

1.02.06

598

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

УДК 539.43

На правах рукописи

Порошин Вадим Борисович

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАЛОЦИКЛОВОЙ ПРОЧНОСТИ
ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Специальность 01.02.06 - "Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1984

ЧПИ

Работа выполнена на кафедре "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Гохфельд Д.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Коротких Ю.Г.,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник Шрон Р.З.

Ведущая организация - Институт проблем прочности АН УССР.

Защита состоится 27 июня 1984 года на заседании специализированного совета Д 053.13.01 в Челябинском политехническом институте (454044, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского политехнического института.

Автореферат разослан _____ мая _____ 1984 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент

 К.М. Кононов

АННОТАЦИЯ

Целью диссертационной работы являлась разработка методики оценки долговечности по критерию малоциклового прочностно-усталостного разрушения применительно к элементам теплонапряженных конструкций, работающих при циклическом неадиабатическом нагружении с выдержками.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

1. Обоснован выбор новых параметров состояния, отражающих специфические "циклические" как деформационные, так и прочностные свойства конструкционных сплавов в рассматриваемых условиях.

2. Предложено уравнение состояния для определения скорости накопления усталостного повреждения с учетом двух возможных механизмов повреждаемости, соответствующих быстрому пластическому и длительному (вязкому) деформированию. На основе данного уравнения построена модель, пригодная для расчета кинетики накопления повреждения в цикле и по числу циклов с целью определения долговечности при неадиабатическом неупругом циклическом пропорциональном нагружении с выдержками.

3. Решена задача идентификации модели с конкретным материалом, определены базовые испытания и в качестве примера найдены характеристики повреждаемости пяти жаропрочных материалов, применяемых в химическом и энергетическом машиностроении.

4. Выполнен анализ поведения модели при различных программах нагружения и проведена ее экспериментальная проверка в изотермических и неадиабатических условиях нагружения.

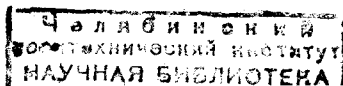
5. Методика прогнозирования долговечности применена к оценке малоциклового прочностно-усталостного разрушения объектов трех типов: рабочей лопатки газовой турбины; подколосниковой балки машины для обжиги окатышей; цилиндрического образца, подвергающегося повторным тепловым ударам.

Автор защищает следующие основные положения:

1. Математическую модель накопления повреждения при циклическом изотермическом и неадиабатическом нагружении с выдержками.

2. Результаты расчетного и экспериментального исследования влияния формы цикла деформирования и переменности температуры на сопротивление малоциклового разрушению.

3. Методику расчета кинетики накопления повреждения в цикле и оценки долговечности элемента конструкции, а также результаты ее применения к объектам трех типов.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ. Работа высоконагруженных элементов энергетического, металлургического, химического оборудования, деталей паро- и газотурбинных установок, авиационных и ракетно-космических аппаратов в условиях интенсивных циклических термомеханических воздействий часто характеризуется чередованием этапов пластического и вязкого деформирования. Отсутствие достаточно обоснованной и экспериментально подтвержденной методики затрудняет оценку малоциклового прочностного состояния, необходимую для обоснованного заключения о работоспособности конструкции при заданном сроке службы. Неуклонный рост требований к повышению надежности и снижению материалоемкости энергетического и металлургического оборудования делает необходимым совершенствование методов определения долговечности в условиях неизотермического малоциклового нагружения с выдержками.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Разработка методов и получение необходимых исходных данных для расчета кинетики накопления повреждения и оценки долговечности элементов конструкций в условиях циклического неупругого неизотермического деформирования с учетом ползучести. Решение этой задачи связано с необходимостью получения уравнения состояния сплошной среды для математического описания накопления усталостного повреждения, и построения на его основе модели малоциклового разрушения конструкционных материалов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. Уравнение состояния для скорости усталостного повреждения и модель малоциклового разрушения разрабатывались с учетом результатов выполненного анализа ранее предложенных моделей малоциклового усталости и опубликованных различными исследователями, а также полученных при участии автора экспериментальных данных^{*)}. Опытное исследование конструкционных материалов выполнено на специальной установке с применением современной автоматической контролирующей и регистрирующей аппаратуры. В теоретическом анализе и при обработке результатов испытаний использована ЭМ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Получено уравнение состояния (повреждае-

^{*)} В основу модели малоциклового разрушения положены результаты исследования варианта структурной модели реологических свойств, разработанного в Челябинском политехническом институте.

мости) циклически стабильной (стабилизированной) упруговязко-пластической среды, предназначенное для описания скорости накопления усталостного повреждения материала в условиях неизотермического малоциклового нагружения с выдержками при пропорциональном изменении компонент тензора циклической составляющей деформации. В соответствии с этим уравнением скорость накопления составляющих усталостного повреждения, отвечающих на каждом этапе цикла пластическому или вязкому деформированию, является функцией параметров состояния материала и температуры в текущий момент времени.

В качестве параметров уравнения повреждаемости предложено использовать параметры разработанного на кафедре "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" ЧИИ реологического уравнения, отражающего "циклические" (определяющие форму петли неупругого гистерезиса) свойства упруговязкопластической среды при малоцикловом неизотермическом нагружении с выдержками. Исходя из представления о микронеоднородности реальных конструкционных сплавов один из этих параметров может быть интерпретирован как неупруго работающая в данный момент часть элемента объема материала, второй - как относительная нагруженность этой части. Таким образом, достигнуто определенное единство в описании деформационных и прочностных свойств конструкционных материалов в рассматриваемых условиях нагружения.

На базе уравнения состояния построена модель накопления повреждения, отражающая влияние на сопротивление малоцикловому разрушению таких факторов как форма цикла деформирования, в частности, наличие выдержек в одном и обоих полуциклах, последовательность этапов быстрого и длительного нагружения, характер деформирования при выдержке (ползучесть, релаксация), частота нагружения, скорости деформирования в полуциклах растяжения и сжатия, закон изменения температуры в цикле и др.

Установлен базовый эксперимент и метод получения определяющих функций материала, входящих в уравнение повреждаемости. С целью снижения объема базового эксперимента предложен упрощенный вариант модели, в соответствии с которым одна из определяющих функций - функция повреждаемости - аппроксимируется кусочно-постоянной зависимостью. По данным испытаний получены определяющие функции (с различной степенью полноты) для пяти марок жаропрочных материалов. Показано, что функция повреждаемости

характеризует сопротивление конструкционных сплавов малоциклово-му разрушению в широком диапазоне скоростей нагружения, охватывающей область пластического (быстрого) и вязкого (длительного) деформирования. Функции повреждаемости всех исследованных материалов имеют качественно сходный характер.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. На основе модели повреждаемости разработана инженерная методика расчета кинетики накопления повреждения и оценки долговечности элементов конструкций с учетом истории неупругого деформирования и изменения температуры в точках тела в течение цикла. Расчет кинетики повреждаемости базируется на результатах расчета кинетики неупругого деформирования или прямого расчета параметров циклически стабильного состояния.

Для автоматизации процедуры идентификации модели, а также расчета кинетики повреждаемости и определения долговечности разработано необходимое программное обеспечение.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. Методика оценки малоциклово-й прочности, а также результаты отдельных расчетов внедрены на заинтересованных предприятиях гг. Ленинграда, Горького, Челябинска. Результаты исследования могут быть использованы в дальнейшем для совершенствования методов оценки малоциклово-й прочности и долговечности организациями, занимающимися разработкой и испытанием оборудования, элементы которого работают в условиях интенсивных термомеханических воздействий, приводящих к возникновению зон неупругого циклического деформирования.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на II Всесоюзном съезде по теории машин и механизмов (г.Одесса, 1982), УШ Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (г.Пермь, 1983), IV Всесоюзном симпозиуме "Малоцикловая усталость - механика разрушения, живучесть и материалоемкость конструкций" (г.Краснодар, 1983), Всесоюзной конференции "Численная реализация физико-механических задач прочности" (г.Горький, 1983), научно-технической конференции "Прочность элементов роторов и турбомашин" (г.Житомир, 1981), IX Всесоюзной научно-технической конференции по конструкционной прочности двигателей (г.Куйбышев, 1983), Всесоюзном научном совещании по проблемам прочности двигателей (г.Москва, 1984), XXXI - XXXVI научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1978-1983).

ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты выполненного исследования опубликованы в 12 работах.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, общих выводов, списка литературы и приложения. Она содержит 144 страницы текста, 64 рисунка и 13 таблиц. Список литературы включает 151 наименование. Приложение к работе выполнено на 50 страницах.

Во введении дается краткий анализ актуальности совершенствования методов расчетной оценки малоциклового прочностных элементов теплонапряженных конструкций и излагаются основные результаты работы. Отмечается, что значительный вклад в изучение прочностных материалов и элементов конструкций в условиях малоциклового длительного изотермического и неизотермического нагружения внесли советские ученые С.В.Серенсен, Р.М.Шнейдерович, В.В.Новожиллов, И.А.Биргер, Г.С.Писаренко, Д.А.Гохфельд, В.Т.Трошенко, Н.А.Махутов, А.П.Гусенков, Ю.Ф.Баландин, Н.Д.Соболев, Л.Б.Гецов, Р.А.Дульнев, Ю.Г.Коротких, Р.З.Шрой и другие, а также зарубежные исследователи С.Мансон, Л.Коффин, С.Тайра, М.Ленджер, Д.Спино и другие.

В первом разделе рассмотрены закономерности длительной малоциклового усталости конструктивных материалов при повышенной температуре. Обсуждаемые эффекты проиллюстрированы экспериментальными данными советских и зарубежных исследователей, а также данными, полученными при участии автора диссертации. Критически анализируются известные методы оценки долговечности при малоцикловом нагружении. На этой основе сформулированы задачи исследования и намечены пути их решения.

Во втором разделе описана модель малоциклового повреждения, базирующаяся на уравнении состояния для скорости накопления усталостного повреждения, учитывающем возможность реализации двух механизмов повреждения, соответствующих пластическому и вязкому деформированию. В предложенном уравнении использованы параметры состояния, следующие из анализа структурной модели упруговязкопластической среды и отражающие "циклические" деформационные и прочностные свойства микронеоднородных сплавов. Решена задача идентификации модели повреждения с конкретным материалом, получены характеристики сопротивления малоциклового раз-

рушению пяти жаропрочных материалов и выполнена проверка адекватности модели.

В третьем разделе диссертации изложена методика определения долговечности элементов конструкций, работающих при неупругом циклическом пропорциональном неизотермическом нагружении с выдержками. С помощью предлагаемой методики исследованы закономерности малоциклового усталости в зависимости от условий работы для трех объектов: рабочей лопатки газовой турбины, подколосняковой балки - элемента конвейерной машины для обжига железорудных окатышей и цилиндрического образца для испытания материала на термическую усталость.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ экспериментальных данных, опубликованных в работах советских и зарубежных исследователей, а также полученных при участии автора в ходе настоящего исследования, свидетельствует о том, что в условиях малоциклового нагружения с выдержками при повышенных температурах долговечность конструкционных материалов зависит от целого ряда факторов: формы цикла деформирования (включая последовательность этапов пластического и вязкого деформирования, а также характер деформирования при выдержке (ползучесть при постоянном напряжении, релаксация при постоянной деформации, либо промежуточный процесс)), частоты нагружения и скорости деформирования в полуциклах, закона изменения температуры и др. В то же время известными критериями малоциклового усталости особенности конкретного цикла деформирования, связанные с его формой, отражаются неполно. Обычно с этой целью используются эмпирические соотношения, полученные путем обработки экспериментальных данных, соответствующих частным программам нагружения.

Предлагаемый метод оценки малоциклового прочностного ресурса основывается на используемом в настоящее время представлении о малоцикловом разрушении как о процессе накопления повреждений. Процесс повреждаемости характеризуется изменением скалярного параметра повреждения ω_D , составляющие которого ω и ω_s согласно деформационному подходу, развиваемому в Институте машиноведения АН СССР, связаны с циклической (знакопеременной) и статической (односторонней) неупругой деформацией, соответственно. Данная работа посвящена моделированию процесса накопления циклического

(усталостного) повреждения ω . Что же касается квазистатического повреждения ω_s , то в рамках предлагаемой модели принимается, что оно может быть учтено в соответствии с одним из получивших признание подходов (деформационно-кинетический критерий, критерий, предложенный Л.Б.Гецовым).

При описании усталостного повреждения предполагается, что существует определенная аналогия между реологической структурной моделью упруговязкопластической среды и моделью накопления усталостного повреждения. Анализ структурной модели применительно к условиям пропорционального циклического неизотермического нагружения с выдержками, выполненный в работах Д.А.Гохфельда, О.С.Садакова и др., позволил выявить два макроскопических параметра состояния, отражающих вместе с температурой (влияние которой предполагается параметрическим) "циклические" реологические свойства конструкционных материалов, находящихся в циклически стабильном состоянии, при разнообразных программах нагружения. В соответствии с представлением о микронеоднородности реальных конструкционных сплавов один из параметров, C (или связанная с ним величина ρ_*), может быть интерпретирован как неупруго деформируемая в текущий момент времени часть элемента объема материала (относительное число активизированных плоскостей скольжения). Параметр $\rho_* = |\rho - \rho_R|$ представляет интенсивность неупругой деформации, отсчитываемой от момента последнего реверса смены знака скорости деформации или сечущего модуля; ρ - интенсивность неупругой деформации; ρ_R - значение этой величины в момент последнего реверса. Второй параметр, θ , характеризует относительную нагруженность названной части элемента объема. Текущие значения параметров ρ_* и θ определяются положением точки состояния на плоскости $\rho_* \sim e_*$ ($\rho_* = \rho - \rho_R$; $e_* = e - e_R$; e , ρ - интенсивности полной и упругой деформации; e_R , ρ_R - значения соответствующих параметров в момент последнего реверса) относительно диаграммы деформирования материала при принятых базовых скорости деформации \dot{e}_0 и температуре T_0 .

Механический смысл параметров состояния ρ_* , θ и опыт их использования при отражении деформационных свойств дает основания применить данные параметры и для описания процесса усталостного повреждения в условиях неупругого циклического неизотермического нагружения с выдержками. С этой целью предложено уравнение состояния для скорости накопления усталостного по-

вреждения ω , учитывающее два различных механизма повреждаемости при быстром (пластическом) и длительном (вязком) деформировании. Первому типу неупругого деформирования отвечает составляющая повреждения ω_p , скорость которой $\dot{\omega}_p$ по предположению неотрицательна. Скорость $\dot{\omega}_c$ повреждения ω_c на этапе вязкого деформирования может быть как положительной, так и отрицательной (при залечивании повреждения), однако в любом случае составляющая $\omega_c \geq 0$.

Для циклического растяжения-сжатия уравнения, определяющие скорости $\dot{\omega}_p$ и $\dot{\omega}_c$, имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_p &= H(\omega_p) H(|\theta| - \theta_c) D(\theta, T) \rho_*^{a(T)} \dot{\rho}_* ; \\ \dot{\omega}_c &= H(\omega_c) H(\theta_c - |\theta|) D(\theta, T) \rho_*^{a(T)} \dot{\rho}_* , \end{aligned} \quad (I)$$

где $D(\theta, T)$, $a(T)$ - функции состояния; ρ_* - неупругая деформация, отсчитываемая от момента последнего реверса; θ_c - значение параметра θ , разграничивающее области реализации механизмов вязкого ($|\theta| < \theta_c$) и пластического ($|\theta| > \theta_c$) повреждения; $H(x)$ - функция Хевисайда ($H(x) = 1$ при $x \geq 0$, $H(x) = 0$ при $x < 0$).

Поскольку при описании усталостного повреждения ограничились случаем регулярного нагружения (постоянство цикла деформирования) накопленное повреждение ω может не присутствовать среди параметров уравнений состояния (I). В число определяющих уравнений модели включено также условие разрушения элемента объема материала, базирующееся на гипотезе линейного суммирования повреждений

$$\omega_p + \omega_c + \omega_s - 1 = 0. \quad (2)$$

Уравнения (I) содержат две определяющие функции; одна из них - $a(T)$ - однозначно связана с наклоном кривых малоциклового усталости в системе координат $\lg \Delta p \sim \lg N$ (Δp - размах неупругой деформации в цикле; N - число циклов до разрушения) и по предположению не зависит от величины θ . Функция повреждаемости $D(\theta, T)$ характеризует интенсивность накопления повреждения в текущий момент времени.

В соответствии с допущением о параметрическом влиянии температуры на скорость накопления повреждения обе определяющие функции могут быть найдены в сериях изотермических малоцикловых

испытаний при ряде представительных значений температуры. Функцию повреждаемости удобно определять по данным опытов, проведенных при симметричном жестком нагружении с различными в полциклах растяжения и сжатия скоростями деформирования. Например, в первой полусерии варьируется скорость в полцикле растяжения $\dot{\epsilon}^+$ (скорость $\dot{\epsilon}^-$ при этом фиксирована), во второй полусерии - наоборот. В этом случае каждому значению $\dot{\epsilon}$ из рассматриваемого диапазона скоростей деформирования $\dot{\epsilon}_s \leq |\dot{\epsilon}| \leq \dot{\epsilon}_p$ - от медленного до быстрого - соответствует определенное значение θ , ($\theta_s \leq \theta \leq \theta_p$; $\text{sign } \theta = \text{sign } \dot{\epsilon}$). Путем интегрирования соотношений (I) в предположении постоянства накопленного в каждом цикле повреждения может быть получена система уравнений

$$\begin{aligned} [D(\theta_i) + D(\theta_p)] \frac{\Delta \rho_i^{\alpha+1}}{\alpha+1} &= \frac{1}{N_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \\ [D(\theta_s) + D(\theta_j)] \frac{\Delta \rho_j^{\alpha+1}}{\alpha+1} &= \frac{1}{N_j}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n; \\ [D(\theta_p + H(\theta_s)D(\theta_s))] \frac{\Delta \rho^{\alpha+1}}{\alpha+1} &= \frac{1}{N}, \end{aligned} \quad (3)$$

решение которой позволяет получить функцию $D(\theta)$ при заданной температуре (n и m - числа испытаний в каждой полусерии, условие разрыва - $\omega = 1$). Величина α связана с тангенсом наклона α кривых малоциклового усталости в логарифмической системе координат соотношением $\alpha = 1/\alpha - 1$.

Согласно изложенной методике была определена функция повреждаемости жаропрочной стали 12Х18Н9 (рис.1); при этом использовались экспериментальные данные, опубликованные А.П.Гусенковым; они были дополнены результатами испытаний, проведенных с участием автора диссертационной работы (темные точки на рис.1). Последние отвечают испытаниям в режиме жесткого нагружения в диапазоне скоростей деформирования $2 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Предполагаемый вид функции $D(\theta)$ в области $-1 < \theta < 0$ показан на том же рисунке штриховой линией.

Для оперативных оценок при проектировочных расчетах представляет интерес вариант модели с функцией повреждаемости более простого вида:

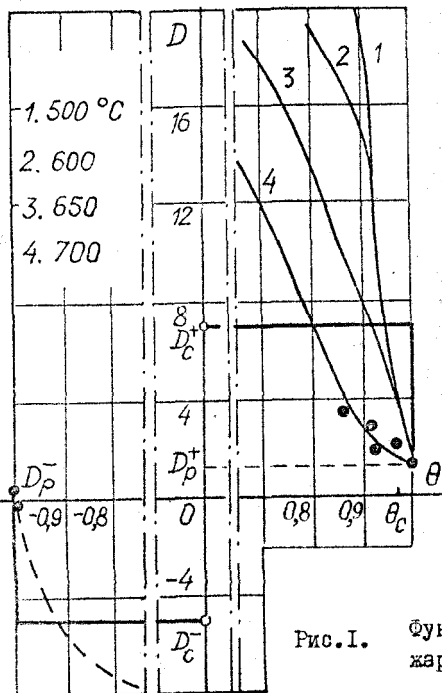


Рис. 1. Функция повреждаемости жаропрочной стали I2X18N9

$$D(\theta, T) = \begin{cases} D_p^+(T) & \text{при } \theta > \theta_c(T), \\ D_c^+(T) & \text{при } 0 < \theta < \theta_c(T), \\ D_c^-(T) & \text{при } -\theta_c(T) < \theta < 0, \\ D_p^-(T) & \text{при } \theta < -\theta_c(T). \end{cases} \quad (4)$$

Из определения (4) следует, что величины D_p^+ и D_c^+ отвечают этапам пластического и вязкого деформирования в полцикле растяжения, а D_p^- и D_c^- - соответствующим этапам в полцикле сжатия. По сути выражение (4) представляет аппроксимацию функции повреждаемости кусочно-постоянной зависимостью; ее график для стали I2X18N9 при температуре 700°C изображен на рис. 1 прямыми линиями. В этом случае объем экспериментального материала, необходимого для идентификации модели, существенно снижается. Характеристики D (D_p^+ , D_c^+ , D_p^- , D_c^-) при заданной температуре могут быть получены в испытаниях по четырем характерным программам нагруже-

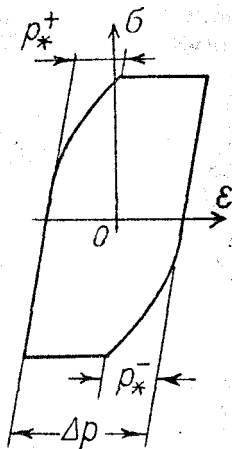


Рис. 2.

Схема цикла деформирования с выдержками

ния (рис.2): типа pc ($\rho_{*+}^+/\Delta\rho=1, \rho_{*-}^-/\Delta\rho=0$), типа pp ($\rho_{*+}^+/\Delta\rho=1, \rho_{*-}^-/\Delta\rho=1$), типа cp ($\rho_{*+}^+/\Delta\rho=0, \rho_{*-}^-/\Delta\rho=1$) и типа cc ($\rho_{*+}^+/\Delta\rho=0, \rho_{*-}^-/\Delta\rho=0$); здесь ρ_{*+}^+, ρ_{*-}^- - максимальные значения параметра ρ_{*} , достигнутые при быстром нагружении в полциклах растяжения и сжатия.

Практически удобнее проводить испытания по более общей программе, которой соответствует схема цикла деформирования, представленная на рис.2. Накопленное в таком цикле повреждение описывается выражением

$$\Delta\omega = \frac{1}{N} = \frac{\Delta\rho^m}{m} [D_p^+ \varepsilon_+^m + D_c^+(1-\varepsilon_+^m) + D_p^- \varepsilon_-^m + D_c^-(1-\varepsilon_-^m)], \quad (5)$$

полученным путем интегрирования уравнений (1) при условии (2) с учетом определения (4); здесь обозначено $m = a + 1$; $\varepsilon_+ = \rho_{*+}^+/\Delta\rho$; $\varepsilon_- = \rho_{*-}^-/\Delta\rho$. Для исключения затруднений при интерпретации результатов опыта, связанных с принятым в модели ограничением на залечивание повреждения, необходимо, чтобы выполнялось условие $\rho_{*+}^+ > \rho_{*-}^-$. Решение системы N уравнений вида (5) также позволяет найти величины D при любом числе испытаний $N > 4$ с учетом разброса экспериментальных данных. Соответствующая процедура была автоматизирована с помощью вычислительной программы, реализующей метод наименьших квадратичных отклонений. Необходимые экспериментальные данные для четырех марок сталей аустенитного класса и жаропрочного никелевого сплава были получены в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов ЧПИ при участии автора. Определенные таким способом характеристики сопротивления малоциклового усталости исследованных материалов помещены в таблице.

Материал	$T, ^\circ C$	a	D_c^+	D_c^-	D_p^+	D_p^-
12X18H9	700	0,43	7,5	-5,0	1,5	0,3
08X18H10T	650	0,67	16,2	-4,5	4,1	-
08X18H10T	750	0,67	18,2	-2,5	14,6	-
XI6H11M3	700	0,43	6,8	-2,6	2,4	-1,2
4X12N8Г7М2Б	700	1,00	2020	-1370	308	-
ХН51ВМТ0КФР	850	0,43	89	-65	22	-

Зависимости значений D от температуры для стали 12X18H9 приведены на рис.3. Следует отметить, что в изотермических условиях функцию повреждаемости достаточно определить с точностью до

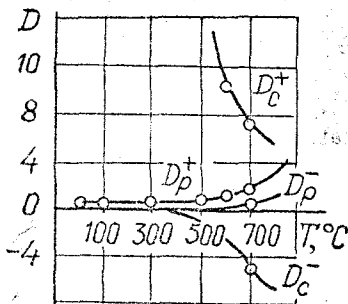


Рис. 3.

Зависимости характеристик усталостной прочности стали 12X18H9 от температуры

при повышенных температурах. В условиях быстрого изотермического нагружения из предложенной модели следует известная формула Мэнсона-Коффина $\Delta p^m N = m / (D_p^+ + D_p^-)$, а при переменной температуре – ее неизотермический аналог. В соответствии с уравнениями состояния (I), в которых функция $\alpha(T)$ не зависит от параметра θ , кривые малоциклового усталости, отвечающие постоянным значениям α_+ и α_- , в логарифмической системе координат представляют параллельные прямые. Опубликованные экспериментальные данные в целом подтверждают этот вывод; для исследованных в данной работе материалов существенного отклонения от параллельности усталостных кривых также не обнаружено.

Ниже будут рассмотрены некоторые закономерности малоциклового усталости, описание которых производилось применительно к стали 12X18H9 при температуре 650°C (соответствующая функция повреждаемости $D(\theta, 650^\circ)$ приведена на рис.1). Необходимые для определения значений $\theta(p_*)$ кривые циклического деформирования были получены путем расчета кинетики неупругого деформирования на основе реологической структурной модели. Как показали расчеты, изменение частоты нагружения в пределах $10 \dots 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ при размахе полной деформации $\Delta \epsilon = 0,5\% = \text{const}$ вызывает снижение долговечности примерно в 12 раз, причем наиболее резкое ее падение отмечено в интервале $10^{-2} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Этот результат качественно соответствует данным С.Мэнсона, полученным для нержавеющей стали типа 316 ($T = 815^\circ\text{C}$).

постоянной величины, которая не влияет на результаты интегрирования уравнений состояния (I) за цикл. Поэтому для отыскания трех оставшихся констант, например, D_p^+ , D_c^+ , D_c^- , достаточно трех испытаний (типа pp , cp , cc или более общего вида при $\alpha_+ \neq \alpha_- \neq 0$).

Анализ поведения модели повреждаемости при различных программах жесткого нагружения показал, что ею качественно верно и с достаточной для инженерных расчетов степенью точности отражается ряд важных с практической точки зрения эффектов малоциклового усталости при

Влияние скорости деформирования в полупериоде растяжения исследовали в условиях $\Delta\varepsilon = 3\% = const$, изменяя время полупериода t^+ от 1 до 60 минут. В основном уменьшение числа циклов до разрушения N (примерно втрое) происходит при длительностях $t^+ \leq 15$ мин, с дальнейшим ростом времени t^+ снижение долговечности оказывается не столь значительным. Сопоставление расчетной зависимости $N(t^+)$ с результатами испытаний, проведенных А.Г.Казанцевым, свидетельствуют о вполне удовлетворительном их соответствии. Влияние скорости деформирования в полупериоде сжатия, как показывают выполненные расчеты и экспериментальные данные автора, незначительно.

Важным моментом, отражаемым предлагаемой моделью повреждаемости, является влияние на долговечность формы цикла деформирования. Последняя определяется наличием выдержек в одном или обоих полупериодах нагружения, последовательностью этапов пластического и вязкого деформирования, а также статико-кинематическими условиями выдержки (чистая ползучесть при постоянном значении нагружения, чистая релаксация при постоянном значении деформации, промежуточный процесс). Как показали выполненные расчеты, при одинаковом пути вязкого деформирования выдержка в режиме чистой релаксации более опасна, чем выдержка в режиме чистой ползучести (величины накопленных на этом этапе повреждений отличались в 3,5 раза), что косвенно подтверждается опытными данными А.Г.Казанцева и автора. Что касается влияния порядка чередования этапов пластического и вязкого деформирования, то экспериментально и расчетным путем было установлено, что относительная опасность нагружений с одинаковыми по величине вязкой деформации выдержками в начале и конце этапа неупругого растяжения зависит не столько от их последовательности, сколько от относительной нагруженности (характеризуемой параметром θ) неупруго деформируемого в процессе выдержки объема. Результаты расчетов сопоставляли с экспериментальными значениями долговечности, полученными А.Г.Казанцевым (опыты с периодами чистой релаксации) и автором (испытания с этапами чистой ползучести).

Изменение накопленного за цикл относительного повреждения $\Delta\omega/\Delta\omega_{cp}$ в зависимости от соотношения пластической и вязкой деформации в полупериодах растяжения и сжатия отражается приведенной на рис.4 поверхностью ($\Delta\omega_{cp}$ - повреждение, отвечающее циклу типа cp). Для ее построения был использован упрощенный вариант функции повреждаемости (4) применительно к стали 12Х18Н9 при

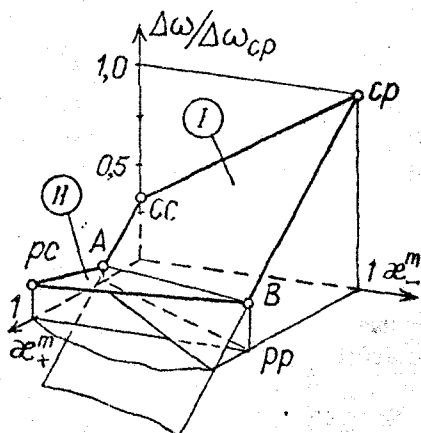


Рис. 4.

Влияние формы цикла деформирования на величину накопленного за цикл повреждения (12Х18Н9, $T = 700^{\circ}\text{C}$)

$T = 700^{\circ}\text{C}$ (рис. 1, 2). Область II, включая линию AB, соответствует нагружениям, в которых все накопленное в полцикле растяжения повреждение α залечивается во время выдержки в полцикле сжатия; последующая ползучесть при сжатии не изменяет накопленного повреждения (продолжение поверхности I ниже линии AB означало бы отсутствие ограничения на залечивание, что физически не обосновано). В области I ограничение на залечивание не проявляется, поэтому уравнения состояния (I) для этой области могут быть записаны в более простом виде:

$$\dot{\omega} = D(\theta, T) \rho_*^{\alpha(T)} \dot{\rho}_* \quad (6)$$

На рис. 5 представлены результаты сопоставления экспериментальных N_p и расчетных N_p значений долговечности для проведенных изотермических испытаний исследованных материалов при различных значениях параметров цикла деформирования ϵ_+ и ϵ_- . При определении долговечности N_p использовали значения констант D из таблицы, приведенной выше.

Уравнение состояния (I), предложенное для неизотермического регулярного малоциклового нагружения с выдержками при растяжении-сжатии, может быть обобщено на произвольное напряженное состояние при условии, что компоненты тензора циклической составляющей деформации $e_{ij}^t = e_{ij}(t) - e_{ij}^0$ изменяются пропорционально общему параметру $(e_{ij}^t(t) = e_{ij}^t(t - t_u))$; e_{ij}^0 - постоянная во времени составляющая деформации $e_{ij}(t)$; t_u - время цикла). Для этого в дополнение к ранее принятым допущениям предполагается, что в каждом направлении, соответствующем площадке произвольного положения в окрестности рассматриваемой точки, накапливается усталостное повреждение независимо от повреждений в других направлениях. В рассматриваемых условиях положение осей, отвечающих главным значениям тензора переменной (циклической) составляющей деформации, не изменяется в процессе нагружения, поэтому экстремальные зна-

МАТЕРИАЛ	тип цикла			
	pp	cp	pc	cc
12X18H9 (P-сж)	◆	▼	▲	■
0X18H10T (KР)	◇	▽	—	□
X16H11M3 (P-сж)	◇	▽	△	▣
4X12H8T8MФБ (KР)	◇	▽	—	◻
XH51BMТЮКФР (P-сж.)	◆	▼	▲	■
XH51BMТЮКФР (KР.)	◆	▼	—	■

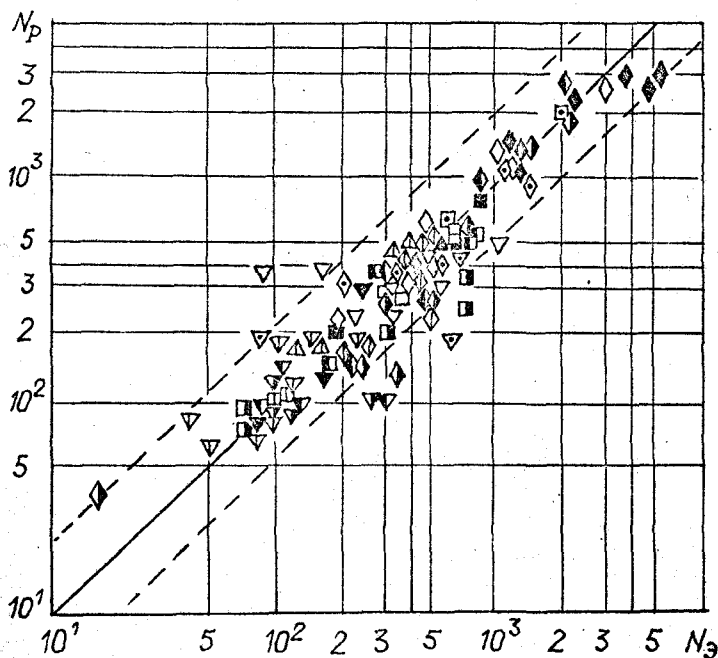


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных N_2 и расчетных N_p значений долговечности (по результатам изотермических испытаний на растяжение-сжатие и циклическое кручение)

чения циклической составляющей неупругой деформации достигаются в направлении этих (главных) осей. Соответствующие им главные значения накопленного повреждения ω_i ($i = 1, 2, 3$) характеризуют поврежденное состояние элемента объема в текущий момент времени. Скорости составляющих $\dot{\omega}_{pi}$ и $\dot{\omega}_{ci}$ определяются зависимостями, аналогичными уравнениям (I); под величиной β_* в данном случае понимается абсолютное значение изменения неупругой деформации в i -ом главном направлении с момента последнего реверса, вод параметром θ - величина $|\theta/\text{sign } \dot{\epsilon}_i$. Разрушение элемента объема происходит в момент достижения одной из компонент повреждения $\omega_i = \omega_{pi} + \omega_{ci}$ критического значения $\omega_{кр}$; как и прежде, принимается $\omega_{кр} = 1$.

Экспериментальную проверку обобщенного на сложное напряженное состояние варианта модели проводили на тонкостенных трубчатых образцах из сталей 08X18H10T, 4X12H8Г8МФБ и сплава ХН51БМТЮКФР в условиях изотермического и неизотермического циклического кручения при различных формах цикла. Некоторые ее результаты представлены на рис.5. Сопоставление двух групп данных, соответствующих изотермическим ($T = 850^\circ\text{C}$) испытаниям сплава ХН51БМТЮКФР при растяжении-сжатии и циклическом кручении, показывает, что различие величин N_s и N_p для обеих групп примерно одинаково и находится в пределах естественного разброса. Образцы из стали 08X18H10T были испытаны в условиях неизотермического циклического кручения без выдержек и с выдержками в одном и обоих полуциклах. При принятом перепаде температуры в цикле ($650 \dots 750^\circ\text{C}$) наблюдается существенное изменение прочностных свойств материала в процессе неизотермического нагружения. Как и в изотермических условиях, опытные и расчетные значения долговечности отличались не более, чем вдвое.

Таким образом, принятые допущения определяют область применения предлагаемой модели повреждаемости: неупругое циклическое неизотермическое деформирование циклически стабильного (стабилизирующегося) материала при регулярном нагружении с выдержками в условиях пропорционального изменения циклической составляющей деформации в цикле.

На базе модели повреждаемости разработана инженерная методика оценки малоциклового прочностных элементов теплонапряженных конструкций. В общем случае методика состоит в расчете кинетики накопления повреждения по результатам расчета кинетики неупругого деформирования в представительных точках конструкции. При ис-

пользовании варианта модели с кусочно-постоянной функцией повреждаемости для оценки долговечности конструкции достаточно располагать параметрами ее стационарного (достигаемого асимптотически) циклического состояния. Расчет кинетики накопления повреждения и определение числа циклов до разрушения с учетом квазистатической составляющей автоматизированы с помощью специальной вычислительной программы.

Предложенная методика была применена для исследования закономерностей малоциклового разрушения в зависимости от условий работы трех различных по своему типу и назначению объектов. Рассмотрено влияние режима запуска газотурбинного двигателя на повреждение рабочей лопатки турбины. Установлено, что резкое повышение температуры лопатки при запуске, опережающее разгон ротора, может вызвать быстрое пластическое деформирование материала выходной кромки. Его сочетание с ползучестью при стационарном режиме приведет к ускоренному накоплению повреждения по сравнению с условиями знакопеременной ползучести. Неучет данного обстоятельства рядом критериев малоциклового усталости (формулой Мансона-Кохфина, зависимостями типа уравнения "универсальных наклонов" с учетом частоты нагружения и др.), как показано на примере, приводит не только к занижению накопленного усталостного повреждения, но и к неверному суждению об относительной опасности того или иного режима.

Исследование влияния режима движения технологической линии обжига железорудных окатышей на малоцикловую прочность подковообразной балки обжиговой тележки показало, что снижение скорости конвейера примерно вдвое и его остановки значительно сокращают ресурс балки.

На основе расчетов кинетики неупругого деформирования и накопления усталостного повреждения в сплошном цилиндрическом образце при повторных тепловых ударах получены зависимости интенсивности размаха неупругой деформации и числа циклов до разрушения от максимальной температуры цикла и диаметра образца. Эти соотношения могут использоваться при оценке сопротивления термической усталости стали IX18H9 в диапазоне максимальных температур цикла 500...800°C.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа закономерностей малоциклового усталости конструкционных материалов при повышенных температурах и существующих методов их математического описания выявлены преимущества кинетического (рассматривающего скорость накопления повреждения в текущий момент времени) подхода при отражении влияния на долговечность формы цикла деформирования и закона изменения температуры в течение цикла.

2. Предложено уравнение состояния (повреждаемости) циклически стабильной (стабилизированной) упруговязкопластической среды, определяющее скорость накопления усталостного повреждения материала в условиях неизотермического малоциклового нагружения с выдержками при пропорциональном изменении компонент тензора переменной (циклической) составляющей деформации. В соответствии с этим уравнением скорость изменения составляющих усталостного повреждения, отвечающих этапам пластического (быстрого) или вязкого (длительного) деформирования, является функцией специальных параметров состояния материала и температуры в текущий момент времени.

3. В качестве параметров уравнения повреждаемости предложено использовать параметры разработанного на кафедре "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" ЧПИ реологического уравнения, отражающего "циклические" (определяющие форму петли неупругого гистерезиса) свойства упруговязкопластической среды при малоцикловоом неизотермическом нагружении с выдержками. Исходя из представления о микронеоднородности реальных конструкционных сплавов один из этих параметров можно интерпретировать как неупруго работающую в данный момент часть элемента объема материала, второй характеризует относительную нагруженность этой части. Таким образом, достигнуто определенное единство в описании деформационных и прочностных свойств конструкционных материалов в рассматриваемых условиях нагружения.

4. Установлен базовый эксперимент и метод получения определяющих функций материала, входящих в уравнение повреждаемости. С целью снижения объема базового эксперимента предложен упрощенный вариант модели, в соответствии с которым одна из определяющих функций - функция повреждаемости - аппроксимируется кусочно-постоянной зависимостью.

5. По результатам проведенных испытаний с использованием данных, опубликованных в работах различных авторов, найдены (с различной степенью полноты) определяющие функции степеней аустенитного класса $12X18H9$, $08X18H10T$, $X16H11M3$, $4X12H3G8M6B$ и жаропрочного сплава на никелевой основе $XH51BMTЮФР$. Установлено, что функции повреждаемости всех исследованных материалов имеют качественно сходный характер: при положительной скорости деформации на этапе ползучести значения функции повреждаемости выше, чем при быстром нагружении; вязкому (длительному) деформированию с отрицательной скоростью соответствуют отрицательные значения этой функции.

6. Построенная модель накопления повреждения отражает влияние на сопротивление малоциклового разрушению таких факторов как форма цикла деформирования, в частности, наличие выдержек в одном и обоих полуциклах, последовательность этапов быстрого и медленного нагружения, характер деформирования при выдержке (ползучесть, релаксация, промежуточный процесс), частота нагружения, скорости деформирования в полуциклах растяжения и сжатия, закон изменения температуры в цикле и др. Подтверждено, что в общем случае длительность (время) цикла не является параметром, определяющим процесс повреждаемости.

7. Экспериментальные проверки предложенной модели при изотермическом нагружении с различными скоростями деформирования и выдержками в одном и обоих полуциклах в условиях растяжения-сжатия и циклического кручения, а также результаты неизотермических испытаний с выдержками и без них при циклическом кручении свидетельствуют об ее удовлетворительном соответствии. Таким образом, в определенной степени подтверждена представительность выбранных параметров состояния, а также возможность использования в инженерных расчетах подхода, основанного на допущении о параметрическом влиянии температуры на прочностные свойства материалов.

8. На основе модели повреждаемости разработана инженерная методика расчета кинетики накопления повреждения и оценки долговечности элементов теплонапряженных конструкций. Расчет повреждаемости базируется на результатах полциклового расчета кинетики неупругого деформирования или прямого расчета параметров циклически стабильного состояния (достигаемого асимптотически). Методика дополнена необходимым программным обеспечением.

9. С помощью предложенной методики исследованы закономерности малоциклового усталости в зависимости от условий работы для

трех объектов: рабочей лопатки газовой турбины, подколосниковой балки элемента конвейерной машины для обжига железорудных окатышей, цилиндрического образца для испытаний материала на термическую усталость.

10. Основные результаты диссертационной работы внедрены на заинтересованных предприятиях гг. Горького, Ленинграда, Челябинска, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Короткий В.В., Маркин А.И., Порошин В.Б. Некоторые аспекты экспериментальной доводки кольцевого теплообменника. - В кн.: Материалы III отраслевой конференции молодых специалистов. М., 1977, с.38-63.

2. Несмеянов А.С., Порошин В.Б. Исследование кинетики неупругого деформирования цилиндрических тел при термоударе. - В кн.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузках. Сборник научных трудов ЧПИ № 236. Челябинск: ЧПИ, 1979, с.58-63.

3. К оценке долговечности при неизотермическом циклическом нагружении /Д.А.Гохфельд, В.П.Колпаков, К.М.Кононов, В.Б.Порошин, О.С.Садаков. - Проблемы прочности, 1981, №7, с.18-22.

4. Кононов К.М., Порошин В.Б., Садаков О.С. К описанию усталостного повреждения при неупругом нагружении с выдержками. - Проблемы прочности, 1982, №7, с.23-26.

5. Порошин В.Б., Садаков О.С. Матричный метод расчета кинетики неупругого деформирования диска газовой турбины. - Проблемы прочности, 1982, №8, с.18-22.

6. К оценке долговечности элементов конструкций в условиях малоциклового нагружения с выдержками /Д.А.Гохфельд, К.М.Кононов, В.Б.Порошин, О.С.Садаков. - В кн.: Второй всесоюзный съезд по теории машин и механизмов (Одесса, 1982). Тезисы докладов. Киев: Наукова думка, 1982, Часть I, с.119.

7. Гохберг В.Э., Порошин В.Б. К оценке усталостной долговечности лопаток газовых турбин на основе расчета кинетики неупругого деформирования. - В кн.: Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузках. Челябинск, ЧПИ, 1983, с.81-85.

8. Кульчихин Е.Т., Несмеянов А.С., Порошин В.Б. Развитие кинетического подхода к оценке малоциклового усталости теплонапряженных конструкций с учетом ползучести. - В кн.: Всесоюзная

конференция "Численная реализация физико-механических задач прочности". Тезисы докладов. Горький, 1983, с.90-91.

9. К оценке долговечности при неизотермическом малоцикловом нагружении с выдержками /Д.А.Гохфельд, К.М.Кононов, В.Б.Порошин, О.С.Садаков. - Машиноведение, 1983, №4, с.72-77.

10. К оценке долговечности деталей ГТД с учетом их реальной нагруженности /Д.А.Гохфельд, К.М.Кононов, В.Б.Порошин, О.С.Садаков. - В кн.: Конструкционная прочность двигателей. Тезисы IX Всесоюзной научно-технической конференции. Куйбышев: КуАИ, 1983, с.51-52.

11. Моделирование процессов малоцикловой усталости при циклических нагрузках и теплосменах /Д.А.Гохфельд, К.М.Кононов, В.Б.Порошин, О.С.Садаков. - В кн.: IV Всесоюзный симпозиум "Малоцикловая усталость - механика разрушения, живучесть и материалоёмкость конструкций" (Краснодар, 1983). Тезисы докладов и сообщений. М., 1983, вып.1, с.59-63.

12. Несмеянов А.С., Порошин В.Б. К расчету кинетики неупругого деформирования и повреждаемости элементов конструкций с учетом микронеоднородности среды. - В кн.: VIII Всесоюзная конференция по прочности и пластичности. Тезисы докладов. Пермь, 1983, с.137.



Подготовлено в печать 17.05.84 г. ФБ 31360. Формат 60x90 1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 228/520.

УМН ЧМ. 454044, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.