

На правах рукописи



Боев Евгений Владимирович

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

01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2022

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

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

**Официальные
оппоненты:**

Пичков Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, АО «ОКБМ Африкантов», главный специалист отдела экспериментальной прочности и систем диагностики

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

Ведущая организация

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «29» июня 2022 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при ННГУ имени Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1241>
Автореферат разослан «12» мая 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



**Горохов Василий
Андреевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Обоснованность оценки ресурса ответственных инженерных объектов (ОИО) (авиационные газотурбинные двигатели, ядерные энергетические установки, объекты химической, газовой, нефтяной отрасли и др.) в течение длительного срока службы (40–60 лет) требует корректного учета вкладов действующих факторов в повреждение материала критических зон элементов оборудования, которые из-за специфики своего эксплуатационного нагружения определяют ресурс конструкции в целом. Поэтому при их проектировании необходим тщательный анализ работоспособности элементов оборудования с выделением критических элементов и вероятности разрушения с учетом конкретных условий работы и действующих факторов, влияющих на процессы деформирования материала и деградацию его прочностных характеристик. На практике с этой целью широко используются верифицированные методики расчета кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС), зарождения и развития дефектов.

Для инженерных объектов, работающих в условиях нестационарных термодинамических нагружений (атомные реакторы, турбины высокого давления, котлы, авиационные газотурбинные двигатели (ГТД), объекты химического машиностроения и др.), одним из доминирующих механизмов деградации начальных свойств материала, определяющим ресурс конструктивных узлов, является двухчастотное циклическое нагружение.

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 последние десятилетия для решения таких задач успешно развивается новое научное направление – механика поврежденной среды (МПС).

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

Степень разработанности темы

Классические методы предсказания усталостной долговечности при помощи полуэмпирических формул (правил), основанные на стабилизированном анализе процесса деформирования и связывающие параметры петель упругопластического деформирования с количеством циклов до разрушения требуют большого количества экспериментальной информации и справедливы только для узкого класса режимов нагружения.

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 и, не связаны с конкретными уравнениями процессов деформирования. На самом деле история упругопластического

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 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 сложных режимах двухчастотного нагружения с использованием определяющих соотношений МПС.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести оценку достоверности уравнений МПС, предложенных Ю.Г. Коротких и развитых его учениками (И.А. Волков, Д.Н. Шишулин) для сложных режимов двухчастотного циклического 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 деформации и температуры (жесткое нагружение), либо компонент тензора напряжения и температуры (мягкое нагружение);
- провести оценку усталостной долговечности конкретных конструктивных элементов с целью выявления характерных особенностей процесса усталостного разрушения опасных зон элементов и узлов несущих конструкций при двухчастотном циклическом нагружении.

Научная новизна

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

- влияние жесткого блочного циклического нагружения на усталостную долговечность поликристаллических конструкционных сплавов;
- влияние мягкого блочного несимметричного малоциклового нагружения на деформационные характеристики нержавеющей сталей аустенитного и ферритного класса;
- влияние механизмов мало- и многоциклового усталости на ресурсные характеристики поликристаллических конструкционных сплавов;
- влияние двухчастотного циклического нагружения на усталостную долговечность конструкционных сталей;

Получены новые решения задачи оценки усталостной долговечности конструктивных элементов дефлектора диска турбины высокого давления (ТВД) современных авиационных ГТД при двухчастотном циклическом нагружении.

Теоретическая значимость работы

Получены новые данные по усталостной долговечности конструкционных материалов (металлов и их сплавов). Показано существенное влияние двухчастотного циклического нагружения на усталостную долговечность поликристаллических конструкционных сплавов. 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 усталостной долговечности опасных зон элементов и узлов несущих конструкций при двухчастотном циклическом нагружении. Показано, что благодаря учёту основных эффектов, сопутствующих процессам циклического нагружения, на базе разработанного подхода возможно создание экспертных систем по оценке ресурса конструкций и аппаратов современной техники. Внедрение результатов работы возможно на предприятиях АО «ОДК – Пермские моторы», ПАО «Туполев», ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация», 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 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 циклической усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при двухчастотном циклическом нагружении;
- научно-обоснованная инженерная методика оценки ресурсных характеристик материалов и конструкций, позволяющая осуществлять прогноз циклической усталостной долговечности локальных зон элементов и узлов несущих конструкций по заданной истории изменения компонент тензора деформации и температуры (жесткое нагружение), либо компонент тензора напряжения и температуры (мягкое нагружение), полученных из решения соответствующих краевых задач;
- результаты решения конкретных прикладных задач: оценка ресурсных характеристик конструктивного элемента дефлектора диска ТВД одного из

авиационных ГТД при различных режимах циклического двухчастного нагружения.

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 положения и полученные в диссертационной работе результаты докладывались и обсуждались:

- XXV международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, март 2019 года;

- XLVII International Conference “Advanced Problems in Mechanics” (APM 2019), Санкт-Петербург, 2019;

- 9th International Conference on Materials structure and micromechanics of fracture, сентябрь 2019;

- Ежегодная конференция НИИ Механики, декабрь 2019;

- XXVI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, март 2020;

- Математический центр АНО ВО «Университет Сириус», Сочи, конференция матцентров, август 2021. Секция «Нелинейная динамика и управление»;

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ [1 - 15], в том числе 4 [1 - 4] из них в изданиях, входящих в перечень, рекомендуемых ВАК РФ и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора:

- разработка ряда модулей программы «EXPMODEL»;
- численный анализ усталостной долговечности конструктивных сталей при одночастотном и двухчастотном циклическом нагружении;

- численный анализ усталостной долговечности нержавеющей стали 08X18H10T при двухблочном малоцикловом нагружении;

- численный анализ напряженно-деформированного состояния нержавеющей сталей аустенитного и ферритного класса в условиях мягкого блочного несимметричного малоциклового нагружения;

- численный анализ характерных особенностей усталостной долговечности конкретных конструктивных элементов дефлектора диска ТВД из сплава ЭП742 одного из авиационных ГТД при различных режимах двухчастного нагружения.

В основных совместных работах [1 - 4] Волкову И.А. принадлежит общее руководство исследованиями, постановка задач; Игумнову Л.А. - участие в обсуждении результатов; Шишулину Д.Н. – помощь в получении материальных

параметров и скалярных функций МПС и решении задач с использованием ВК «ANSYS».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 143 страницы основного текста, 52 рисунка и 17 таблиц. Список литературы на 13 страницах включает 109 наименований.

Диссертация выполнена при поддержке

На различных этапах работа поддерживалась средствами различных фондов, ведомств и государственных программ: параграф 3.2 подготовлен при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации в рамках Постановления №220 от 09.04.2010 (№14.У26.31.0031 от 05.02.2018); параграф §3.4 подготовлен при финансовой поддержке Государственного задания Минобрнауки России (№0729-2020-0054); глава 4 подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№20-08-00450 А); глава 2 подготовлена при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (внутренний номер Н-496-99_2021-2023).

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 и 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 приложений.

В первой главе, имеющей обзорный характер, описаны основные физические аспекты механизма усталостного разрушения поликристаллических конструкционных сплавов, проведен анализ основных критериев и моделей усталостного разрушения и рассмотрена специфика двухчастотного циклического нагружения. Рассмотрены методы численного решения краевых задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ).

Развитие экспериментальных и теоретических исследований процессов деградации начальных прочностных свойств материалов и способов оценки их усталостной долговечности связано с именами отечественных исследователей, таких как: Ю.М. Темис, М.М. Гаденин, С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, Н.А. Махутов, Н.Ф. Морозов, А.Н. Романов, Н.С. Можаровский, В.В. Москвитин, А.П. Гусенков, В.Т. Трощенко, С.А. Лебедев, Ю.Г. Матвиенко, Ю.Г. Коротких, И.А. Волков, Л.А. Игумнов, В.С. Бондарь, С.А. Капустин, А.А. Хлыбов, С.Н. Пичков, В.В. Мишакин, Д.Н. Шишулин 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., Biron A., Bue-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.

Экспериментально-теоретические исследования кинетики изменения НДС и накопления усталостных повреждений в конструкционных сплавах при циклическом двухчастотном нагружении имеют принципиальное значение в практических приложениях, связанных с расчетами на прочность и долговечность инженерных конструкций и аппаратов новой техники, подверженных воздействию многопараметрических нестационарных термосиловых нагрузок (авиационные ГТД, атомные энергетические установки, объекты химического машиностроения и др.).

Вторая глава диссертации посвящена анализу определяющих соотношений МПС Ю.Г. Коротких для оценки усталостной долговечности материалов и конструкций.

Модель поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных составных частей:

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

Для описания эффектов монотонного и циклического деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность пластического нагружения в форме Мизеса:

$$F_{pl} = S_{ij}S_{ij} - C_{pl}^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}, \quad (1)$$

где σ'_{ij} – компоненты девиатора напряжений, а ρ_{ij} – координаты центра поверхности текучести.

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве деформаций вводится поверхность циклической «памяти», позволяющей отделить монотонные процессы от циклических:

$$a_e = (e_{ij}^p - \xi_{ij})(e_{ij}^p - \xi_{ij}) - a_{emax}^2 = 0, \quad (2)$$

где a_{emax} – максимальное значение интенсивности пластических деформаций e_{ij}^p , а ξ_{ij} – тензор односторонне накопленных пластических деформаций.

Постулируем, что структура эволюционного уравнения для радиуса поверхности текучести C_{pl} имеет вид:

$$\dot{C}_{pl} = q_\chi \dot{\chi}_m + a_c (Q_{s\chi} - C_{pl}) \dot{\chi}_c + a_\xi (Q_{s\xi} - C_{pl}) \dot{\chi}_\xi + q_T \dot{T} \quad (3)$$

$$C_{pl} = C_{pl}^0 + \int_0^t \dot{C}_{pl} dt, \quad (4)$$

$$\dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \dot{\chi}_\xi = \left(\frac{2}{3} \dot{\xi}_{ij} \dot{\xi}_{ij} \right)^{1/2}, \chi_\xi = \int_0^t \dot{\chi}_\xi dt, \quad (5)$$

$$\dot{\chi}_m = \begin{cases} 0 & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0 \\ \dot{\chi} & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0 \end{cases}, \dot{\chi}_c = \begin{cases} \dot{\chi} & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0 \\ 0 & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$q_\chi = q_2 A - (1 - A) q_1, Q_{s\chi, \xi} = Q_{2\chi, \xi} A + (1 - A) Q_{1\chi, \xi},$$

$$A = 1 - \cos^2 \Theta, \cos \Theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, n_{ij}^e = \frac{\dot{e}_{ij}^p}{(\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p)^{1/2}}, n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}}, \quad (7)$$

где q_1, q_2, q_T – модули изотропного упрочнения (разупрочнения) при монотонных нагружениях; $Q_{1\chi, 1\xi}, Q_{2\chi, 2\xi}$ – модули циклического изотропного упрочнения (разупрочнения); $a_{c, \xi}$ – постоянные, определяющие скорость процесса стабилизации формы петли гистерезиса; $Q_{s\chi, s\xi}$ – стационарные значения радиуса поверхности текучести; $\dot{\chi}_m$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования на монотонных участках; $\dot{\chi}_c$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования на участках стабилизированного циклического деформирования без смещения центра поверхности a_e ; $\dot{\chi}_\xi$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на участках циклического деформирования со смещением центра поверхности a_e .

Эволюция тензора микронапряжений ρ_{ij} принимается в виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = f(\chi) (\dot{\rho}_{ij}^m + \dot{\rho}_{ij}^p + \dot{\rho}_{ij}^r), \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (8)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^m = g_1^m \dot{e}_{ij}^p - g_2^m \rho_{ij}^m \dot{\chi} + g_T^m \rho_{ij}^m \langle \dot{T} \rangle, \quad (9)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^p = g_1^p \dot{e}_{ij}^p - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi} + g_T^p \rho_{ij}^p \langle \dot{T} \rangle, \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^r = g_1^r \dot{e}_{ij}^p - g_2^r \left(\frac{\rho_{min}^r - \rho_u^r}{\rho_u^r} \right) \rho_{ij}^r \dot{\chi} \cos \gamma + g_T^r \rho_{ij}^r \langle \dot{T} \rangle, \quad (11)$$

$$\cos \gamma = \begin{cases} \left| \frac{\rho_{ij} \rho_{ij}^r}{(\rho_{ij} \rho_{ij})^{1/2} (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}} \right| & \text{при } \cos \gamma < 0 \\ 0 & \text{при } \cos \gamma > 0 \end{cases}, \rho_u^r = (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}, \quad (12)$$

$$g_T^{m,p,r} = \frac{1}{g_1^{m,p,r}} \left[\frac{\partial g_1^{m,p,r}}{\partial T} \right], \quad (13)$$

$$f(\chi) = f(\chi_m) + f(\chi_c) + f(\chi_\xi), \quad (14)$$

$$f(\chi_{m,c,\xi}) = 1 + k_1^{m,c,\xi} \left(1 - e^{-k_2^{m,c,\xi} \chi_{m,c,\xi}} \right), \quad (15)$$

где $g_1^{m,p,r}, g_2^{m,p,r}, k_1^{m,c,\xi}, k_2^{m,c,\xi}$ – параметры материала.

Эффективные значения компонент тензора напряжений и микронапряжений определяются через эффективные значения модулей упругости:

$$\begin{aligned}\tilde{\sigma}'_{ij} &= F_1(\omega) \sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}} \sigma'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{(1-\omega) \left[1 - \frac{(6K+12G)}{(9K+8G)} \omega \right]}, \\ \tilde{\sigma} &= F_2(\omega) \sigma = \frac{K}{\tilde{K}} \sigma = \frac{\sigma}{4G(1-\omega)/(4G+3K\omega)}, \\ \tilde{\rho}_{ij}^{(n)} &= F_1(\omega) \rho_{ij}^{(n)}, n = m, p, r,\end{aligned}\tag{16}$$

где $F_{1,2}(\omega)$ – функции Мак-Кензи.

Выражение для опасной энергии повреждения при совместных механизмах малоциклового (МЦУ) и многоциклового (МнЦУ) усталости за один цикл нагружения представим в виде:

$$W_{o(i)} = W_{p(i)}[1 - f(\gamma)], \quad W_{p(i)} = \int \rho_{ij} de_{ij}^p,\tag{17}$$

где функция $f(\gamma)$, учитывает величину неопасной энергии в полной энергии, затраченной на пластическое деформирование материала и зависящей от параметра γ , характеризующего относительный уровень действующих максимальных напряжений в цикле нагружения.

$$f(\gamma) = \begin{cases} 0, & \text{при } \gamma > 1, \\ 1 - \left(\frac{\gamma - \gamma_*}{1 - \gamma_*} \right)^n, & \text{при } \gamma_* \leq \gamma \leq 1, \\ 1, & \text{при } \gamma < \gamma_*. \end{cases}$$

$$\gamma = \frac{\tilde{\sigma}_u^*}{\tilde{\sigma}_{hcf}}, \quad \tilde{\sigma}_u^* = [(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}^r)(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}^r)]^{1/2},\tag{19}$$

$$\tilde{\sigma}_{hcf} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{hcf} + \int_0^t \dot{C}_{pl}^c dt, \quad \dot{C}_{pl}^c = a_c(Q_{s\chi} - C_{pl})\dot{\chi}_c + a_\xi(Q_{s\xi} - C_{pl})\dot{\chi}_\xi + q_T \dot{T}.$$

В выражении (19) $\tilde{\sigma}_u^*$ – нормированная интенсивность девиатора напряжений; $\tilde{\sigma}_{hcf}$ – значение интенсивности напряжений при котором происходит переход от механизма МЦУ к МнЦУ, σ_{hcf} – константа материала.

Постулируем, что уравнение для скорости накопления усталостных повреждений в условиях совместного действия малоциклового и многоциклового нагружения можно представить в виде:

$$\dot{\omega} = f_1(\beta) f_2(\omega) f_3(W_o) \dot{W}_o,\tag{21}$$

где

$$\begin{aligned}W_o &= \sum_{i=1}^{N_f} W_{o(i)}, \\ f_1(\beta) &= \exp(k \beta), \\ f_2(\omega) &= \begin{cases} 0, & \text{при } W_o \leq W_{oa}, \\ c \omega^{-1/3} (1 - \omega)^{-2/3} & \text{при } W_o > W_{oa}, \end{cases} \\ f_3(W_o) &= \frac{W_o - W_{oa}}{W_{of} - W_{oa}},\end{aligned}\tag{22}$$

где c, W_{oa}, W_{of} – параметры материала.

В качестве критерия разрушения принято условие достижение величины поврежденности ω критического значения:

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (23)$$

В конце второй главы приведен алгоритм интегрирования определяющих соотношений МПС по заданной истории термомеханического нагружения.

Третья глава диссертации посвящена программной реализации модели повреждённой среды Ю.Г. Коротких и возможности использования рассмотренных уравнений для расчета усталостной долговечности материалов и конструкций при двухчастотных режимах циклического нагружения.

Определение основных характеристик процесса циклического упругопластического деформирования повреждённых материалов (параметров состояния), осуществляется при соответствующей формулировке определяющих соотношений МПС в приращениях, которые зависят от выбранного шага Δt . 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 (жесткое нагружение), либо компонент тензора напряжений $\sigma_{ij}(t)$ и температуры $T(t)$ (мягкое нагружение) рассчитывать параметры процессов циклического упругопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах при двухчастотных режимах циклического нагружения.

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 усталостных повреждений в рамках программы «EXPMODEL» может осуществляться в одномерной, двумерной (плоское напряжённое состояние) и трехмерной (объёмной) постановках путем совместного интегрирования определяющих соотношений циклической упругопластичности и эволюционных уравнений накопления усталостных повреждений для элементарного объема материала опасной зоны конструктивного элемента по заданной истории изменения тензора полных деформаций и температуры (жесткое нагружение), либо тензора напряжений и температуры (мягкое нагружение).

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 задачах по циклическому деформированию лабораторных образцов и сравнении полученных численных результатов с опытными данными.

В первом примере представлены результаты сопоставления численных и экспериментальных данных конструкционных сталей 20, стали 08X18H12T(1) - в состоянии поставки и 08X18H12T(2) - после эксплуатационной наработки при мягком одночастотном циклическом нагружении: режим №1 – одночастотное высокочастотное нагружение при симметричном цикле; режим №2 – одночастотное высокочастотное нагружение при асимметричном цикле; режим №3 – одночастотное низкочастотное (малоцикловое) нагружение. Среднее напряжение цикла во всех случаях составляло $\sigma_m = 50$ МПа.

На рис.1–3 приведено сравнение результатов расчётных и экспериментальных кривых усталости для сталей 08X18H12T (1), 08X18H12T (2) и стали 20. Пунктирными линиями отмечены осредненные опытные данные, красными маркерами – результаты расчёта по предложенной модели МПС, а черными – экспериментальные точки. Видно качественное и количественное совпадение результатов расчета с опытными данными.

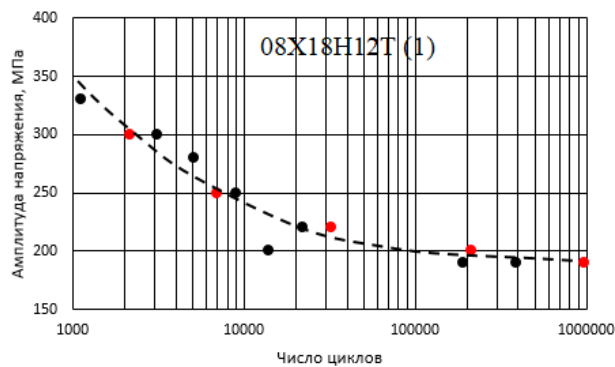


Рис. 1

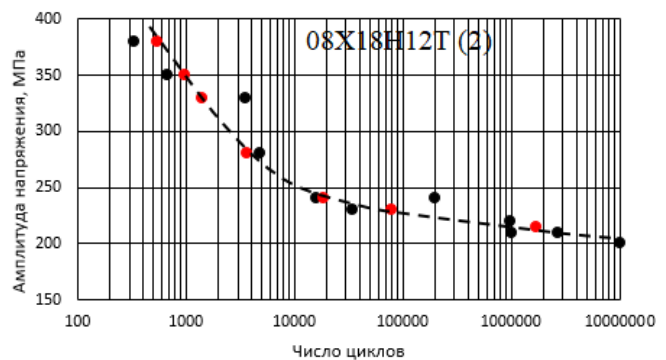


Рис. 2

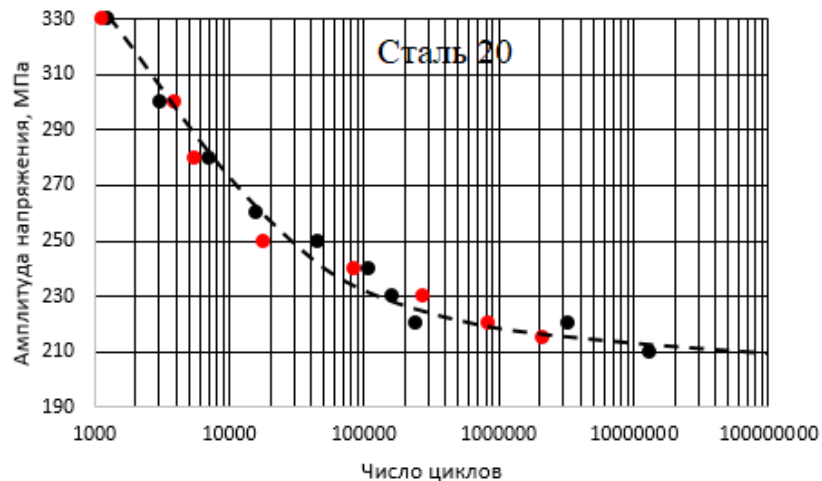


Рис. 3

Во втором примере представлены результаты сопоставления численных и экспериментальных данных при жестком двухблочном малоцикловом нагружении лабораторных образцов из стали 08X18H10T.

Испытания реализованы при симметричном нагружении в условиях контролируемой знакопеременной осевой пластической деформации с использованием двух значений амплитуд пластической деформации

(двухблочное нагружение), изменяющихся как в увеличивающемся, так и в уменьшающемся порядке.

Осуществлялось три режима двухблочного циклического нагружения: нагружение с амплитудой $e_{11}^p = 0,2\%$ до $N = 1400$ циклов, затем следовал переход на циклическое нагружение с амплитудой $e_{11}^p = 0,6\%$ до образования макротрещины; нагружение с амплитудой $e_{11}^p = 0,2\%$ до $N = 1400$ циклов, затем следовал переход к циклическому нагружению с амплитудой $e_{11}^p = 0,4\%$ до образования макротрещины; нагружение с амплитудой $e_{11}^p = 0,6\%$ до $N = 130$ циклов, затем следовал переход к циклическому нагружению с амплитудой $e_{11}^p = 0,2\%$ до образования макротрещины.

На рис. 4 представлена экспериментальная кривая МЦУ для стали 08X18H10T, с нанесенными на нее расчетными данными. Видно, качественное и количественное совпадение опытных и расчетных данных.

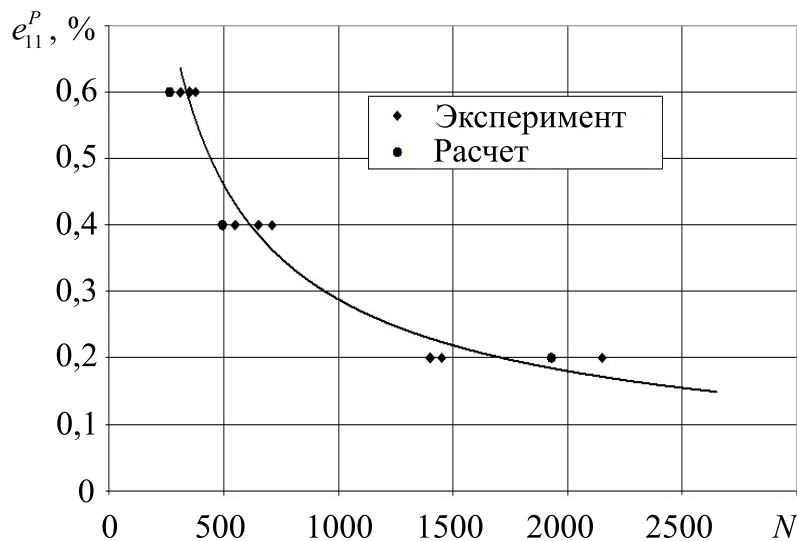


Рис. 4

В третьем примере оценка достоверности предложенного варианта модели МПС проводилась на результатах экспериментальных исследований лабораторных образцов из нержавеющей стали аустенитного (SS316L, SS304) и ферритного (20 MnMoNi5-5) класса в условиях мягкого блочного несимметричного малоциклового нагружения.

В первом примере для стали 20MnMoNi5-5 нагружение состоит из двух блоков: на первом блоке реализуется 200 циклов симметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 460 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 0 \text{ МПа}$; на втором блоке реализуется 75 циклов несимметричного нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 460 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 100 \text{ МПа}$.

В следующем примере представлены результаты исследований лабораторных образцов из стали SS316L, при мягком блочном несимметричном циклическом нагружении, состоящем из четырёх блоков: на первом блоке реализуется 20 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 195 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52 \text{ МПа}$; на втором блоке реализуется 20 циклов мягкого циклического нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 221 \text{ МПа}$ и

средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52 \text{ МПа}$; на третьем блоке реализуется 20 циклов нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 247 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52 \text{ МПа}$; на четвертом блоке реализуется 20 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 195 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 52 \text{ МПа}$;

На рис. 5 приведены результаты сравнения расчётных (сплошные линии) и экспериментальных (маркеры) зависимостей средней деформации от числа циклов нагружения, а на рис. 6 представлены кривые циклического деформирования, построенные по результатам расчёта.

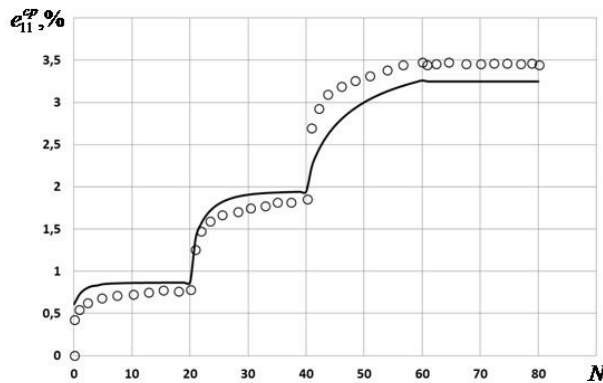


Рис. 5

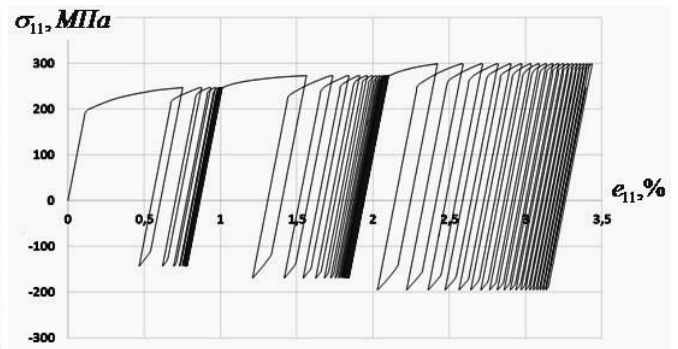


Рис. 6

В третьем примере представлены результаты численного моделирования процессов деформирования образцов из стали SS304 при блочных несимметричных режимах мягкого циклического нагружения: на первом блоке реализуется 50 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 248 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 78 \text{ МПа}$; на втором блоке реализуется 50 циклов несимметричного мягкого нагружения с амплитудой $\sigma_{11} = 248 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 117 \text{ МПа}$; на третьем блоке реализуется 20 циклов нагружения с амплитудой напряжений $\sigma_{11} = 248 \text{ МПа}$ и средним напряжением $\sigma_{11}^{cp} = 78 \text{ МПа}$.

Сравнение численных и экспериментальных результатов при мягком блочном несимметричном малоцикловом нагружении позволяет сделать вывод о достоверности определяющих соотношений модели поврежденной среды.

В четвертом примере представлены результаты сопоставления численных и экспериментальных данных при действии циклического двухчастотного нагружения для сталей 20 и 08X18H12T(1) и 08X18H12T(2).

Каждый из указанных конструкционных материалов испытывали при следующем режиме нагружения: циклическое нагружение реализуемое за счет изменения среднего напряжения в цикле σ_m в пределах от 0 до 100 МПа с частотой 0,082 Гц при циклическом нагружении с частотой 34 Гц (двухчастотное нагружение).

На рис. 7-9 приведены результаты сравнения расчётных и экспериментальных кривых усталости при циклическом двухчастотном нагружении для сталей 08X18H12T (1), 08X18H12T (2) и стали 20 в циклах высокой частоты. Здесь пунктирными линиями отмечены расчетные данные при одночастотном нагружении, сплошной черной линией отмечены расчетные данные при двухчастотном нагружении, а черными маркерами – экспериментальные результаты при циклическом двухчастотном нагружении. Из представленных рисунков, что расчётные значения по математической модели МПС качественно и количественно совпадают с экспериментальными результатами.

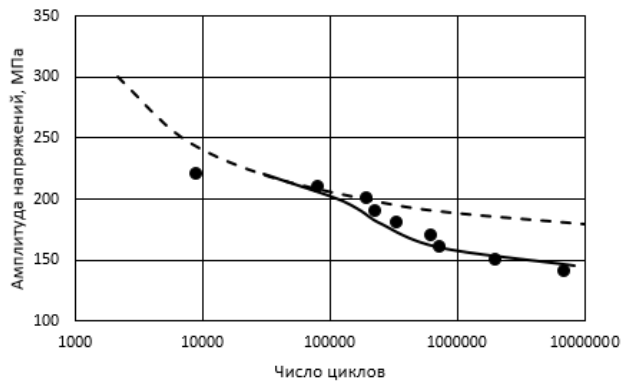


Рис. 7

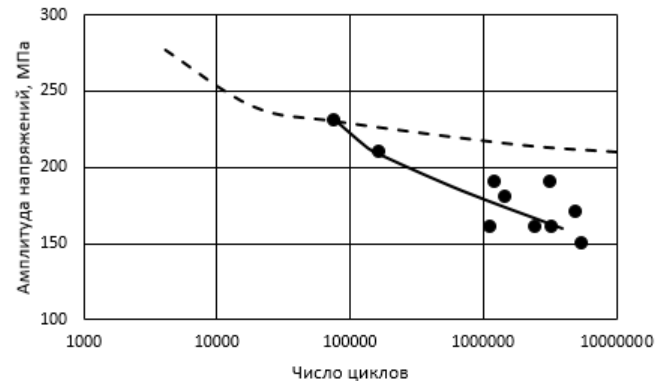


Рис. 8

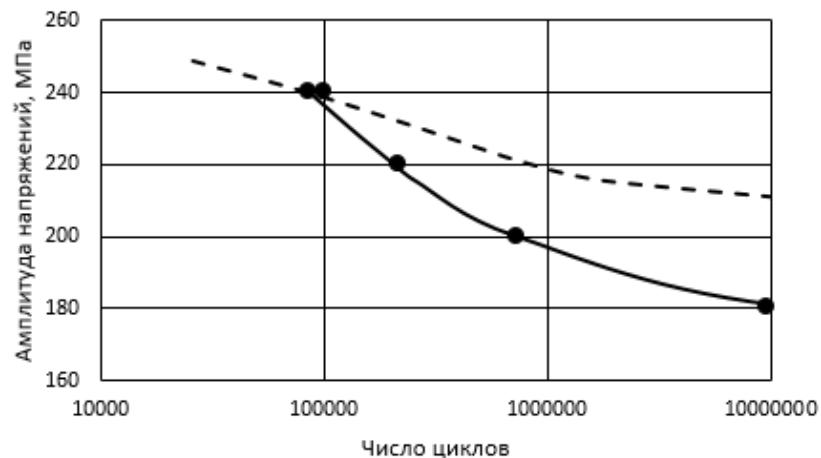


Рис. 9

Четвертая глава диссертации посвящена возможности использования модели МПС Ю.Г. Коротких для расчета усталостной долговечности элементов конструкций при циклическом двухчастотном нагружении.

Представлены результаты сопоставления численных и экспериментальных данных по усталостной долговечности конструктивных элементов дефлектора диска ТВД одного из авиационных ГТД, при различных режимах двухчастотного нагружения.

Испытывались сплошные образцы в форме лопатки из жаропрочного сплава ЭП742 толщиной 8,25; длиной 202мм с отверстием диаметром 13,75мм. Геометрия образца представлена на рис. 10.

Схема закрепления и нагружения образца показана на рис. 11. Высокочастотные низкоамплитудные напряжения, вызванные наложенной вибрационной нагрузкой, изменялись по симметричному закону с амплитудой напряжений 235,4; 215,8; 196,2; 176,6 и 157 МПа. Амплитуда низкочастотного нагружения составляла 687 МПа. Один из режимов двухчастотного циклического нагружения показан на рисунке 12.

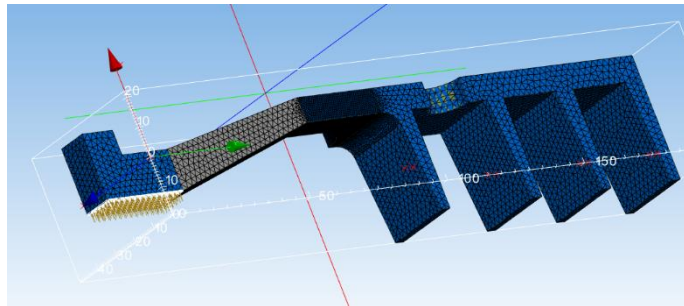


рис. 10

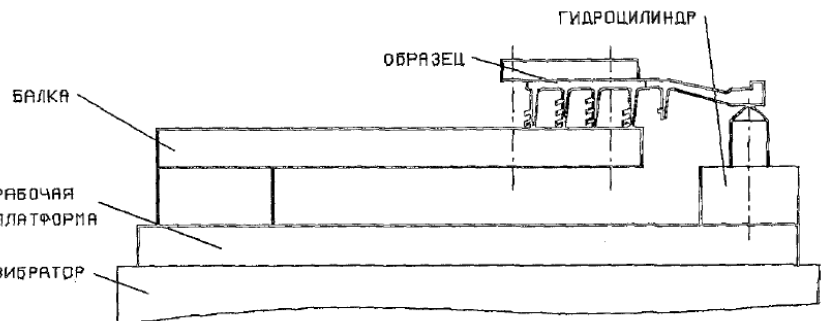


рис. 11

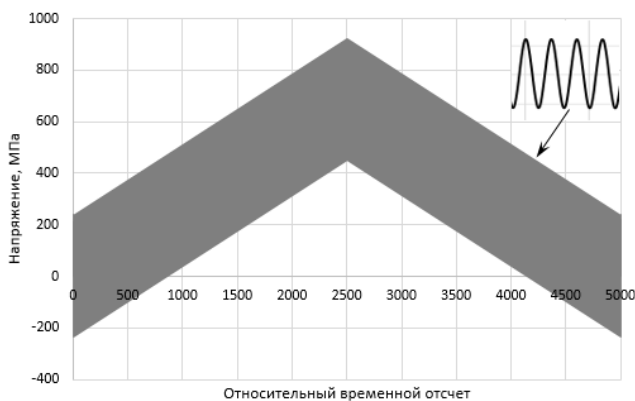


рис. 12

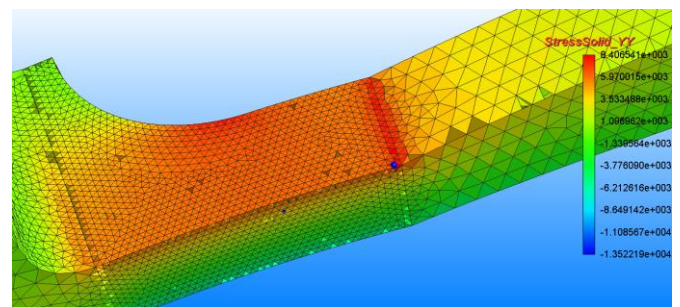


рис. 13

Численное решение задачи усталостной долговечности конструктивного элемента, вырезанного из дефлектора диска ТВД при циклическом двухчастотном нагружении было проведено в два этапа.

На первом этапе проводился расчет кинетики НДС с использованием ВК ANSYS, с целью определения опасной зоны конструктивного элемента и истории изменения НДС в этой зоне при различных значениях амплитуды напряжений. Опасная зона конструктивного элемента представлена на рис. 13. Максимальные эквивалентные напряжения в этой зоне составляют 923 МПа.

На втором этапе с использованием программы EXPMODEL по истории двухчастотного циклического нагружения, полученной из решения краевой задачи проводился расчет усталостной долговечности опасной зоны конструктивного элемента для реализованных эксплуатационных режимов нагружения.

На рис. 14 приведена история изменения НДС ($\sigma_{11} \sim e_{11}$) в опасной зоне конструктивного узла при циклическом двухчастотном нагружении с амплитудой высокой частоты 235,4 МПа для одного кванта нагружения.

На рис. 15 и 16 приведены кривые усталости в циклах низкой и высокой частот, где светлыми маркерами отмечены экспериментальные данные, а

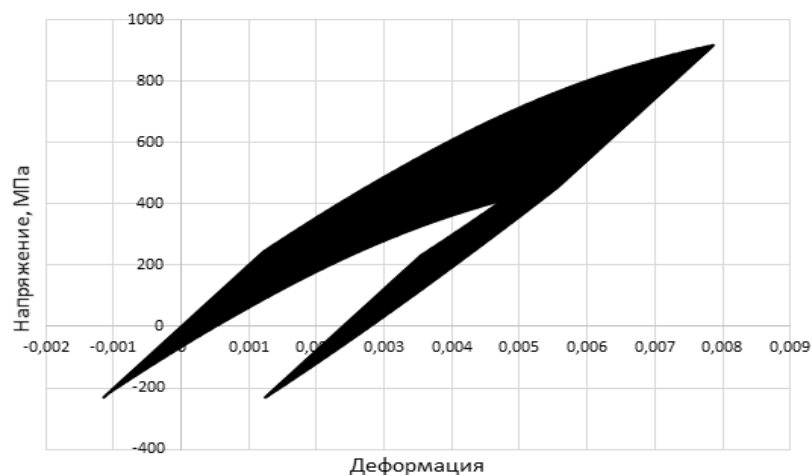


Рис. 14.

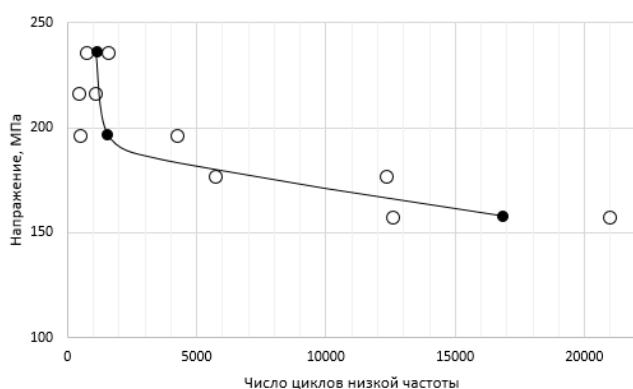


Рис. 15.

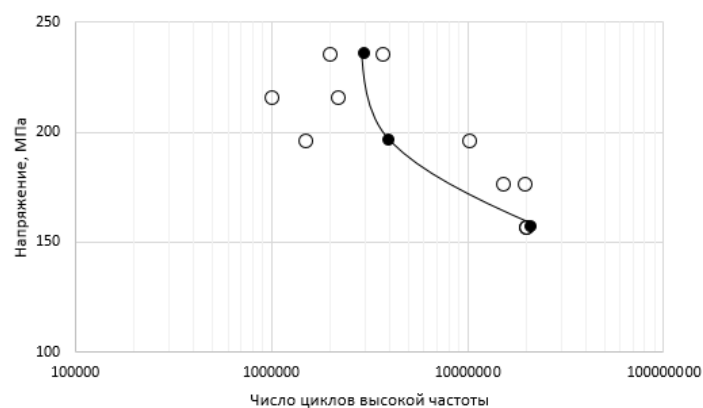


Рис. 16.

темными – численные результаты (сплошной линией показана осредненная усталостная кривая).

Видно, качественное и необходимое для проведения инженерных расчетов количественное совпадение опытных и расчетных данных.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе:

1. Проведена оценка достоверности модели МПС, предложенной Ю.Г. Коротких и развитой его учениками (И.А. Волков, Д.Н. Шишулин), алгоритмов и программных средств для расчета процессов циклического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений путем проведения расчётов и сопоставления их результатов с опытными данными и численными результатами, полученными другими исследователями для произвольных сложных режимов одночастотного и двухчастотного циклического нагружения.

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

- эффекты жесткого блочного малоциклового нагружения;
- эффекты мягкого несимметричного малоциклового нагружения (ratcheting);

- эффекты взаимодействия процессов малоциклового и многоциклового усталости;
- эффекты сложного нагружения;
- 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 конструкционных сплавов: жаропрочного сплава ЭП 742, конструкционных сталей 20, 08X18H10T, 08X18H12T (исходное состояние) и 08X18H12T (после эксплуатационной наработки), сталей аустенитного (SS316L, SS304) и ферритного (20 MnMoNi5-5) класса.

4. Представлены результаты численных экспериментов по циклическому упругопластическому деформированию конструкционных сплавов при различных режимах одночастотного и двухчастотного циклического нагружения при симметричном и асимметричном цикле нагружения. Показано, что:

- двухблочное жесткое нагружение оказывает существенное влияние на усталостную долговечность поликристаллических конструкционных сплавов;
- двухчастотное циклическое деформирование по сравнению с одночастотным приводит к снижению усталостной долговечности;
- применяемая в работе модель поврежденной среды качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает процессы мягкого блочного несимметричного малоциклового нагружения (ratcheting).

5. Установлено, что правило линейного суммирования повреждений (гипотеза Пальмгрена-Майнера) при жестком блочном циклическом нагружении дает ошибку, как в неконсервативную сторону, так и в консервативную сторону.

6. Проведён анализ кинетики НДС деталей авиационных ГТД, подверженных воздействию двухчастотного циклического нагружения и выполнен на его основе прогноз усталостной долговечности конструктивного элемента из дефлектора диска ТВД одного из авиационных ГТД.

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

Полученные в диссертации деформационные и прочностные свойства конструкционных сплавов являются необходимым элементом для дальнейшей оценки ресурсных характеристик элементов конструкций при сложных одночастотных и двухчастотных 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 и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

1. Д.Н. Шишулин, Е.В. Боев. Моделирование усталостной долговечности конструкционных сплавов при двухчастотном нагружении. // Проблемы прочности и пластичности. т. 83, №1, стр. 111-128, 2021г.
2. И.А. Волков, Л.А. Игумнов, Д.Н. Шишулин, Е.В. Боев. Моделирование процессов нестационарной ползучести в условиях многоосного нагружения с учетом накопления повреждений в конструкционном материале. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2022. №2, с. 25–34. I. A. Volkov, L. A. Igumnov, D. N. Shishulin, and E. V. Boev. Modeling of Non-Stationary Creep Processes Under Multiple Loading Conditions by Taking Into Account Damage Accumulation in a Structural Material. // ISSN 0025-6544, Mechanics of Solids, 2022, Vol. 57, No. 2, pp. 1–9.
3. Волков И.А., Игумнов Л.А., Шишулин Д.Н., Боев Е.В. Численное моделирование усталостной долговечности конструкционных сталей при одночастотном и двухчастотном нагружении. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2022. № 1. С. 103-121.
4. Е.В. Боев. Численное моделирование усталостной долговечности деталей авиационных ГТД при циклическом двухчастотном нагружении// Проблемы прочности и пластичности. т. 84, №1 стр. 63-82, 2022г.

Материалы докладов на научных конференциях и другие научные публикации:

5. L.A. Igumnov, E.V. Boev, A.A. Ipatov. Boundary-element modelling of a slow compressional wave in poroviscoelastic media // XLVII International Conference “Advanced Problems in Mechanics” (APM 2019), APM 2019 Book of abstracts, p. 9
6. I.A. Volkov, L.A. Igumnov, E.V. Boev. A continual model of damaged media and its realization in static and dynamic problems of mechanics of deformable solids // XLVII International Conference “Advanced Problems in Mechanics” (APM 2019), APM 2019 Book of abstracts, p. 9-10
7. Volkov, I.A. Igumnov, L.A. Modin, I.A. Boev, E.V. A model of damaged media for describing a creep-induced damage accumulation process. //9th International Conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture, MSFM 2019; Brno; Czech Republic; 26 - 28 June 2019; Code 163963. Procedia Structural Integrity Volume 23, 2019, Pages 281-286.
8. I. A. Volkov, L. A. Igumnov, D. N. Shishulin, and E. V. Boev. Numerical Modeling of the Fatigue Life of Structural Steels Under Single-Frequency And Dual-Frequency Loading. // ISSN 0025-6544, Mechanics of Solids, 2022, Vol. 57, No. 1, pp. 88–103. © Allerton Press, Inc., 2022. Russian Text © The Author(s), 2022, published in Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Mekhanika Tverdogo Tela, 2022, No. 1.
9. Л.А. Игумнов, И.А. Волков, А.В. Боев, Е.В. Боев. Математическая модель нестационарной ползучести металлов и сплавов при многоосном напряженном состоянии // Материалы докладов XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова Т.1. - М.: ООО "ТРИП". 2019 . с. 64-65
10. Волков И.А., Игумнов Л.А., Боев Е.В. Моделирование усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при

двухчастотном нагружении // Материалы XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, том 1, 2020, страницы 82-83

11. И.А. Волков, А.И. Волков, И.В. Сметанин, Е.В. Боев. Оценка усталостной долговечности элементов конструкций при термопульсациях // Материалы XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, том 1, 2020, страницы 84-86

12. И.А. Волков, Л.А. Игумнов, Е.В. Боев. Континуальная модель повреждённой среды и её реализация в динамических задачах механики деформируемого твёрдого тела // Журнал «Проблемы прочности, динамики и ресурса», 2019.

13. Е.В. Боев, В.А. Горохов. Параметрическая идентификация модели ползучести при терморadiационных воздействиях стали 1X18H10T // Материалы XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, том 1, страницы 60-62, 2020.

14. Боев Е.В., Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Моделирование ползучести и разрушения жаропрочных сплавов в условиях нейтронного облучения. // Материалы XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, том 1, страницы 58-60, 2020.

15. Волков И.А., Боев Е.В. Оценка ресурсных характеристик конструкционных сталей при двухчастотном нагружении. // В сборнике: Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXVII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Москва, 2021. С. 63-64

Подписано в печать 28.04.2022 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Заказ № 709. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе дизайна и цифровой печати

РИУ ННГУ им. Н.И.Лобачевского

603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37