

На правах рукописи

Александр

ДЕСЯТНИКОВА МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (НИИМ Нижегородского университета)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Волков Иван Андреевич**

Официальные оппоненты: **Мельников Борис Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, профессор кафедры «Гидравлика и прочность»

Хлыбов Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Защита состоится «20» декабря 2018 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте diss.unn.ru/874.

Автореферат разослан «12» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие конструкций и аппаратов современного энергомашиностроения, самолётостроения и других высокотехнологичных отраслей промышленности характеризуется увеличением рабочих параметров, снижением металлоёмкости за счёт рационального проектирования и применения новых конструкционных материалов, значительным ростом удельного веса нестационарных режимов нагружения, существенным расширением температурного диапазона работы конструкций. Подобные тенденции привели к тому, что в настоящее время одной из основных задач при разработке и проектировании конструкций и аппаратов новой техники является надёжная расчётная оценка их прочности и ресурса. Эта задача наиболее актуальна для конструкций, срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) и газотурбинные установки (ГТУ) нового поколения, нефтехимическое оборудование и др.).

Разрушение конструкционных материалов в основном обусловлено зарождением микродефектов, их ростом и слиянием в макроскопические трещины. Описание механического поведения микродефектов не менее важно, чем описание развития макротрещин и в последнее десятилетия для решения таких задач успешно развивается новое научное направление – механика повреждённой среды (МПС).

Работа посвящена применению моделей и методов МПС для численного исследования усталостной долговечности материалов и конструкций при термомеханическом нагружении, служащих основой для разработки на их базе экспертных систем оценки ресурса.

Степень разработанности темы

К настоящему времени разработано большое количество определяющих соотношений МПС, описывающих процессы развития поврежденности в материале. Однако большинство этих уравнений ориентированы только на определённые режимы нагружения, не связаны с конкретными уравнениями процессов деформирования. На самом деле история термомеханического деформирования (вид траектории деформирования, характер изменения температуры, вид напряжённого состояния, история его изменения и др.) существенно влияет на скорость процессов накопления повреждений. Это подчёркивает важность рассмотрения кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) в опасных зонах конструктивных элементов и её теоретического описания соответствующими уравнениями состояния.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является оценка усталостной долговечности элементов и узлов несущих конструкций при комбинированном термомеханическом нагружении с использованием определяющих соотношений МПС, предложенных Ю.Г. Коротких.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

– провести оценку достоверности уравнений МПС Ю.Г. Коротких для сложных режимов термоциклического нагружения с учетом малоизученных эффектов деформирования методом численного моделирования экспериментальных процессов и сопоставления полученных результатов расчета с опытными данными;

– разработать эффективный алгоритм интегрирования уравнений МПС и создать на его основе программные средства, необходимые для решения конкретных прикладных задач;

– создать научно-обоснованный инженерный подход, позволяющий на базе результатов решения краевых задач, осуществлять прогноз усталостной долговечности локальных зон конструктивных элементов по заданной истории изменения компонент тензора деформаций и температуры;

– получить численные решения ряда прикладных задач и выявить характерные особенности процесса термоциклического разрушения элементов конструкций современной техники.

Научная новизна

Методом численного моделирования экспериментальных процессов и сопоставления результатов расчета с опытными данными, проведены исследования:

– влияния соотношений между скоростями механической и температурной деформацией на процессы термопластического деформирования поликристаллических конструкционных сплавов;

– влияния сдвига фаз между циклами изменения температуры и механической деформации на усталостную долговечность жаропрочных сплавов;

– влияние вида траектории деформирования на усталостную долговечность поликристаллических конструкционных сплавов.

Проведена оценка достоверности модели МПС Ю.Г. Коротких при расчете усталостной долговечности компактных образцов с концентраторами в условиях неоднородного напряженного состояния.

Получены новые решения задач оценки термоциклической усталостной долговечности моделей жаровых труб камер сгорания ГТД с различными углами наклона охлаждающих каналов. Показано, что уменьшение угла наклона перфорированных отверстий сопровождается снижением их термоциклической усталостной долговечности.

Теоретическая значимость работы

Получены новые данные по термоциклической усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов. Показано существенное влияние соотношений между скоростями механической и температурной деформацией, фазности между циклами изменения температуры и механической деформации, вида траектории деформирования на усталостную долговечность при термомеханическом нагружении. Показано, что подход, основанный на правиле линейного суммирования повреждений при расчете

усталостной долговечности, может привести как к консервативной, так и неконсервативной оценке.

Практическая значимость работы

Разработана научно-обоснованная инженерная методика, созданы алгоритмы и программные средства для численного анализа термомеханической усталостной долговечности опасных зон элементов и узлов несущих конструкций. Показано, что благодаря учёту основных эффектов, сопутствующих процессам циклического термомеханического нагружения, на базе разработанного подхода возможно создание экспертных систем по оценке ресурса конструкций и аппаратов современной техники. Внедрение результатов работы возможно на предприятиях ГК «Росатом», ГК «Роскосмос», предприятиях Министерства Обороны РФ и предприятиях авиастроения для расчетного обоснования прочности и ресурса проектируемых конструкций и аппаратов современной техники.

Методология и методы диссертационного исследования

Основой диссертационного исследования является метод математического моделирования, сочетающий численное решение задач термоциклической усталостной долговечности материалов и конструкций с экспериментальными исследованиями на испытательных машинах высокого класса точности. Для численного моделирования НДС конструкций численными методами используется интегрированный пакет прочностного анализа ANSYS.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты оценки достоверности определяющих соотношений МПС, предложенных Ю.Г. Коротких для расчёта термоциклической усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при сложном нагружении;

– научно-обоснованная инженерная методика оценки ресурсных характеристик материалов и конструкций, позволяющая осуществлять прогноз термоциклической усталостной долговечности локальных зон элементов и узлов несущих конструкций по заданной истории изменения компонент тензора деформации и температуры, полученных из решения соответствующих краевых задач;

– результаты решения конкретных прикладных задач: оценки ресурсных характеристик компактного образца с концентраторами, моделирующего работу «корня» сварного соединения труб системы компенсации давления энергетических установок, работающих в условиях нестационарного теплообмена; численного анализа термоциклической долговечности моделей жаровых труб камер сгорания ГТД с различными углами наклона охлаждающих каналов.

Достоверность полученных результатов подтверждается математическим обоснованием основных положений при формулировке определяющих соотношений МПС, их соответствием фундаментальным законам механики деформируемого твердого тела (МДТТ), сопоставлением численных

результатов с опытными данными, применением апробированного аппарата численных методов и использованием лицензированного программного обеспечения ANSYS (лицензия ANSYS Academic Research, «Customer# 623640»).

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– VIII Международном симпозиуме «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела» (Тверь, 2015)

– XVII Международной конференции Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (23-27 марта 2015, Саров)

– 14 научно-технической конференции «Молодежь в науке» (27-29 октября 2015г, Саров)

– XX Нижегородской сессии молодых ученых, секция «Естественные, математические науки» (26-29 мая 2015г, проф. Морозовский Арзамасского р-на)

– XXVII International Conference «Mathematical and Computer Simulation in Mechanics of Solids and Structures – MCM 2017». Fundamentals of static and dynamic fracture. (Saint Petersburg, Russia, 2017)

Работа докладывалась на научном семинаре по динамике и прочности Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород, 2017).

В завершеном виде работа докладывалась на объединенном заседании кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики и Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород, 2018).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ [1–9], в том числе 5 из них в изданиях, входящих в перечень, рекомендуемых ВАК РФ [1–5].

Личный вклад автора:

– разработка ряда модулей программы «EXPMODEL» [2];

– численный анализ влияния соотношений между скоростями механической и температурной деформацией на нестационарное термопластическое деформирование жаропрочного сплава Nimonic 80A [2];

– численное решение задачи оценки влияния вида траектории деформирования на усталостную долговечность жаропрочных сплавов при комбинированном термомеханическом нагружении [1, 5, 8, 7, 9];

– численный анализ характерных особенностей термоциклической усталостной долговечности конкретных конструктивных элементов (компактного образца с концентраторами, моделирующего работу «корня»

сварного соединения труб системы компенсации давления энергетических установок и моделей жаровых труб камер сгорания авиационных ГТД с различными углами наклона охлаждающих каналов) [3, 4].

В совместных работах Волкову И.А. принадлежит общее руководство исследованиями, постановка задач, участие в обсуждении результатов; Коротких Ю.Г. – помощь в адаптации модели МПС для решения задач термоциклической усталостной долговечности материалов и конструкций; Игумнову Л.А. – участие в обсуждении результатов; Шишулину Д.Н. – помощь в получении материальных параметров и скалярных функций МПС; Тарасову И.С. – помощь в проведении вычислений в ВК «ANSYS».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 152 страниц основного текста, 68 рисунков и 28 таблиц. Список литературы на 11 страницах включает 97 наименований.

Диссертация выполнена при поддержке

Результаты раздела 4.3 получены при финансировании Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-6944.2016.8), результаты раздела 4.2 получены при финансировании Российским научным фондом (грант № 14-19-01096), результаты раздела 4.4 получены при финансировании федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» соглашение №14.578.21.0246 от 26.09.2017 (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0246).

Благодарности

Автор выражает благодарность доктору физико-математических наук, профессору Игумнову Л.А. за проявленное внимание к работе и сделанные замечания; сотруднику ОАО ОКБМ «Африкантов» Шишулину Д.Н. за консультации и помощь в получении материальных параметров определяющих соотношений МПС; сотруднику ФГБОУ ВО ВГУВТ Тарасову И.С. за помощь в проведении численных расчетов в ВК «ANSYS».

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указаны основные направления намеченных исследований, кратко очерчена область возможных применений.

В первой главе, имеющей обзорный характер, выполнен анализ основных экспериментальных данных по исследованию термоциклической долговечности конструкционных сплавов при комбинированном термомеханическом нагружении, рассмотрены основные модели малоциклового усталости (МЦУ) и численные методы решения краевых задач МДТТ.

Эффекты деформирования при термомеханическом нагружении определяются зависимостью физико-механических характеристик конструкционных материалов от температуры, наличием ограничений температурных деформаций и соотношением скоростей механической и температурной деформаций. В связи с тем, что частоты и фазы циклов изменения температуры и компонент тензора механической деформации, как правило, не совпадают, неизотермическое циклическое нагружение является непропорциональным, многоосным и сопровождается вращением главных площадок тензоров напряжений и деформаций.

Развитие экспериментальных и теоретических исследований развития процессов деградации конструкционных материалов и способов оценки их усталостной долговечности связано с именами отечественных исследователей, таких как: С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, Н.А. Махутов, Н.Ф. Морозов, Б.Е. Мельников, А.Н. Романов, Н.С. Можаровский, В.В. Москвитин, А.П. Гусенков, А.Г. Казанцев А.Г., Ю.Г. Коротких, И.А. Волков, Л.А. Игумнов, В.С. Бондарь, С.А. Капустин, А.А. Хлыбов и др.

Большой вклад сделан зарубежными исследователями, среди которых: Д. Беттен, П. Бивер, Гаруд, Ф. Эльин, С.С. Мэнсон, С. Мураками, Ж. Леметр, Дж. Коллинз, Л. Коффин, Корум, Сартори, Bernard-Connolly M., Viron A., Vue-Quic T., Hulford G. R. и др.

Установлено, что усталостное разрушение конструкций является следствием сложных, совместно протекающих процессов накопления повреждений в материале их опасных зон. Поврежденность материала носит анизотропный характер, однако в первом приближении может быть описана с помощью скалярной меры повреждения. Процесс накопления повреждений включает в себя две стадии: стадию зарождения рассеянных дефектов и стадию их развития и распространения. Процесс накопления повреждений происходит нелинейно. Нелинейным образом суммируются повреждения при чередовании блоков деформирования с разными амплитудами. Процесс накопления повреждений сильно зависит от вида траектории деформирования и изменения температуры.

Вторая глава диссертации посвящена анализу определяющих соотношений МПС Ю.Г. Коротких для оценки малоциклового усталости материалов и конструкций. Изложена математическая модель МПС, кратко изложена методика определения материальных параметров и скалярных функций определяющих соотношений МПС.

Модель поврежденной среды состоит из трех составных частей:

- соотношений, определяющих термопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;
- уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критерия прочности поврежденного материала.

Для описания эффектов монотонного и циклического деформирования вводится поверхность текучести в форме Мизеса:

$$F_s = S_{ij}S_{ij} - C_p^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \rho_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты девиатора напряжений, C_p – радиус поверхности текучести, а ρ_{ij} – координаты её центра.

Для описания сложных циклических режимов деформирования вводится поверхность циклической «памяти»:

$$F_\rho = \rho_{ij}\rho_{ij} - \rho_{\max}^2 = 0, \quad (2)$$

где ρ_{\max} – максимальный за историю нагружения модуль ρ_{ij} .

Эволюция изменения поверхности текучести описывается изменением её радиуса C_p и перемещением её центра ρ_{ij} .

Примем, что структура эволюционного уравнения для радиуса поверхности текучести имеет вид:

$$\dot{C}_p = [q_\chi H(F_\rho) + a(Q_s - C_p)\Gamma(F_\rho)]\dot{\chi} + q_3\dot{T} \quad (3)$$

$$q_\chi = \frac{q_2 A \psi_1 + (1-A)q_1}{A \psi_1 + (1-A)}, \quad Q_s = \frac{Q_2 A \psi_2 + (1-A)Q_1}{A \psi_2 + (1-A)}, \quad \dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p\right)^{1/2} \quad (4)$$

$$A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, \quad n_{ij}^e = \frac{\dot{e}_{ij}^e}{(\dot{e}_{ij}^e \dot{e}_{ij}^e)^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}} \quad (5)$$

$$H(F_\rho) = \begin{cases} 1, & F_\rho = 0 \wedge \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} > 0 \\ 0, & F_\rho < 0 \vee \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} \leq 0 \end{cases}, \quad \Gamma(F_\rho) = 1 - H(F_\rho), \quad (6)$$

где q_1, q_2, q_3 – модули изотропного упрочнения, Q_1 и Q_2 – модули циклического изотропного упрочнения, a – постоянная, определяющая скорость процесса стационарирования петли гистерезиса циклического деформирования материала, Q_s – стационарное значение радиуса поверхности текучести, ψ_1, ψ_2 – постоянные модели ($0 \leq \psi_i \leq 1, i=1,2$), T – температура, e_{ij} – компоненты тензора полных деформаций, e_{ij}^p – компоненты тензора пластических деформаций. Операторы $H(F_\rho)$ и $\Gamma(F_\rho)$ позволяют автоматически разделить процессы монотонного и циклического деформирования.

Эволюция внутренней переменной ρ_{ij} принимается в виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi} - g_3 \rho_{ij} \dot{T}, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (7)$$

где $g_1 > 0, g_2 > 0, g_3 > 0$ – модули анизотропного упрочнения.

Эволюционное уравнение для ρ_{\max} имеет вид:

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij} \dot{\rho}_{ij}) H(F_\rho)}{(\rho_{mn} \rho_{mn})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_3 \rho_{\max} \dot{T} \quad (8)$$

На стадии развития рассеянных по объему повреждений наблюдается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала. Это влияние учитывается введением эффективных напряжений:

$$\tilde{\sigma}'_{ij} = F_1(\omega)\sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}}\sigma'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{(1-\omega)\left[1 - \frac{(6K+12G)}{(9K+8G)}\omega\right]} \quad (9)$$

$$\tilde{\sigma} = F_2(\omega)\sigma = \frac{K}{\tilde{K}}\sigma = \frac{\sigma}{4G(1-\omega)/(4G+3K\omega)} \quad (10)$$

$$\tilde{\rho}_{ij} = F_1(\omega)\rho_{ij} \quad (11)$$

где \tilde{G} , \tilde{K} – эффективные модули упругости, определяемые по формулам Мак-Кензи.

Постулируем, что структура эволюционного уравнения накопления повреждений при малоцикловой усталости имеет вид:

$$\dot{\omega} = \frac{\alpha+1}{r+1} f(\beta)Z^\alpha(1-\omega)^{-r}\langle\dot{Z}\rangle; \quad (12)$$

$$Z = \frac{W - W_a}{(W_f - W_a)}; \quad \langle\dot{Z}\rangle = \begin{cases} \dot{Z} \text{ при } \dot{Z} > 0; \\ 0 \text{ при } \dot{Z} \leq 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$\langle\dot{Z}\rangle = \frac{\langle\dot{W}\rangle}{(W_f - W_a)}; \quad \dot{W} = \rho_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p; \quad f(\beta) = \exp(k\beta) \quad (14)$$

где α , r , k – материалыные параметры, зависящие от температуры T ; $f(\beta)$ – функция параметра объемности напряженного состояния $\beta = \sigma/\sigma_u$; σ – среднее

напряжение, σ_u – интенсивность напряжений; $W = \int_0^t \dot{W} dt$ – энергия, идущая на образование усталостных повреждений; W_a – значение W в конце фазы зарождения микродефектов; W_f – значение энергии соответствующей образованию макроскопической трещины.

В качестве критерия окончания фазы развития рассеянных микроповреждений принимается условие достижения величины поврежденности ω критического значения:

$$\omega = \omega_f \leq 1 \quad (15)$$

Третья глава диссертации посвящена программной реализации модели поврежденной среды Ю.Г. Коротких.

Определение основных характеристик процесса термопластического деформирования поврежденных материалов (параметров состояния), которые в общем случае описываются тензорами σ_{ij} , e_{ij} , e_{ij}^p , ρ_{ij} и скалярами χ , C_p , T и ω осуществляется при соответствующей формулировке определяющих

соотношений МПС в приращениях, которые зависят от выбранного шага Δt и линеаризации алгоритма определения λ . Шаг по времени Δt может корректироваться при прохождении сложных участков траектории деформирования.

Для анализа кинетики НДС и процесса накопления повреждений в опасных зонах элементов конструкций была разработана программа «EXPMODEL», которая позволяет по заданной истории изменения компонент тензора полных деформаций $e_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ рассчитывать параметры процессов термопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах при комбинированных термомеханических воздействиях.

Используя сервисные средства программы, можно создавать и редактировать файлы баз данных, осуществлять сопровождение работы процессора и проводить постпроцессорную обработку результатов счета.

Расчет кинетики напряженно-деформированного состояния и накопления повреждений в рамках программы «EXPMODEL» может осуществляться в одномерной, двумерной (плоское напряжённое состояние) и трехмерной (объёмной) постановках путем совместного интегрирования определяющих соотношений термопластичности и эволюционных уравнений накопления повреждений для элементарного объема материала опасной зоны конструктивного элемента по заданной истории изменения тензора полных деформаций и температуры.

Значения физико-механических характеристик конструкционных материалов и материальных параметров моделей для расчетов по программе «EXPMODEL» содержатся в файлах формата .csv. Данный формат представляет собой таблицу значений. Файлы данного формата можно просматривать и редактировать с помощью программы Excel, входящей в пакет программ Microsoft Office. Файловая структура позволяет проводить ее расширение и включать в ее состав новые конструкционные материалы.

Тестирование программы «EXPMODEL» проводилось на задаче по изотермическому и неизотермическому, монотонному и циклическому деформированию лабораторных образцов, выполненных из жаропрочного сплава Nimonic 80A. Исследовалось влияние соотношения между скоростями механической и температурной деформации на процессы термопластического деформирования материала.

Четвертая глава диссертации посвящена возможности использования рассмотренных уравнений МПС Ю.Г. Коротких для расчета термоциклической долговечности материалов и конструкций при комбинированном термомеханическом нагружении.

В первом примере представлены результаты исследования термоциклической долговечности жаропрочного сплава Nimonic 80A при изотермическом и неизотермическом нагружении. Температура в неизотермических испытаниях изменялась как синфазно, так и противофазно по

отношению к изменению деформаций. Показано, что по одной экспериментальной точке на усталостной кривой определяются материальные параметры эволюционного уравнения накопления повреждений (12)-(14), с помощью которых кривые МЦУ для различных траекторий деформирования восстанавливаются расчетным путем с высокой точностью.

Во втором примере представлены результаты сопоставления численных и экспериментальных данных по термоциклическому деформированию тонкостенных трубчатых образцов из жаропрочного сплава Naupes 188 в интервале температур 316 – 760 °С. Изотермические и неизотермические опыты проводились при жестком нагружении: амплитуда осевой деформации e_{11} составляла 0,4%, а сдвиговой e_{12} – 0,35%. В экспериментах варьировался угол сдвига фаз θ между осевой деформацией e_{11} и деформацией сдвига e_{12} , а также угол сдвига фаз между осевой деформацией e_{11} и температурой T . В экспериментах ψ при сложном изотермическом и неизотермическом деформировании реализовано восемь типов испытаний: И316МФ ($\theta = 0$, $T = 316$ °С), И316МПФ ($\theta = 90^\circ$, $T = 316$ °С), И760МФ ($\theta = 0$, $T = 760$ °С), И760МПФ ($\theta = 90^\circ$, $T = 760$ °С), МФТФ ($\theta = 0$, $\psi = 0$), МФТПФ ($\theta = 0$, $\psi = 180^\circ$), МПФТФ ($\theta = 90^\circ$, $\psi = 0$), МПФТПФ ($\theta = 90^\circ$, $\psi = 180^\circ$).

На рис. 1, 2 представлены расчётные и экспериментальные зависимости амплитуд осевых σ_{11} и сдвиговых σ_{12} напряжений в зависимости от числа циклов нагружения. Сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования, маркерами соответствующие экспериментальные данные. Видно, что степень циклического упрочнения при неизотермическом термоциклическом нагружении значительно больше, чем в изотермических испытаниях. Эти закономерности показывают, что механизм неизотермического термоциклического деформирования качественно отличается от изотермического.

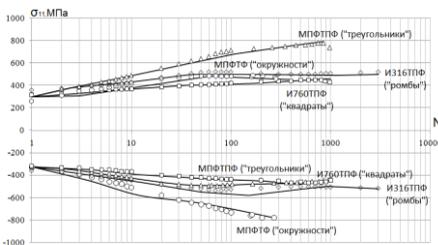


Рис. 1

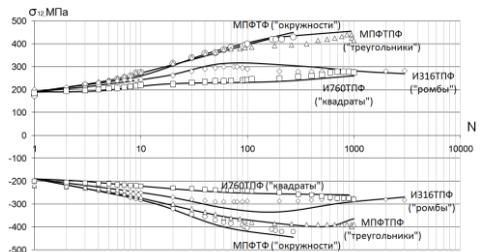


Рис. 2

Для исследования влияния траектории деформирования на малоцикловую усталость жаропрочных сплавов были проведены расчёты процессов накопления усталостных повреждений, результаты которой приведены в табл. 1. Видно, что модель МПС Ю.Г. Коротких с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает процессы циклического термопластического

деформирования и накопления усталостных повреждений при комбинированном термомеханическом нагружении.

Таблица 1 – Усталостная долговечность

Режим нагружения	N_f , эксперимент	N_f , расчёт	Режим нагружения	N_f , эксперимент	N_f , расчёт
ИЗ16МФ	9448	10512	МФТФ	282	143
ИЗ16МПФ	3410	2860	МФТПФ	569	830
И760МФ	910	1205	МПТФ	270	341
И760МПФ	1089	785	МПТПФ	1004	1307

В третьем примере представлены результаты исследования долговечности образцов из стали Х18Н9Т с концентраторами при блочном термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряжённого состояния, моделирующих работу «корня» сварного соединения труб системы компенсации давления энергетических установок при блочных режимах термоциклического нагружения.

Термоусталостное нагружение осуществлялось циклическим нагревом и охлаждением образцов. Параметры двух режимов термоциклического нагружения представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Режимы нагружения

Режим	T_{max} , °С	T_{min} , °С	$t_{нагр}$, МИН	$t_{охл}$, МИН
1	750	20	17	2
2	600	20	17	2

Численное решение задачи оценки усталостной долговечности компактного образца с концентраторами при термоциклическом нагружении было проведено в два этапа. На первом этапе для оценки кинетики НДС в «опасных» зонах определялись температурные поля в образце путём решения нестационарной задачи теплопроводности для этапов разогрева и охлаждения. На втором этапе с использованием определяющих соотношений МПС численно решена задача оценки усталостной долговечности компактного образца с выточками.

В табл. 3 приведено число циклов до разрушения, полученное опытным и расчётным путём для двух режимов термоциклического нагружения (1: 20 → 750 → 20, 2: 20 → 600 → 20). Результаты расчётов при двухблочных режимах термоциклического нагружения, их сравнение с имеющимися опытными данными приведены на рис.3, где приведена зависимость относительной наработки материала (кривая 1 – режим 1–2; кривая 2 – режим 2–1). Сплошной линией отмечены экспериментальные результаты, круглыми маркерами – расчётные данные. Видно, что в условиях двухблочного термоциклического нагружения по режиму 1-2 (кривая 1 на рис.3) гипотеза линейного

суммирования повреждений дает ошибку в неконсервативную сторону, а по режиму 2-1 – в консервативную сторону.

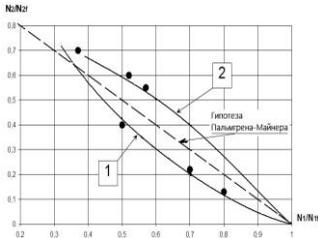


Рис.3

Таблица 3 - Экспериментальная и расчетная термоциклическая долговечность для двух режимов нагружения

Режим термоциклического нагружения	N_f (эксперимент)	N_f (расчет)
20 → 750 → 20	2500 – 3800	2620
20 → 600 → 20	3500 – 4900	3860

В четвёртом примере решена прикладная задача исследования влияния углов наклона охлаждающих отверстий (каналов) моделей жаровых труб камер сгорания ГТД на их термоциклическую долговечность. Испытывались полые образцы коробчатой формы из жаропрочного сплава ВЖ-159. На одной половине образцов отверстия располагались под углом к поверхности 90^0 , на другой – под углом 35^0 . Режим термоциклирования трапецеидальный $T_{min} \leftrightarrow T_{max}$: $50^0C \leftrightarrow 900^0C$ с учетом времени разогрева и охлаждения.

Численное решение задачи оценки усталостной долговечности модели образцов жаровой трубы из сплава ВЖ-159 при термоциклическом нагружении было проведено в три этапа путём последовательного решения задач:

- электромагнитной задачи, основанной на уравнении Максвелла;
- нестационарной задачи, основанной на решении уравнения теплопроводности;
- задачи оценки усталостной долговечности модели жаровой трубы камеры сгорания при термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряжённого состояния.

На рис. 4 приведено распределение интенсивности напряжений, а на рис. 5 – интенсивности пластических деформаций фрагмента модели жаропрочной трубы с перфорированными отверстиями в районе одного из каналов для второго цикла нагружения в случае нормального ($\beta = 90^0$) и наклонного ($\beta = 35^0$) охлаждающих отверстий. Видно, что максимальные значения интенсивности напряжений наблюдается внутри стенки жаровой трубы, в то время как максимальные значения интенсивности пластических деформаций наблюдаются вблизи наружной разогретой кромки поверхности канала, где процессы накопления повреждений происходят наиболее интенсивно (наличие макроскопических трещин в эксперименте наблюдалось именно в этом месте).

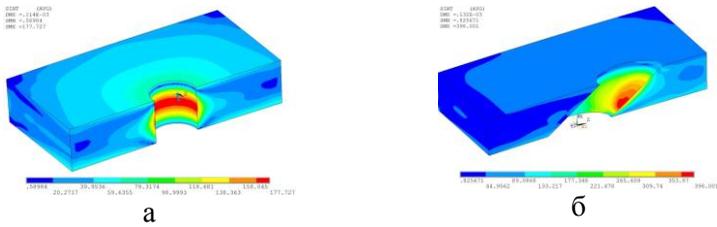


Рис. 4

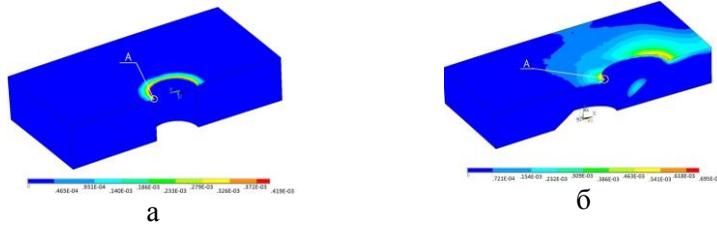


Рис. 5

В табл.4 представлены результаты расчётов (число циклов до разрушения), их сравнение с опытными данными, полученными для двух углов наклона охлаждающих каналов. Видно качественное и необходимое для проведения инженерных расчётов количественное совпадение опытных и расчётных данных.

Таблица 4 - Экспериментальная и расчетная термоциклическая долговечность модельных образцов

Угол наклона оси каналов	Число циклов до разрушения N_f (эксперимент)						N_f^{cp}	N_f (расчёт)
	$\beta = 90^0$	983	576	851	950	765	1431	926
$\beta = 35^0$	200	117	174	194	156	292	189	170

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе:

1. Проведена оценка достоверности модели МПС, предложенной Ю.Г. Коротких, и развитых программных средств для расчета процессов циклического термопластического деформирования и накопления усталостных повреждений путем проведения расчётов и сопоставления их результатов с опытными данными и численными результатами, полученными другими исследователями для произвольных сложных траекторий термоциклического деформирования.

2. Показано, что модель МПС Ю.Г. Коротких учитывает:

– зависимость физико-механических характеристик материала от температуры;

- влияние наличия соотношений между скоростями механической и температурной деформацией;
- эффекты сложного нагружения;
- влияние на процессы накопления повреждений объемности напряженного состояния;
- нелинейность накопления повреждений и нелинейность суммирования повреждений при изменении режима деформирования.

3. Проведена верификация определяющих соотношений МПС Ю.Г. Коротких и получены материальные параметры и скалярные функции для ряда жаропрочных сплавов: Nimonic 80A, Haynes188, ВЖ-159 и других конструкционных сплавов.

4. Представлены результаты численных экспериментов по циклическому термомеханическому деформированию жаропрочных сплавов при комбинированном термомеханическом нагружении. Показано, что:

- для изотермических режимов деформирования наблюдается существенное влияние температуры на усталостную долговечность сплавов;
- неизотермическое циклическое деформирование по сравнению с изотермическим приводит к снижению усталостной долговечности;
- непропорциональное деформирование приводит к снижению усталостной долговечности по сравнению с пропорциональным;
- применяемая в работе модель повреждённой среды качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает процессы изотермического и неизотермического деформирования и накопления усталостных напряжений при комбинированном термомеханическом нагружении.

5. Проведён анализ кинетики НДС конструктивных элементов, подверженных воздействию знакопеременного термоциклического нагружения и выполнен на его основе прогноз усталостной долговечности:

- компактного образца с концентраторами при термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряжённого состояния, моделирующего работу «корня» сварного соединения труб системы компенсации давления энергетических установок, работающих в условиях нестационарного теплообмена;
- моделей жаровых труб камер сгорания авиационных ГТД с различными углами наклона охлаждающих каналов.

6. Установлено, что правило линейного суммирования повреждений (гипотеза Пальмгрена-Майнера) при блочном термоциклическом нагружении материалов и конструкций дает ошибку, как в консервативную сторону, так и в неконсервативную сторону.

7. Показано, что используемый в диссертационной работе подход к оценке термоциклической долговечности элементов конструкций при сложном нагружении пригоден для разработки на его основе экспертных систем оценки ресурса ответственных инженерных объектов.

Полученные в диссертации деформационные и прочностные свойства жаропрочных сплавов являются необходимым элементом для дальнейшей оценки ресурсных характеристик элементов конструкций при термомеханических воздействиях. Результаты работы найдут применение при оценке прочности и ресурса элементов ГТД, конструктивных узлов энергетических установок и др.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Игумнов Л.А., Шишулин Д.Н., Гусева М.А. Моделирование сложного пластического деформирования и накопления усталостных повреждений в жаропрочных сплавах при комбинированном термомеханическом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. №. 78 (1). С. 45–59.

2. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Игумнов Л.А., Казаков А.Д., Емельянов А.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. №. 78 (2). С. 188–207.

3. Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Оценка усталостной долговечности компактного образца с концентраторами при термоциклическом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. №. 78 (3). С. 333-349.

4. Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Численный анализ термоциклической долговечности моделей жаровых труб с различными углами наклона охлаждающих каналов // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. №. 79. (2). С. 220-233.

5. Volkov I.A., Igumnov L.A., Desyatnikova M.A. Defining relations of mechanics of damaged media effected by fatigue and creep // Materials Physics and Mechanics. – 2018. Vol. 36 (1). P. 147 – 153.

Материалы докладов на научных конференциях и другие научные публикации:

6. Гусева М.А., Дудник Ю.Е., Игнатова О.Н., Новиков И.Г., Раевский В.А., Соколов С.С., Чайка Т.И. Упруго-вязко-пластическая модель прочности металлов // Материалы докладов конференции "XX Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки". – Княгинино: НГИЭУ. – 2015. Стр.174.

7. Коротких Ю.Г., Волков И.А., Гусева М.А., Тарасов И.С. Моделирование термопластического деформирования и разрушения жаропрочных сплавов при комбинированном циклическом термомеханическом нагружении // Материалы VIII международного научного симпозиума, посвященного 85-летию со дня рождения профессора В.Г. Зубчанинова.– Тверской государственный технический университет. – Тверь – 2015. С. 156–163.

8. И.А. Волков, Емельянов А.А., Гусева М.А., Волков А.И. Моделирование процесса суммирования повреждений при деградации материала по механизмам усталости и ползучести // Вестник научно-технического развития. № 10 (62), 2014. С. 3–12

9. Волков И.А., Шишулин Д.Н., Тарасов И.С., Гусева М.А. Обоснование эволюционного уравнения накопления повреждений при термоциклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела. Межвузовский сборник научных трудов. Тверской государственный технический университет. – Тверь. – 2017. С. 15–24.

Подписано в печать 18.10.2018 г. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 1916 Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23