и комментарии по тексту диссертации.

1. В последних версиях ПП ANSYS реализовано несколько подходов к реализации механизма раскрытия трещины, например, так называемый Extended Finite Element Method, позволяющий моделировать рост трещины без перестройки первоначальной сетки. Из диссертационной работы не совсем понятно, какой конечно-элементный алгоритм использует автор при численном расчете распространения фронта трещины внутри конструкции и не обоснован его выбор.

2. В диссертационной работе отмечено, что в алгоритме расчета имеется возможность проведения геометрически нелинейного расчета, однако приведенные при этом кинематические соотношения записаны в линейной форме (соотношения (3.1.63)). Так учитывалась ли геометрическая нелинейность при дальнейших расчетах?

3. Насколько можно быть уверенным в точном задании коэффициента конвекции при расчете нестационарных температурных полей в образце достаточно сложной геометрии при его обдуве? Или при использовании Вашего подхода к определению скорости роста трещины это не является принципиальным?

4. Диссертация кажется перетяжеленной для кандидатской работы и несколько сложна в восприятии. Может быть, следовало бы часть общеизвестных соотношений и некоторые результаты разместить в приложении?

Представленные оппонентом замечания не снижают общую положительную оценку выполненной А.Г. Суламанидзе диссертации. Автореферат в полной мере отражает содержание представленной к защите диссертационной работы.

В целом работа А.Г. Суламанидзе демонстрирует обоснованную структурную взаимосвязь выполненных разделов в последовательности экспериментальных и расчетных этапов работы, в рамках которых получены новые теоретические, численные, испытательные и методические результаты. На этой основе, заявленные автором элементы научной новизны, положения, выносимые на защиту и выводы по достижению цели работы убедительно аргументированы и подтверждены соответствующими разделами текста диссертации. Достоверность полученных результатов подтверждается проведенной верификацией численных моделей, а также валидацией в рамках качественного и количественного сравнения отклонения полученных численных данных от экспериментальных измерений и хорошим согласием с известными литературными данными других авторов.

Диссертация А. Г. Суламанидзе является решением задачи разработки подхода к исследованию и прогнозированию скорости развития трещин в материалах при нестационарном температурном состоянии и циклическом механическом нагружении на основе экспериментов, численного мультифизического сопряженного анализа и параметра разрушающего воздействия, имеющего существенное значение для наукоемкого машиностроения при разработке и эксплуатации высоконагруженных элементов тепловых машин, узлов трения и компонентов микроэлектроники. К практическим приложениям результатов работы А. Г. Суламанидзе относится метод и результаты имитационного моделирования распространения трещины в элементе ступицы диска турбины с эксплуатационным повреждением.

Диссертация хорошо организована по структуре представления и взаимосвязи разделов и последовательно изложена. Содержание диссертации носит завершённый характер, текст аккуратно оформлен, основные результаты работы опубликованы в 7 ведущих отечественных и зарубежных изданиях, четыре из которых соответствуют первому квартилю мировой базы данных.

На основании комплексного использования современного уникального испытательного оборудования, построенного на принципах электромагнитных, теплообменных и механических процессов, а также контактных и дистанционных средств измерений, реализованного численного моделирования напряженного и теплового состояния, и полученных обобщенных результатов, работа А. Г. Суламанидзе заслуживает высокой оценки и имеет хорошие перспективы продолжения в части учета вклада дополнительных физических явлений в характеристики циклической трещиностойкости конструкционных металлических жаропрочных сплавов.

Таким образом, оппонируемая диссертация соответствует по содержанию и достигнутым в ней результатам паспорту специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела, а её автор, Суламанидзе Александр Гелаевич заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук.

«09» апреля 2024 г.

Официальный оппонент



Бережной Д.В.

Первый проректор -
проректор по научной
деятельности,
профессор, д.ф.-м.н.



Таюрский Д.А.

Официальный оппонент Бережной Дмитрий Валерьевич,

профессор кафедры теоретической механики Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", доктор физико-математических наук, доцент.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Телефон: +7 (917) 297-97-96

E-mail: berezhnoi.dmitri@mail.ru