

На правах рукописи



Суламанидзе Александр Гелаевич

**АНАЛИЗ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН УСТАЛОСТИ ПРИ
ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В
ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ**

1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в Институте энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань.

Научный руководитель: **Шлянников Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **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.

Федулов Борис Никитович, доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор кафедры теории пластичности ФГБОУ ВО "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова", г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук" (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург.

Защита состоится **29 апреля 2024 г.** в 10:30 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » марта 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

 / А.Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Стремление улучшить эффективность и экологические характеристики тепловых машин приводит к ужесточению эксплуатационных условий, совместно с внедрением более сложных технологий. Повышение требований к характеристикам материалов, воспринимающих циклическое высокотемпературное нагружение при переходных полях температуры, предопределяет исследование характеристик сплавов в условиях приближенных к эксплуатационным.

Традиционно для корректного учета характеристик сопротивления материала деформированию и разрушению в условиях высокотемпературного нагружения проводятся стандартные испытания при монотонном растяжении или сжатии, малоциклового (МЦУ) и многоциклового усталости (МнЦУ), а также испытания по определению скорости роста трещины усталости (СРТУ) в изотермических условиях. Современная практика изотермических испытаний по определению характеристик циклической трещиностойкости конструкционных материалов основана на стандартах [ASTM E647-00, ASTM E740-03, ASTM E1457-07, ASTM E2760-10, РД 50-345-82]. Однако, эти стандарты не регламентируют методику исследования развития трещин в условиях переходных температурных полей. Известные методы интерпретации скорости роста усталостной трещины и прогнозирования остаточной долговечности материалов и элементов конструкций в практических приложениях ограничены узким кругом условий и требуют проведения серии длительных и затратных испытаний.

Несмотря на уже накопленный опыт изучения развития трещин в термомеханических условиях, актуальной является задача комплексного расчетно-экспериментального исследования, включающего разработку методики испытаний, численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) и интерпретацию результатов по скорости роста трещин с учетом эффектов переменного температурного и напряженного состояния конструкционного материала.

Целью диссертационной работы является разработка расчетно-экспериментального метода 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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать расчетно-экспериментальную методику исследования роста трещин в условиях термомеханической усталости при синфазной и противофазной форме цикла деформирования.
2. Выполнить расчетно-экспериментальные исследования влияния вида нагружения и температуры на характеристики циклической трещиностойкости жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ.
3. Разработать метод и реализовать алгоритм численного сопряженного мультифизического анализа циклического механического нагружения при

нестационарном температурном состоянии материала в условиях индукционного нагрева и конвективного воздушного охлаждения.

4. Выполнить параметрические исследования и сформировать структуру полей напряженно-деформированного состояния в вершине трещины для условий ТМУ с учетом сдвига фаз.

5. Ввести и обосновать параметр разрушающего воздействия для интерпретации и прогнозирования эффектов совместного влияния нестационарного теплового состояния и нелинейного циклического деформирования материала на скорость роста трещины.

6. Представить оценку развития трещин в диске турбины авиационного двигателя на основе имитационного моделирования.

Научная новизна работы состоит в:

- разработке расчетно-экспериментального метода исследования развития трещин при термомеханической усталости с учетом сдвига фаз нагрузки и температуры;

- анализе эффектов циклического механического нагружения при нестационарном распределении температур на напряженно-деформированное состояние в вершине трещины на основе реализованного численного алгоритма сопряженного мультифизического расчета;

- формулировке и обосновании параметра разрушающего воздействия для интерпретации скорости роста трещины и остаточной долговечности в условиях стационарного и нестационарного теплового состояния материала при циклическом нагружении;

- установлении закономерностей влияния термомеханического деформирования на характеристики циклической трещиностойкости жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ.

Основные положения, выносимые защиту:

– Моделирование условий экспериментального исследования развития трещин при термомеханическом деформировании состоит в разработке метода и реализации алгоритма численного сопряженного мультифизического анализа циклического механического нагружения при нестационарном температурном состоянии материала в условиях индукционного нагрева и конвективного воздушного охлаждения. Последовательность взаимосвязанных численных расчетов включает модули электромагнетизма, вычислительной гидродинамики и нелинейной механики деформирования;

– Верификация и валидация расчетов в сопряженной мультифизической постановке включает анализ чувствительности в сложных теплообменных процессах термомеханического нагружения с привлечением тепловизионной техники и проводится для обеспечения установившегося решения, корректности численных моделей с учетом топологии сетки, шагов интегрирования по времени и граничных условий;

– Результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния с учетом температурной зависимости основных свойств материала устанавливают соответствие упруго-пластических полей по фронту трещины стадиям циклического деформирования и выявляют различия для синфазного и противофазного профилей вариации нагрузки и температуры;

– Прогнозирование остаточной долговечности в условиях стационарного и нестационарного температурного состояния материала при циклическом нагружении включает формулировку и экспериментальное обоснование приложений нового нелинейного параметра разрушающего воздействия. Данный параметр основан на текущих и предельных значениях 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.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в формулировке и обосновании нового параметра разрушающего воздействия для условий нестационарного температурного состояния материала при циклическом нагружении. Значимость экспериментального плана в работе составляют установленные закономерности влияния термомеханического нагружения на характеристики циклической трещиностойкости жаропрочного сплава на никелевой основе ХН73МБТЮ при вариации сдвига фаз температуры и нагрузки в цикле, профилей температуры и деформаций. Значимость методического плана состоит в разработке и реализации алгоритма численно-экспериментального исследования развития трещин в условиях циклического нагружения при нестационарном температурном состоянии образцов. Найденные в результате численных расчетов и экспериментальных исследований распределения параметров НДС, параметра разрушающего воздействия трещины для различных условий термомеханического деформирования имеют обобщенный характер, пригодный для широкого использования. Практическая значимость настоящей работы состоит в обосновании подхода для количественной оценки эффектов термомеханического нагружения на характеристики остаточной долговечности элементов турбомашин.

Достоверность полученных результатов подтверждается валидацией и верификацией численных моделей на основе предложенного алгоритма анализа чувствительности вариации выборки данных. Установлено и подтверждено взаимное соответствие результатов численных расчетов, модельных представлений и данных экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований согласуются с известными литературными данным.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, состояло в анализе методических вопросов проведения численных и экспериментальных исследований, выполнении комплекса численных расчетов электромагнетизма, вычислительной гидродинамики и механики твердого тела в изотермической и неизотермической упругой и упруго-пластической постановке, 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 термомеханических условий проведенных испытаний образцов из никелевого сплава ХН73МБТЮ.

Реализация работы. Результаты работы представлены в тематике научных исследований Лаборатории прочности и Испытательной лаборатории Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

Работа поддерживалась грантами РФФИ 20-38-70030_Стабильность, РФФИ 17-19-01614, РФФИ 20-58-53018 ГФЕН_a, РФФИ 23-19-00158.

Апробация работы. Результаты работы представлялись на итоговых научных конференциях КазНЦ РАН (Казань, 2020-2023гг.); на XIII всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург 21 – 25 августа 2023г.), the 23st European Conference of Fracture (ECF23) (Madeira, Portugal June 27 – July 1, 2022), the 6th International Conference on Structural Integrity and Durability (ICSID 2022) (Dubrovnik, Croatia September 20 – 23, 2022), the 6th IJFatigue and FFEMS Joint Workshop “Characterisation of Crack/Notch TCI Fields” (CCTF) (Dubrovnik, Croatia April 11 – 13, 2022), 21st International Conference on Fracture and Damage Mechanics 12-14 September 2023, London, UK, International Conference FATIGUE 2024 (Jesus College, Cambridge, UK, 19-21 June 2024).

В полном объеме диссертация докладывалась в Институте энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН), в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, на кафедре Математического моделирования систем и процессов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», на кафедре Экспериментальной механики и конструкционного материаловедения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Публикации. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 10 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка использованной литературы. Материал изложен на 226 страницах, содержит 86 рисунков, 14 таблиц, список литературы состоит из 249 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 литературного обзора определяется круг актуальных вопросов по термомеханической усталости, который представлен в последующем изложении диссертации. Последовательно изложены наиболее значимые для темы текущей диссертации практические и теоретические результаты в хронологическом порядке становления и развития экспериментальной и вычислительной механики деформирования и разрушения. Представлен обзор известных подходов к определению характеристик сопротивления деформированию и разрушению материалов при циклическом нагружении в условиях повышенных температур. Дан анализ известных моделей прогнозирования долговечности применительно к условиям термомеханического нагружения.

Основываясь на литературном анализе, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе изложена разработанная методика экспериментальной части работы. Приведен состав сформированного уникального испытательного комплекса и описан порядок определения основных механических характеристик и скорости роста трещины жаропрочного сплава ХН73МБТЮ в условиях изотермического и неизотермического циклического нагружения. Весь комплекс экспериментальных исследований выполнен на серво-гидравлической испытательной установке Zwick/Roell HA-100.

Объектом исследований по развитию трещин в диссертационной работе выступал образец с односторонним надрезом (SENT), представленный на Рис. 1, где $W = 20$ мм – ширина образца, $B = 7$ мм – толщина образца.

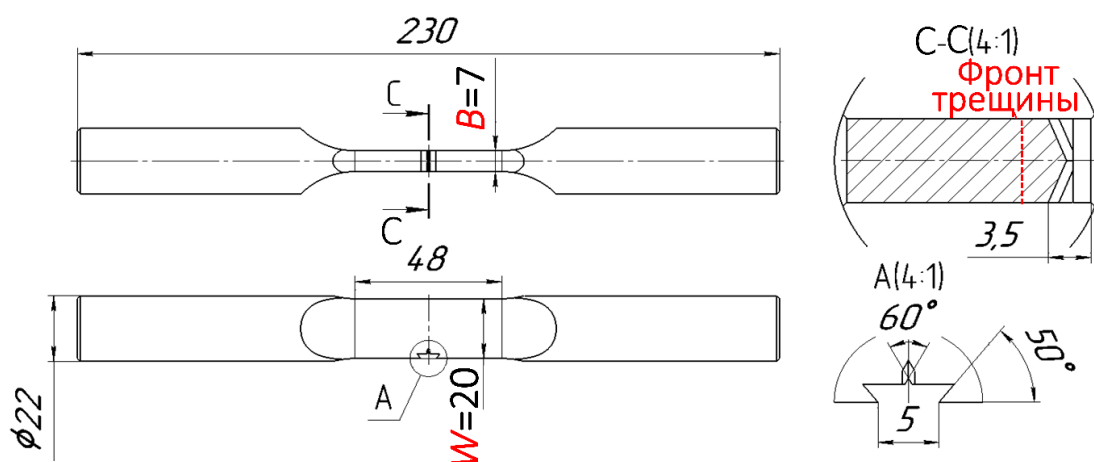


Рисунок 1. SENT образец для испытаний на скорость роста трещины

В условиях ТМУ температура по заданному циклу треугольной формы варьировалась от 400°C до 650°C в синфазном (СЦ, моменты максимума нагрузки и температуры совпадают) и противофазном (ПЦ, моменты максимума нагрузки и минимума температуры совпадают) циклах нагружения.

Период цикла нагрев-охлаждение и нагружение-разгрузка выбран равным $\phi = 60$ с. Нагрев от 400°C до 650°C в течении 30 с осуществлялся с помощью четырехвиткового индуктора, конструкция которого состоит из витков прямоугольной формы. Последующие 30 с образец подвергался вынужденному воздушному конвективному охлаждению (ВВКО) от значения номинальной температуры 650°C до 400°C, путем подачи струи воздуха на рабочую поверхность образца через два сопла. Индукционный нагрев (ИН) и ВВКО позволили реализовать высокие скорости изменения температуры в ТМУ цикле (8.3 °C/мин), по сравнению с возможностями скорости нагрева в закрытых печах.

Направленный на рабочую поверхность образца пирометр контролировал поддержание постоянного значения и изменение по заданному треугольному циклу номинальной температуры в испытаниях SENT образцов на скорость роста трещины. Испытания SENT образцов с предварительно выращенной трещиной обеспечили получение исходной информации в виде зависимостей измеренной длины трещины a от соответствующего значения накопленных циклов нагружения N .

В третьей главе представлены результаты численного моделирования НДС в SENT образце при изотермической усталости (ИУ) и ТМУ по параметрам проведенных испытаний на скорость роста трещины для значений длины трещины $a = 5, 10, 15$ мм.

В ТМУ условиях, вследствие неоднородности температуры и теплового расширения в объеме образца, установлен вклад термических напряжений в общее и локальное НДС.

В соответствии с реализованным алгоритмом нестационарных мультифизических сопряженных расчетов выполнен численный анализ ТМУ нагружения, воспроизводящий ИН и ВВКО в проведенных испытаниях. Для этой цели использованы вычислительные модули ANSYS 2021R1 Maxwell, Fluent и Transient Structural.

Численные модели, построенные в симметричной постановке показаны на Рис. 2. Согласно алгоритму сопряженного расчета (Рис. 3), полученные в модуле Maxwell3D на этапе электромагнитного анализа удельные тепловые потери от ИН передавались поэлементно в модуль вычислительной гидродинамики Fluent, где интерполировались в ячейках модели и распределялись в объеме образца. В полупериоде охлаждения на образец подавался поток струи воздуха из сопел и определялось температурное состояние с учетом ВВКО. Поля температуры после каждого временного шага передавались в модуль Transient Structural, где НДС образца определялось при совместном воздействии номинального механического нагружения и отраженных в температурном поле переходных теплообменных процессов.

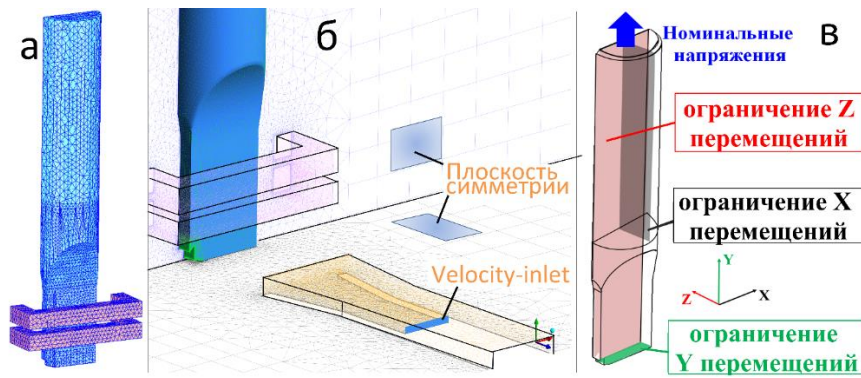


Рисунок 2. Численные модели на этапах (а) электромагнитного анализа, (б) вычислительной гидродинамики и (в) нелинейной механики твердого тела

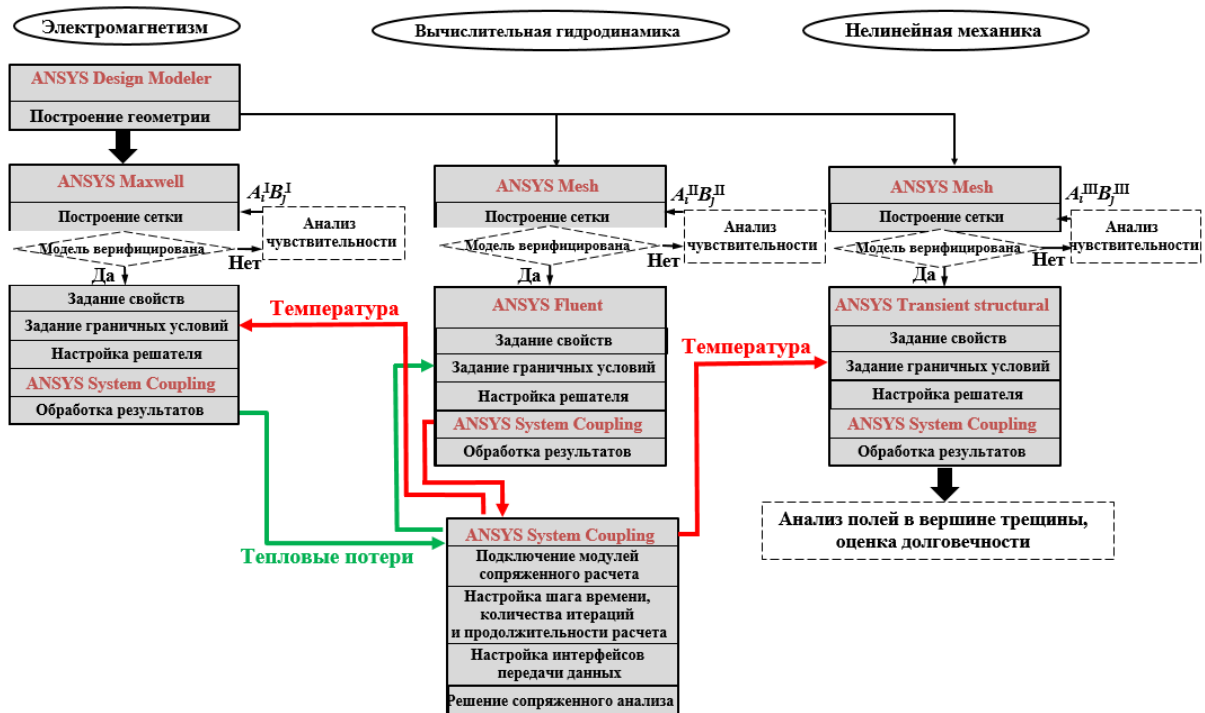


Рисунок 3. Алгоритм сопряженного мультифизического численного анализа ТМУ нагружения

Свойства материала и среды задавались кусочно-линейными функциями от температуры, а упруго-пластическое поведение – моделью нелинейного изотропного или кинематического упрочнения. Для этой цели экспериментально определены константы используемых конституционных уравнений в диапазоне температур 23°C-700°C.

Каждая из трех представленных численных моделей на отдельных этапах проходила процедуру верификации методом анализа чувствительности характеристик сетки элементов модели, которая заключается в количественном анализе результатов расчета по оговоренным переменным параметрам, относительно изменения характеристик сетки элементов модели. Таким образом был проведен расчет для каждого варианта конфигурации параметров сетки A_i и B_j . Параметры A_i и B_j являются

характеристиками сетки элементов (размеры и относительная ориентация) во взаимосвязи со значениями градиентов полей различной природы, а также со свойствами материала образца. Принято, что обеспечивающими верификацию численной модели считаются параметры, для которых наблюдается прекращение систематического изменения отслеживаемого результата расчета, несмотря на изменение параметров расчетной модели. Критерий чувствительности S_{ij} (1) является отношением относительного изменения отслеживаемого результата расчета S_{ij}^o (2) к относительному изменению параметров сетки численной модели S_{ij}^{in} (3). Критерий чувствительности определен как

$$S_{ij} = \frac{S_{ij}^o}{S_{ij}^{in}}, \quad (1)$$

$$S_{ij}^o = \frac{|I_{(i+1)j} - I_{ij}|}{I_{ij}} + \frac{|I_{i(j+1)} - I_{ij}|}{I_{ij}}, \quad (2)$$

$$S_{ij}^{in} = \frac{|A_{i+1} - A_i|}{A_i} + \frac{|B_{j+1} - B_j|}{B_j}, \quad (3)$$

где I_{ij} значение отслеживаемого результата расчета (тепловые потери для электромагнитного анализа).

Положительный эффект процедуры верификации отражен на Рис. 4, в порядке сравнения измеренных экспериментально и численно полученных петель раскрытия трещины (COD) до верификации и на основе верифицированных численных моделей.

По результатам состоявшихся численных расчетов получены упругие и упруго-пластические поля напряжений (Рис. 5а), деформаций (Рис. 5б) и перемещений на основе которых вычислялись упругие и упруго-пластические параметры для интерпретации скорости роста трещины.

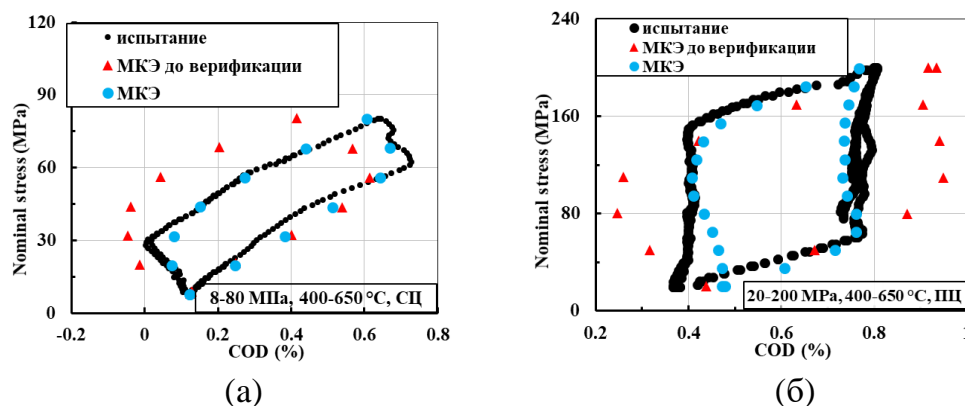


Рисунок 4. Экспериментально измеренные и рассчитанные петли COD для СЦ (а) и ПЦ (б) нагружения

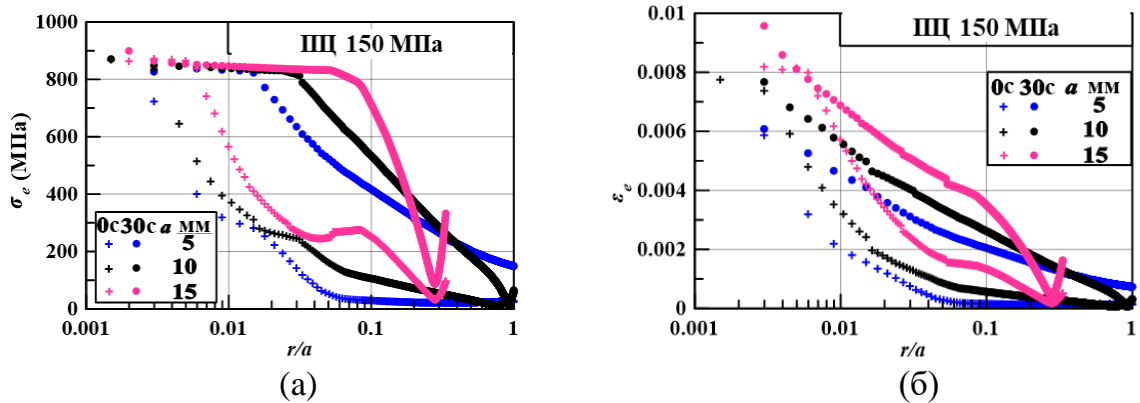


Рисунок 5. Распределения эквивалентных (а) напряжений и (б) деформаций в плоскости роста трещины для ПЦ ТМУ

На основе численных решений представлен анализ изменения полей напряжений в области вершины трещины в изотермических и переходных тепловых условиях, в пределах отдельного цикла (Рис. 6) и последовательности нескольких циклов деформирования. Вблизи внешней поверхности образца ($z/B = 0.04$), где реализуется высокое значение градиента температуры подтверждается существенное отличие полей напряжений в вершине трещины между условиями ИУ и ТМУ нагружения (Рис. 6).

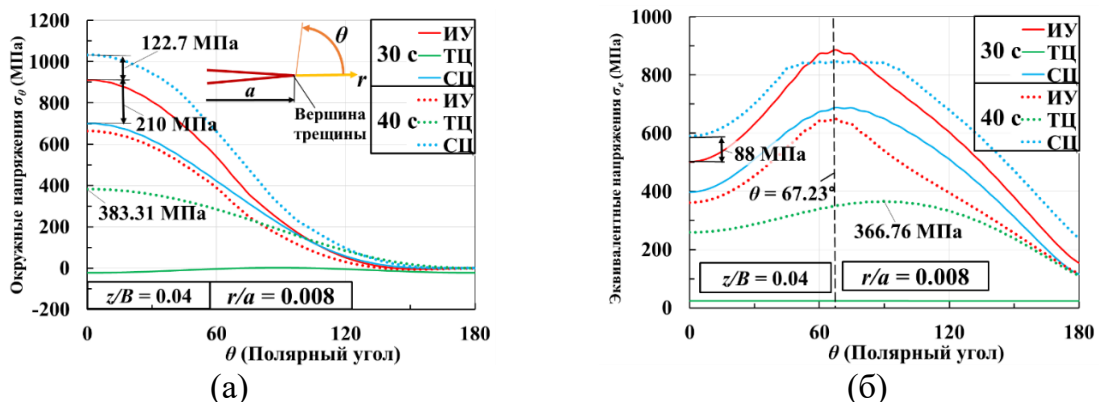


Рисунок 6. (а) Окружные и (б) эквивалентные поля напряжений в вершине трещины для ИУ, СЦ и температурного цикла (ТЦ) 400-650 °С

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик циклической трещиностойкости сплава ХН73МБТЮ при деформировании в изотермических и переходных тепловых состояниях в диапазоне температур 26-650°С. Представлен детальный анализ и установлены закономерности влияния тепловых и силовых факторов на характеристики циклической трещиностойкости. Поведение геометрического поправочного параметра $Y(a/W)$ в SENT образце в зависимости от относительной длины трещины a/W варьируется для СЦ и ПЦ ТМУ нагружения.

Составляющей структуры полей напряжений в вершине трещины является показатель сингулярности $\tilde{\lambda}$, который определен как линия наклона окружных напряжений в радиальных распределениях. На Рис. 7 приведено сравнение поведения показателя сингулярности для испытаний в условиях ИУ и ТМУ в зависимости от значения длины трещины a . Сплошные линии на этих рисунках соответствуют

численным результатам. Для сравнения добавлены аналитические упругие и пластические решения (пунктирные линии на Рис. 7) для классических моделей Ирвина и Хатчинсона-Райса-Розенгрена (ХРР) для упругих и пластических свойств материала.

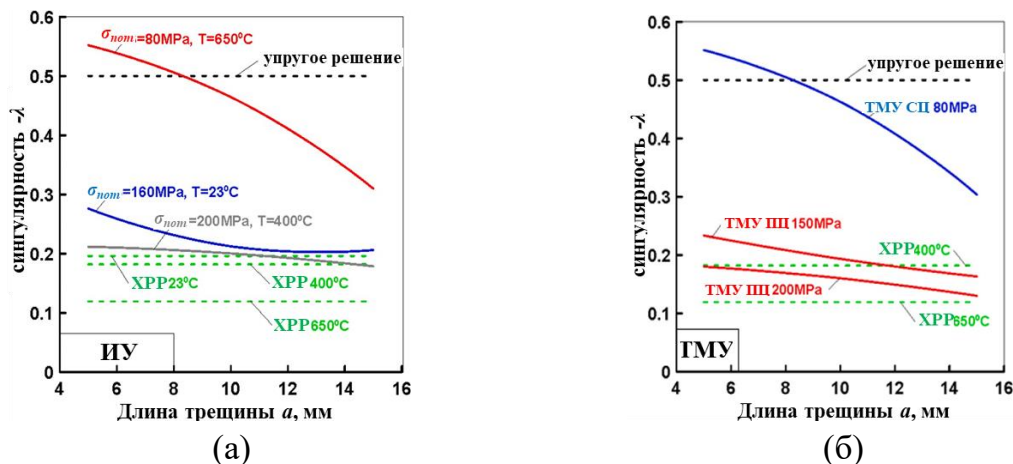


Рисунок 7. Поведение показателя сингулярности напряжений в вершине трещины для (а) условий чистой усталости и (б) условий ТМУ нагружения

Установлено, что на начальной стадии роста трещины при относительно низком уровне приложенных номинальных напряжений $\sigma_{ном} = 80$ МПа показатель сингулярности для ИУ и ТМУ СЦ близок к -0.5, что соответствует классическому упругому решению. С повышением уровня приложенных номинальных напряжений $\sigma_{ном} = 160 \dots 200$ МПа, из-за возрастания роли пластических деформаций, показатель сингулярности приближается к пластическому решению ХРР. Таким образом, поведение показателя сингулярности в проведенных испытаниях зависит от уровня приложенных номинальных напряжений, процессов теплопередачи, управляющих качественным и количественным воздействием термических напряжений, а также вида нагружения (ИУ, СЦ или ПЦ ТМУ) и длины трещины.

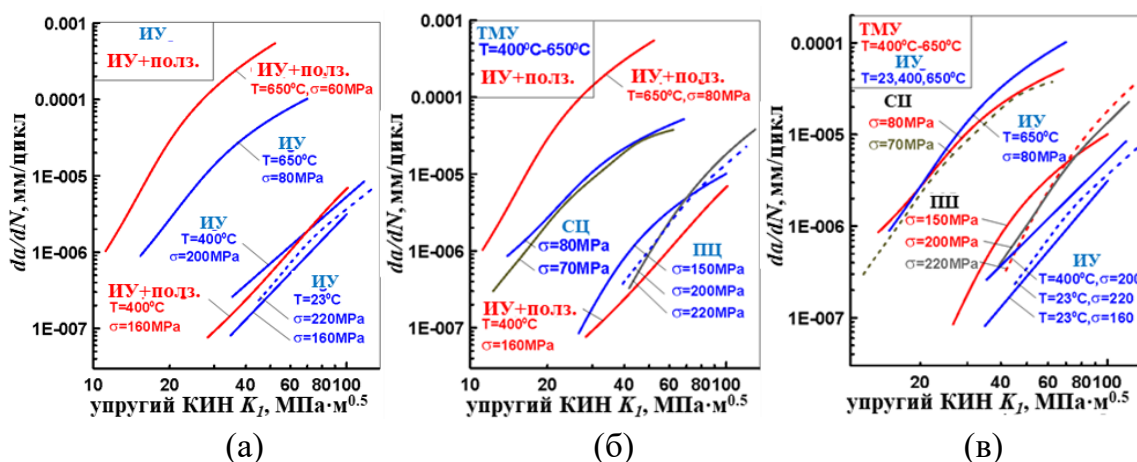


Рисунок 8. Скорость роста трещины в зависимости от упругого КИН K_I для различных программ испытаний: (а) чистая усталость и взаимодействие усталости-ползучести; (б) ТМУ и взаимодействие усталости-ползучести; (с) ТМУ и чистая усталость

Оценка влияния типов термомеханического циклического деформирования дана путем сравнения диаграмм усталостного разрушения, которые приведены на Рис. 8 для гармонического и трапецеидального цикла ИУ, а также профилей СЦ и ПЦ ТМУ. Из представленных данных следует, что для изотермических условий $T = 650^\circ\text{C}$ скорость роста трещины при взаимодействии усталости-ползучести увеличивается примерно на порядок по отношению к гармоническому нагружению без выдержки. Скорость роста трещины при температуре $T = 400^\circ\text{C}$ на два порядка меньше в сравнении с температурой $T = 650^\circ\text{C}$. В тоже время для температуры испытания $T = 400^\circ\text{C}$ участок выдержки не приводит к заметному проявлению влияния ползучести на скорости роста трещины.

Установлена существенная разница в скорости роста трещины между СЦ и ПЦ ТМУ для одного и того же интервала температур (Рис. 8б). На Рис. 8в показана зависимость скорости роста трещины от упругого КИН для образца SENT в условиях ИУ ($T = 23^\circ\text{C}$, 400°C , 650°C) и условий ТМУ СЦ и ПЦ. На Рис. 8в показано, что для испытания при постоянной температуре $T = 650^\circ\text{C}$ скорость роста трещины увеличивалась по отношению к условиям СЦ ТМУ по мере роста трещины, при том же самом приложенном максимальном номинальном уровне напряжения $\sigma_{ном} = 80$ МПа. Скорость роста трещины для ПЦ ТМУ, с номинальной температуры $T = 400^\circ\text{C}$ в момент максимального номинального напряжения, существенно выше по сравнению с испытанием при постоянной температуре $T = 400^\circ\text{C}$ и том же номинальном напряжении $\sigma_{ном} = 200$ МПа. Корреляция температуры испытания и скорости роста трещины при ИУ является общепринятым и совпадает с известными литературными данными. С точки зрения ускорения роста трещины, при условии умеренного уровня термических напряжений и одинакового уровня номинального нагружения, формируется следующий порядок расположения диаграмм усталостного разрушения: взаимодействие усталости и ползучести ($T = 650^\circ\text{C}$), ИУ ($T = 650^\circ\text{C}$), СЦ ТМУ ($T = 400-650^\circ\text{C}$) и ПЦ ТМУ ($T = 400-650^\circ\text{C}$), ИУ ($T = 400^\circ\text{C}$), ИУ ($T = 23^\circ\text{C}$).

На основе результатов экспериментов и соответствующих численных расчетов введен параметр разрушающего воздействия (РВ) A для интерпретации и прогнозирования скорости роста трещин и остаточной долговечности при изотермическом и ТМУ нагружении. Параметр A представляет собой интегральную оценку накопленной за весь цикл нагружения нормированной величины плотности энергии деформации (ПЭД) в окрестности вершины трещины.

Расчеты параметра A основаны на величинах критической ПЭД ω_f , а также ПЭД ω в плоскости роста трещины. Под значением критической ПЭД ω_f понимается величина ПЭД в момент разрушения материала при одноосном растяжении. В свою очередь, величина ω в плоскости роста трещины получена на основе численных МКЭ расчетов. Значения ω определялись в каждой точке r_j между вершиной трещины ($r = 0$ мм) и границей объекта ($r_{max} = W - a$), для каждого интервала времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ($t = 0 \dots \phi$) в пределах цикла нагружения.

На Рис. 9 для каждого интервала времени Δt_i представлены расчетные распределения $\omega = f(r)$ в радиальном направлении от вершины трещины, полученные для SENT образца в условиях ТМУ ПЦ, $a = 10$ мм, диапазона номинального напряжения и температуры 15–150 МПа и $T = 400$ –650 °С.

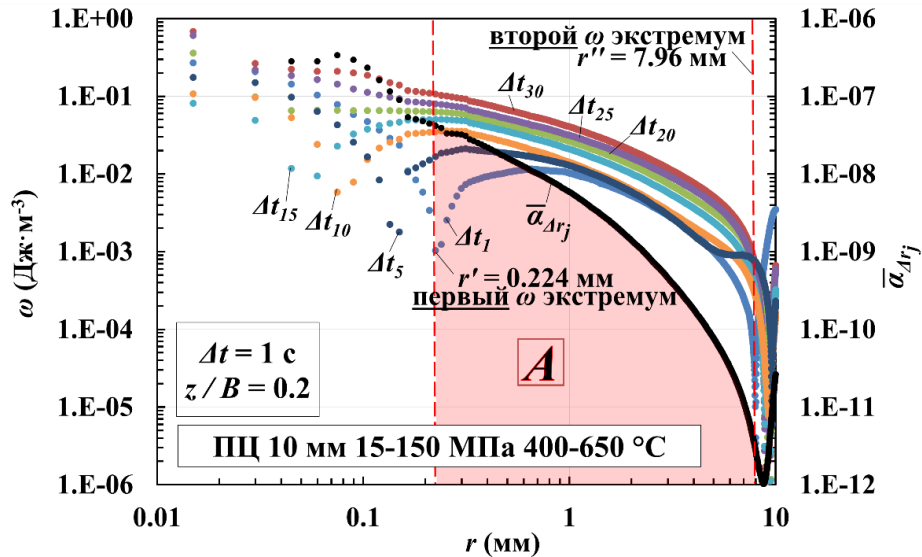


Рисунок 9. Распределение ПЭД и накопленной нормированной ПЭД $\bar{\alpha}_{\Delta r_j}$ в плоскости роста трещины

Расстояние r_{max} разделено на $M = L - 1$ интервалов Δr_j , где L - количество точек r_j в пределах r_{max} . Для удобства дальнейших вычислений каждая кривая распределения $\omega^{\Delta t_i}(r)$ была преобразована в гистограмму путем усреднения значения $\omega^{\Delta t_i}$ в интервалах Δr_j согласно уравнению (4).

$$\omega_{\Delta r_j}^{\Delta t_i} = \frac{1}{2} \cdot (\omega_{r_j}^{\Delta t_i} + \omega_{r_{j+1}}^{\Delta t_i}). \quad (4)$$

Для оценки степени разрушающего воздействия, вызванного деформацией материала в окрестности вершины трещины за промежуток времени Δt_i , введен коэффициент РВ Q (5). Значение Q представляет оценку совокупного разрушающего воздействия деформирования и температурного состояний на локальный объем материала. Предложено разнести члены в уравнении (5) на два слагаемых, в которых отношение $\tilde{\omega}_{r_j}^t / \omega_f$ учитывает силовое воздействие и $1 / \omega_f$ отражает влияние температуры.

$$Q_{\Delta r_j}^{\Delta t_i} = \frac{\tilde{\omega}_{r_j}^t}{\omega_f} \cdot \frac{1}{\omega_f} = \frac{\tilde{\omega}_{r_j}^t}{\omega_f^2}, \quad (5)$$

где $\tilde{\omega}_{r_j}^t$ площадь под кривой одноосного растяжения материала, ограниченная численно полученным значением деформации в плоскости роста трещины $\varepsilon = \varepsilon_{e r_j}^t - (\varepsilon_{e r_j}^t)_{PL}$ в момент t_i на расстоянии r_j .

Рис. 10 демонстрирует принципиальную разницу в моментах возникновения наибольшего разрушающего воздействия в СЦ, ПЦ и ИУ циклах. Более высокие значения коэффициента Q соответствуют более неблагоприятному процессу деформирования материала.

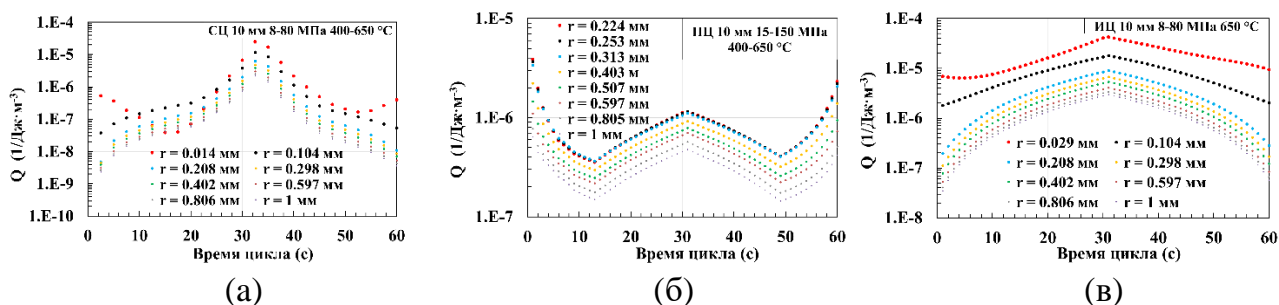


Рисунок 10. Кривые распределения Q для (а) СЦ, (б) ПЦ и (в) ИУ цикла

В порядке определения величины параметра РВ A , нормированная ПЭД α за интервал времени Δt_i в пределах Δr_j описана уравнением

$$\alpha_{\Delta r_j}^{\Delta t_i} = \omega_{\Delta r_j}^{\Delta t_i} \cdot Q_{\Delta r_j}^{\Delta t_i}, \quad (6)$$

тогда накопленная нормированная ПЭД $\bar{\alpha}_{\Delta r_j}$ за весь цикл равна

$$\bar{\alpha}_{\Delta r_j} = \sum_{i=1}^n \alpha_{\Delta r_j}^{\Delta t_i} \cdot \Delta r_j. \quad (7)$$

Искомое значение параметра РВ A (8) для длины трещины a определено как сумма всех $\bar{\alpha}_{\Delta r_j}$ в пределах участка растяжения $r' \leq r \leq r''$ перед вершиной трещины. Тогда величина параметра РВ является площадью под кривой $\bar{\alpha}_{\Delta r_j}$ на Рис. 9 между экстремумами ПЭД r' и r'' .

$$A = \sum_{r'}^{r''} \bar{\alpha}_{\Delta r_j} = \sum_{j=1+r'/\Delta r}^{j=r''/\Delta r} \bar{\alpha}_{\Delta r_j}. \quad (8)$$

В настоящей работе предполагается, что равные значения ω в области изменения коэффициента асимметрии нагрузки $R_\sigma > 0$ и $R_\sigma < 0$ оказывают различное повреждающее воздействие на материал. Согласно предложенному подходу расстояние r' на Рис. 9 определяется как точка первого ω экстремума, наиболее удаленного от вершины трещины, когда в вершине трещины возникает пластическая деформация. Экстремум r' связан с уменьшением эквивалентных и окружных напряжений вблизи вершины трещины во время разгрузки.

На Рис. 9 расстояние r'' связано со сменой знака напряжений от растяжения к сжатию при схеме нагружения внецентренным растяжением-сжатием.

Прогнозирование скорости роста трещины проведено в условиях испытаний ИУ и ТМУ сплава ХН73МБТЮ при комнатной и повышенной температуре. Параметр A связан с длиной трещины a согласно

$$A = C_3 \cdot a^C, \quad (9)$$

где C_3 и C_4 – характеристики условий нагружения, полученные на основе численных расчетов. На Рис. 11 показана зависимость между экспериментально измеренной скоростью роста трещины, da/dN , и параметром РВ А (9). Как показано на Рис. 11, связь между параметром А и da/dN описывается степенной функцией (10) в форме, аналогичной закону Пэриса.

$$da/dN = C_1 \cdot A^{C_2}, \quad (10)$$

где C_1 и C_2 – характеристики материала, полученные в результате эксперимента на скорость роста трещины и расчета. Для определения характеристик материала C_1 , C_2 и условий нагружения C_3 и C_4 (Таблица 1) достаточно провести как минимум одно ИУ или ТМУ испытание на рост трещины, а также испытание на монотонное растяжение материала.

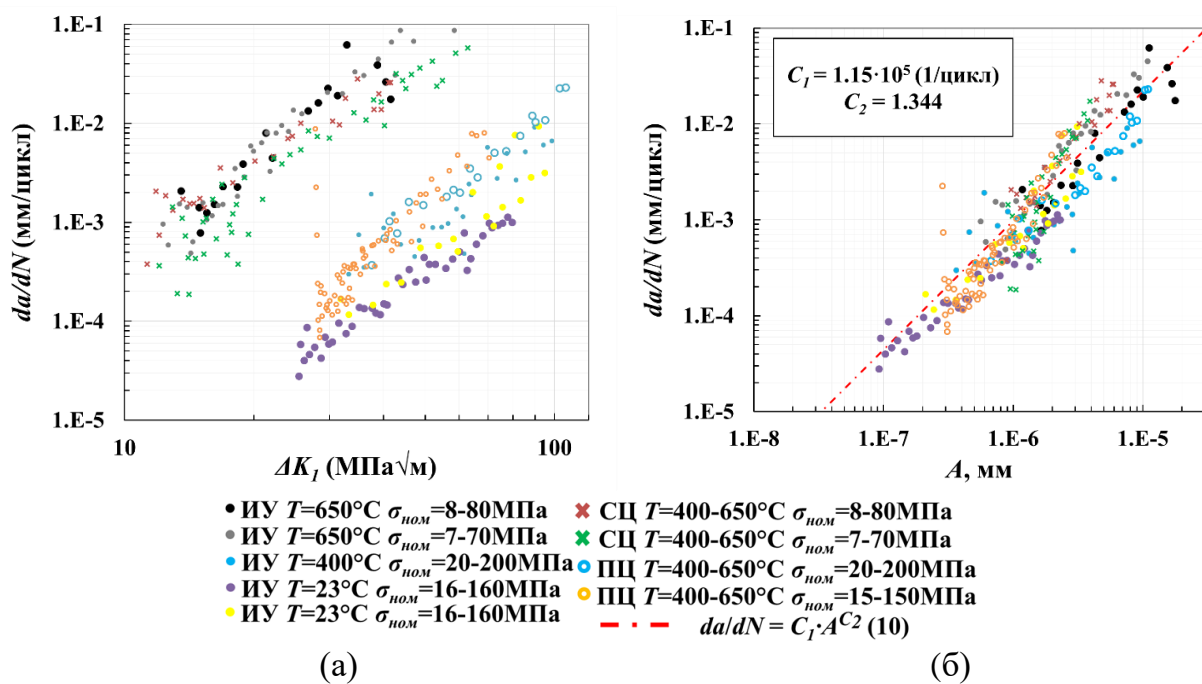


Рисунок 11. Диаграммы усталостного разрушения на основе (а) упругого КИН и (б) параметра РВ А

Таблица 1. Характеристики материала ХН73МБТЮ и условий нагружения.

	C_1 (1/цикл)	C_2	C_3	C_4
ТМУ СЦ 400-650 °С 70 МПа			$7.25 \cdot 10^{-8}$	1.49
ТМУ СЦ 400-650 °С 80 МПа			$5.41 \cdot 10^{-8}$	1.74
ТМУ ПЦ 400-650 °С 150 МПа			$1.37 \cdot 10^{-8}$	1.94
ТМУ ПЦ 400-650 °С 200 МПа			$5.14 \cdot 10^{-9}$	2.83
ИУ 650 °С 70 МПа	$1.15 \cdot 10^5$	1.344	$5.41 \cdot 10^{-9}$	2.81
ИУ 650 °С 80 МПа			$1.349 \cdot 10^{-8}$	2.617
ИУ 400 °С 200 МПа			$1.684 \cdot 10^{-9}$	3.186
ИУ 26.85 °С 160 МПа			$7.203 \cdot 10^{-10}$	2.98

На Рис. 12 представлены результаты численного моделирования распространения трещины в виде зависимостей длины трещины от количества циклов нагружения для испытаний ИУ и ТМУ согласно уравнению (11)

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C_1 \cdot A \cdot C_2}, \quad (11)$$

где a_0 и a_f – границы диапазона роста трещины.

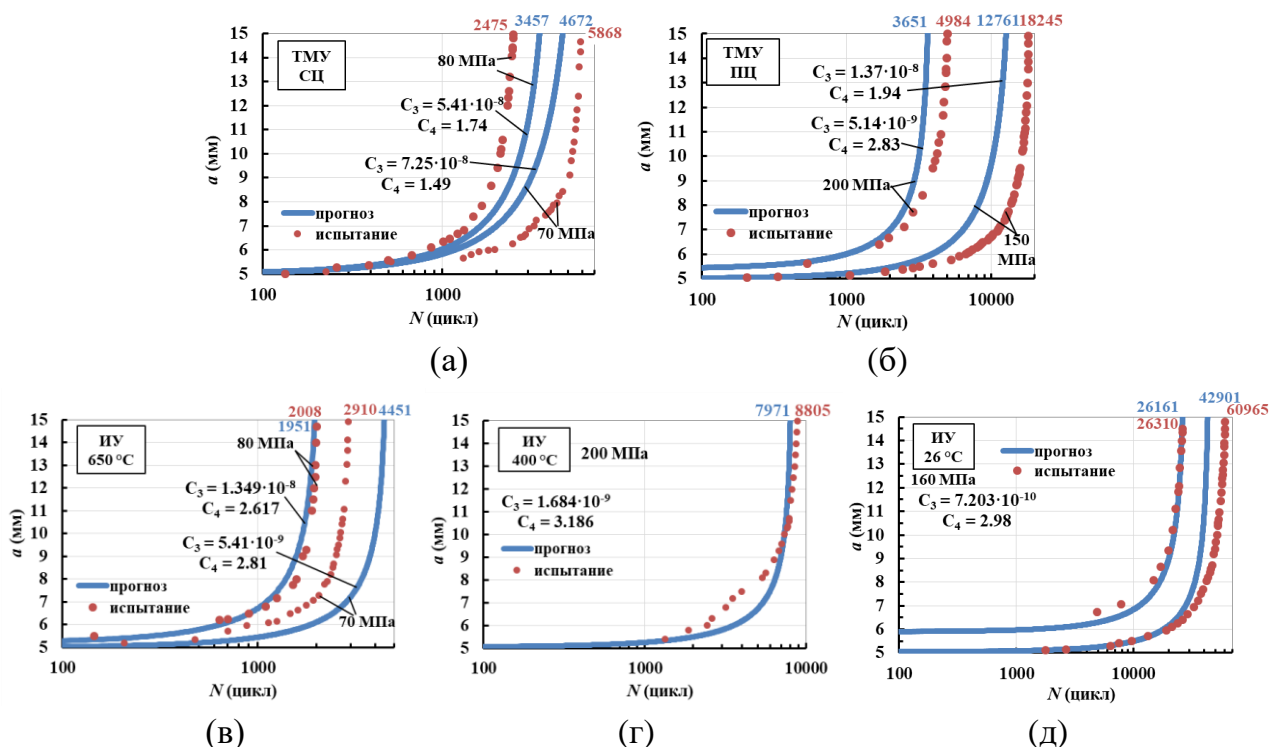


Рисунок 12. Прогнозирования распространения трещины в (а) СЦ, (б) ПЦ ТМУ испытаниях, а также в ИУ испытаниях при температуре (в) 650 °C, (г) 400 °C and (д) 26 °C

Подход согласуется с имеющимися экспериментальными данными в диапазоне скоростей роста трещин от $3 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл до 0.1 мм/цикл и показывает хорошее соответствие с результатами СЦ, так и в режиме ПЦ ТМУ, а также при изотермическом нагружении. Разница в величине остаточной долговечности по отношению к экспериментально полученной составила в среднем 20% и в одном случае не более 39.7%, что соответствует типичному разбросу результатов для сплава ХН73МБТЮ.

В качестве практического приложения в диссертационной работе рассмотрено высокотемпературное усталостное распространение трещины в диске турбины на основе методов имитационного моделирования. В дисках 2-й ступени турбины низкого давления, на поверхности сквозных отверстий в эксплуатации были обнаружены поверхностные повреждения, которые приводили к распространению полуэллиптической макротрещины и разрушению диска.

Согласно предложенной последовательности оценки остаточной долговечности диска турбины с повреждением на первом этапе было определено НДС в условиях эксплуатации. Получено, что напряжения достигают близких к пределу текучести материала значений в области цилиндрической поверхности сквозного отверстия в ступице (Рис. 13).

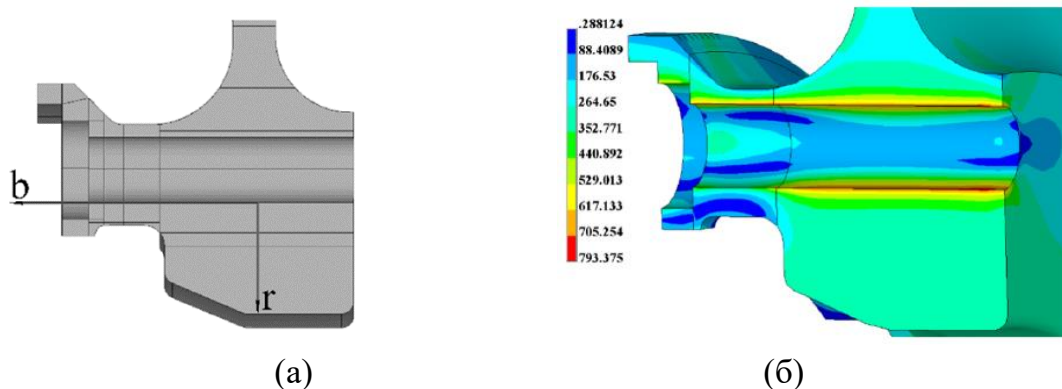


Рисунок 13. (а) Сечение ступицы диска и (б) НДС в ступице диска турбины

На следующем этапе рассмотрены различные способы нагружения и конфигурации геометрии имитационной модели (ИМ) для воспроизведения приближенных к эксплуатационным условиям распространения трещины в процессе модельных испытаний. По результатам сравнения НДС в ИМ и ступице натурального диска, для проведения испытаний была выбрана геометрия ИМ (Рис. 14а) для внецентренного растяжения-сжатия при программно-блочном нагружении по стадиям распространения трещины.

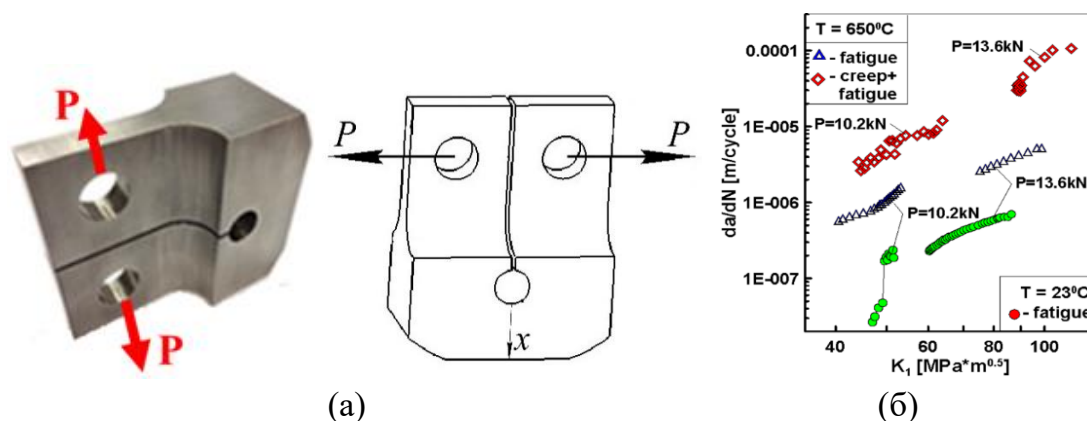


Рисунок 14. (а) ИМ и (б) диаграмма усталостного разрушения на основе упругого КИН

Результаты испытаний на скорость роста трещины при гармоническом нагружении и температурах 23 и 650 °С, а также для трапециевидного цикла и температуре 650 °С интерпретированы в терминах упругого КИН (Рис. 14б). По мере увеличения температуры материала и формы цикла нагружения, скорость роста трещины увеличивалась примерно на порядок. Из Рис. 14б видно, что участки каждой приложенной нагрузки $P = 10.23$ кН и $P = 13.57$ кН укладываются в общий тренд на диаграмме. Таким образом, дано обоснование применения имитационного моделирования к оценкам остаточной долговечности диска турбины при эксплуатации в условиях повышенных температур.

Основные выводы

Разработан расчетно-экспериментальный метод исследования развития трещин для условий изотермического и нестационарного теплового состояния материала при циклическом механическом нагружении и обоснованы прогнозирование и интерпретация результатов в терминах введенного параметра разрушающего воздействия.

При достижении поставленных целей решены следующие задачи:

1. Разработана методика расчетно-экспериментального исследования роста трещин в условиях термомеханической усталости при синфазной и противофазной форме цикла деформирования.
2. Выполнены расчетно-экспериментальные исследования влияния вида нагружения и температуры на характеристики циклической трещиностойкости жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ.
3. Разработан метод и реализован алгоритм численного сопряженного мультифизического анализа циклического механического нагружения при нестационарном температурном состоянии материала в условиях индукционного нагрева и конвективного воздушного охлаждения.
4. Выполнены параметрические исследования и сформирована структура полей напряженно-деформированного состояния в вершине трещины для условий ТМУ с учетом сдвига фаз.
5. Введен и обоснован параметр разрушающего воздействия для интерпретации и прогнозирования эффектов совместного влияния нестационарного теплового состояния и нелинейного циклического деформирования материала на скорость роста трещины. Отклонение прогнозных данных от эксперимента составило в среднем около 20 % от общей долговечности на стадии роста трещины.
6. Представлена оценка развития трещин в диске турбины авиационного двигателя на основе имитационного моделирования.

Основные печатные работы по теме диссертации:

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. – 105886.
2. Shlyannikov V., **Sulamanidze A.** Crack tip field analysis for thermo-mechanical fatigue loading // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2023. – V. 125. – 103945.
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. – 102124.
4. Shlyannikov V., **Sulamanidze A.**, Kosov D. Isothermal and thermo-mechanical fatigue-crack-growth analysis of ХН73М nickel alloy // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2024. – V.129. – 104182.

5. **Sulamanidze 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.
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 (ВАК)*. - 2021. - № 2. С. 203-217.
7. Суламанидзе А.Г., Шлянников В.Н., Яруллин Р.Р. Обоснование геометрии и условий нагружения имитационной модели диска турбины газотурбинного двигателя // *Авиац. Техн. (ВАК)*. – 2021. – № 1. – С. 18-26.
8. Суламанидзе А.Г., Шлянников В.Н., Косов Д.А. Энергетический параметр сопротивления циклическому разрушению // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов: в 4 т., Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года / Политех-Пресс, 2023. – С. 710-712.
9. Шлянников В.Н., Яруллин Р.Р., Суламанидзе А.Г. Способ испытания на прочность диска турбомшины, имеющего концентраторы напряжений в виде отверстий, и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация. № 2020111401; заявл. 18.03.2020; опубл. 17.08.2020. Бюл. № 23.
10. Shlyannikov, V. Fatigue, creep-fatigue interaction and thermo-mechanical crack growth of XH73m nickel alloy / V. Shlyannikov, **A. Sulamanidze**, D. Kosov // 6th IJFatigue and FFEMS Joint Workshop «Characterisation of Crack/Notch Tip Fields» (11-13 April 2022, Dubrovnik, Croatia). Book of Abstracts, ISBN 978-953-7738-83-9, p.7, University of Zagreb Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture Zagreb, Croatia, 2022.