

539.37(043)

К 906

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Кульчихин Евгений Тимофеевич

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕУПРУТОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ
ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ С ВЫДЕРЖКАМИ

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 - 1981

Читальный зал
«Профессорский»

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте
имени Ленинского комсомола.

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


Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Махутов Н.А.,
доктор технических наук,
профессор Шрон Р.З.

Ведущая организация - Институт механики Горьковского
государственного университета.

Защита состоится 20 мая 1981 года на заседании
специализированного совета Д053.13.01 в Челябинском
политехническом институте
(454044, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76).

Автореферат разослан " _____ апреля _____ 1981 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
канд. техн. наук, доцент

 /А.А. Кошев/



АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Предусмотренное XXVI съездом КПСС снижение материалоемкости продукции, повышение производительности машин и аппаратов требует интенсификации рабочих процессов в машинах (рост удельных мощностей, давлений, температур). В связи с этим в отдельных объемах (в частности, в зонах концентрации напряжений) наиболее нагруженных элементов машин и аппаратов могут возникать неупругие деформации. Поэтому обеспечение работоспособности конструкций при заданной долговечности с учетом неупругих свойств материалов является одной из актуальных задач. Расчетная оценка долговечности деталей машин с учетом развития неупругих деформаций требует изучения и моделирования соответствующих деформационных свойств конструкционных материалов. В связи с повышением рабочих температур и периодичностью нагружения машин существенное значение приобретает исследование эффектов неупругого деформирования, связанных с взаимным влиянием пластических деформаций и ползучести. Описание пластичности и ползучести конструкционных материалов с учетом указанных эффектов представляет одну из наиболее важных и до настоящего времени нерешенных проблем.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Разработка метода расчета неупругой деформации в зонах концентрации напряжений деталей машин с целью определения их долговечности в условиях повторно-переменного неизотермического нагружения с выдержками. Решение этой задачи связано с необходимостью получения уравнения состояния сплошной среды, позволяющего осуществить математическое описание деформационных свойств конструкционных материалов в соответствующих условиях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ. Уравнение состояния для расчета неупругого деформирования элементов разрабатывалось на основе расчетно-теоретического анализа известных моделей сплошной среды с учетом реальных свойств конструкционных материалов. Опытное исследование конструкционных материалов выполнено на специальной установке с применением современной автоматической контролирующей и регистрирующей аппаратуры. В теоретическом анализе использована ЭМ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Получено уравнение состояния среды для стабильных (стабилизирующихся) материалов, позволяющее получить

математическое описание как процессов быстрого нагружения (диаграммы деформирования с заданной скоростью нагружения), так и длительного (кривые ползучести, релаксации), а также взаимное влияние этих процессов.

Установлено, что реологическая функция (зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения), входящая в уравнение состояния, является одной из фундаментальных функций, определяющих деформационные свойства материалов не только на стадии установившейся ползучести, но и в переходных режимах кратковременного и длительного неупругого деформирования. Полученные на основе экспериментальных данных реологические функции конструкционных материалов свидетельствуют о реономности неупругой деформации во всем диапазоне изменения напряжения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Разработан приближенный метод определения неупругой деформации в зоне концентрации напряжений в условиях повторно-переменного неизотермического нагружения с выдержками. Этот метод позволяет вычислять приращение односторонней и величину знакопеременной деформаций в условиях повторно-переменного неизотермического нагружения с выдержками, что является необходимым для расчетной оценки долговечности элементов конструкций.

Разработан метод определения реологической функции, использующий минимум экспериментальных данных. Этот метод позволяет по одной кривой неустановившейся ползучести и диаграмме деформирования построить указанную функцию в целом интервале напряжений. Данная функция может быть также определена из различных типов испытаний: ползучесть, релаксация, промежуточный случай. Создана вычислительная программа для автоматического определения реологической функции по данным испытаний.

Найдены определяющие функции для различных марок сталей (Х18Н9, ЭИ826, ЭИ868, ЭИ765), позволяющие производить расчетную оценку напряжений и деформаций в деталях из соответствующих материалов.

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. Результаты проведенного исследования внедрены на двух заинтересованных предприятиях (г. Ленинграда и г. Горького), что подтверждено соответствующими актами.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты работы докладывались на XIII, XIV, XV научных совещаниях по тепловым напряжениям в элементах конструкций (г.Канев, 1974, 1977, 1980), на УП Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (г.Горький, 1978), на научно-технических конференциях ЧПИ (1974-1980), на конференциях молодых ученых и специалистов ЧПИ (1978, 1979).

ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты выполненных исследований опубликованы в 10 работах.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Выводов. Изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 122 рисунка, 11 таблиц, Приложение и список использованной литературы из 128 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** кратко излагается существо и значение проблемы описания деформационных свойств конструкционных материалов в условиях циклического неизо термического деформирования и возникающие при ее решении трудности. Определены цели, поставленные в диссертации, и дана краткая аннотация ее разделов.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** диссертации "Обзор существующих методов математического описания диаграмм деформирования и кривых ползучести конструкционных материалов при циклическом неизо термическом нагружении" приведен краткий анализ опубликованных экспериментальных данных по исследованию деформационных свойств сталей и сплавов и известных методов их математического описания.

На основе экспериментальных исследований конструкционных материалов, проведенных С.В.Горским, А.П.Гусенковым, В.С.Зарубиным, К.М.Кононовым, М.А.Кузьминым, М.Е.Мартыненко, Н.А.Махутовым, Ю.В.Милосердиным, В.В.Москвитиним, Ю.Н.Ребяковым, В.Д.Семеновым, С.В.Серенсенем, Е.В.Стеиновым, Р.Г.Тереховым, А.Д.Трухнием, В.Н.Чечко, Ю.Н.Шевченко, Р.М.Шнейдеровичем, *H.R. Jhansale*'ом, *E. Krempl*'ом и др. обнаружен целый ряд эффектов деформационной анизотропии, проявляющихся при повторно-переменном неизо термическом нагружении с выдержками (эффект Баушингера, ускорение ползучести при ступенчатом изменении напряжения). Однако пока недостаточно изучены эффекты неупругого деформирования при чередовании переход-

ных и стационарных режимов нагружения, в частности, появление этапов неустановившейся ползучести каждый раз после изменения напряжения и температуры, влияние этапов выдержки на последующие диаграммы деформирования.

Необходимость описания свойств при повторно-переменном неизо-термическом нагружении вызвало в последнее время появление теорий, использующих представление о дополнительных напряжениях, и теорий, основанных на моделях среды, имитирующих ее микронеоднородность - физических и структурных.

Теории пластичности и ползучести с дополнительными напряжениями (Р.А.Арутюнян, А.А.Вакуленко, А.М.Ишлинский, Ю.И.Кадашевич, Ю.Г.Коротких, В.В.Новожилов, Н.Н.Малинин, В.Прагер, А.Г.Угодчиков, Г.М.Хажинский, В.Ф.Шорр, *M.A. Eisenberg*, *A. Phillips*, *E.P. Popov* и др.) в принципе позволяют описать деформационную анизотропию, однако при этом возникает проблема определения изменения дополнительного напряжения в процессе неупругого деформирования. Попытки решения этой проблемы часто приводят к весьма сложным уравнениям состояния, что затрудняет качественный анализ соответствующих теорий, их идентификацию и использование в расчетах.

В физических моделях (исследования С.В.Батдорфа, Б.Будянско-го, Д.А.Гаврилова, В.С.Зарубина, А.Г.Костюка, А.А.Полякова, Н.И.Черняка и др.) для описания деформационных свойств используется представление о микромеханизме неупругого деформирования в поликристаллическом материале. Эти теории существенно сложнее феноменологических и могут быть использованы скорее для получения некоторых качественных представлений, чем в инженерных расчетах.

Промежуточное положение между чисто феноменологическими и физическими теориями занимают структурные модели; они отражают микронеоднородность материала формально: предполагается, что элемент среды работает как набор подэлементов, реологические свойства последних задаются феноменологически. Такой подход получил развитие в работах Н.Н.Афанасьева, Д.А.Гохфельда, В.С.Зарубина, И.А.Иванова, Ю.И.Кадашевича, М.А.Кузьмина, В.Ю.Марины, М.Е.Мартыненко, В.В.Новожилова, О.С.Садакова, Ю.Н.Шевченко, *J.F. Besseling's* и *H.R. Zhan-sale'a* и др. Преимущество данного подхода заключается в его доступности для применения в инженерных расчетах и простоте идентификации моделей конкретных материалов. Исследования показали,

что модели данного типа достаточно адекватно отражают экспериментальные данные, получаемые при разнообразных программах деформирования.

Простейший вариант структурной модели циклически стабильного материала (идеально вязкие подэлементы, допущение о подобии их реологических функций) разрабатывается на кафедре сопротивления материалов Челябинского политехнического института. Его адекватность проверялась при повторно-переменном неизотермическом нагружении и при ползучести в условиях ступенчато меняющихся напряжениях. Однако для использования этой модели в расчетах кинетики неупругого деформирования конструкций необходима более полная экспериментальная проверка на широком классе программ нагружения - в частности, при чередовании длительных и переходных режимов, когда выдержка сменяется быстрым деформированием, либо наоборот. Такая проверка включает в себя расчетный анализ на основе уравнений структурной модели и проведение экспериментальных исследований.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ диссертации "Аналитическая связь между напряжением и деформацией при повторно-переменном нагружении с выдержками" предлагается уравнение состояния сплошной среды, позволяющее дать математическое описание процессов неупругого деформирования стабильных (стабилизирующихся) материалов в условиях циклического пропорционального неизотермического нагружения.

На основе расчетного анализа поведения структурной модели упруговязкопластической среды с учетом реального характера реологической функции конструкционных материалов в рабочих диапазонах температур применительно к условиям пропорционального нагружения получено уравнение состояния в виде

$$\dot{\rho} = \Phi(\theta, T) F_1(C). \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения и определения:

$$\dot{e} = \dot{r} + \dot{\rho}, \quad r = S/(2G), \quad r^* = r - r_R, \quad e^* = e - e_R, \quad \theta^* = \theta - \theta_R, \quad (2)$$

$$F_1(C) = 1 - \frac{dF[F_2^0(C)]}{de}, \quad \theta^* = e^*/F_2^0(C),$$

$$C = r^*/e^* = \theta^* F(e^*/\theta^*)/e^* = F_2(e^*/\theta^*), \quad (3)$$

S, r, e, ρ - интенсивности напряжений, упругой, неупругой

и полной деформаций, соответственно; G - модуль упругости; $C=r^*/e^*$ - секущий модуль в координатах $\{e^*, r^*\}$; r^*, e^*, θ^*, C - текущие параметры состояния в координатах $\{e-r, r-r_R\}$; θ^* - в соответствии с выражением (3) есть предельная упругая деформация, характеризуемая коэффициентом центрального подобия кривой, проходящей через точку $\{e^*, r^*\}$, и диаграммы F в координатах $\{e^*, r^*\}$; таким образом, точка состояния может характеризоваться как значениями e^*, r^* , так и переменными θ^*, C , связанными с e^*, r^* выражением (3); $F_1(C)=1-dF(e^*/\theta^*)/de=1-K(C)$, где $K(C)$ - касательный модуль на диаграмме $r^*/\theta^*=F(e^*/\theta^*)$ в точке $\{e^*, r^*\}$, который зависит от секущего модуля; F_2^0 - функция, обратная функции F_2 , то есть $F_2^0[F_2(x)]=x$; $\Phi(\theta, T)$ - реологическая функция; F - диаграмма деформирования, являющаяся одной из определяющих функций материала.

Состояние материала в каждый момент характеризуется вектором $A=[r, e, \theta, C]$; в произвольный момент времени в "памяти" материала $\{P\}$ находится ряд векторов состояния

$$\{P\}=\{A_0, A_1, A_2, \dots, A_R\}, \quad (4)$$

выделенных в моменты реверсов скоростей деформации \dot{e} или секущего модуля C и расположенных в хронологическом порядке, вектор $A_R=[r_R, e_R, \theta_R, C_R]$ отвечает последнему реверсу, $A_0=[0, 0, 0, 0]$. Например, в произвольные моменты времени, отвечающие точкам K и L диаграммы деформирования (рис. 1), векторы состояния будут $A_K=[r_K; e_K; -0,6r_B; 0,4]$ и $A_L=[r_L; e_L; r_B; 0,6]$, r_B - предельная упругая деформация при некоторых значениях скорости деформации и температуры.

Содержимое "памяти" сохраняется неизменным при следующих условиях (их нарушение приводит к изменениям, которые схематично показаны ниже):

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) } \dot{e}e^* \geq 0 \\ \text{б) } \dot{e}r^* \geq r\dot{e}^* \end{array} \right\} \text{, иначе } \{P\}=\{P\} \ominus A, \\ \text{в) } C > C_R \text{, иначе } \left\{ \begin{array}{l} \text{г) , если } \theta/\theta_{R-1} \leq 1 \text{, то } \{P\}=\{P\} \ominus A_R, \\ \text{д) , если } \theta/\theta_{R-1} > 1 \text{, то } \{P\}=\{P\} \ominus A_R \ominus A_{R-1}. \end{array} \right. \quad (5)$$

В уравнениях (1), (2) основными неизвестными являются функции $G(T), \Phi, F$.

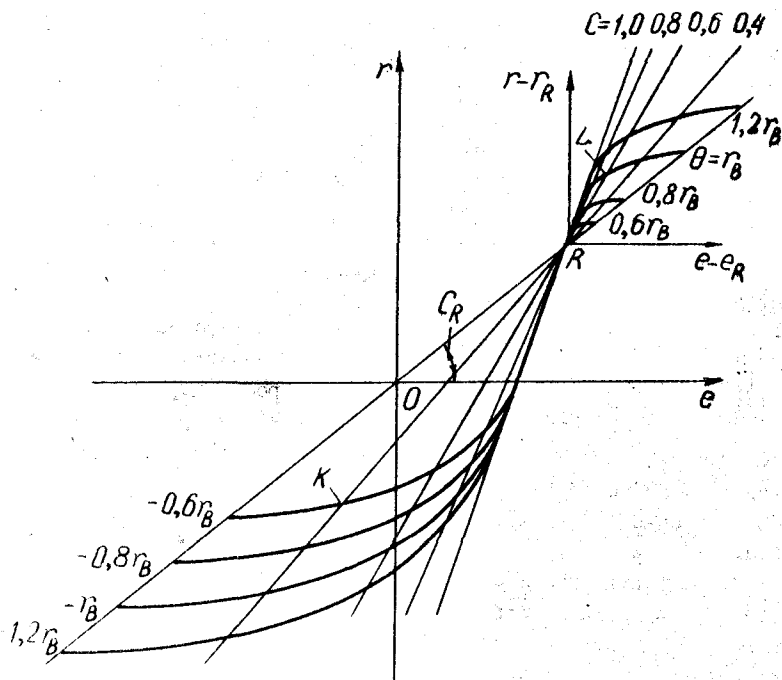


Рис. 1. Линии уровня $\theta = \text{const}$ и $C = \text{const}$

При нагружении из начального состояния, в соответствии с уравнением (1) и определениями (2) (в которых $A_R = A_0$), скорость неупругой деформации определяется выражением

$$\dot{\rho} = \Phi \left[\frac{e}{F_2(r/e)} \right] F_1(r/e), \quad (6)$$

которое аналогично известной теории упрочнения, но, в отличие от последней, выражение (6) описывает диаграмму быстрого неупругого деформирования, и параметром упрочнения в нем является вся неупругая деформация, накопленная к текущему моменту. В диссертации получено дифференциальное уравнение для описания процессов длительного деформирования при условии $dS/de = \text{const}$ ($dS/de = 0$ - ползучесть, $dS/de = -\infty$ - релаксация).

При заданной температуре T и скорости деформации $\dot{\epsilon}$ решением уравнения (1) (а также (6)) является $\theta = \Phi^0(\dot{\epsilon}, T) = \text{const}$ (где $\Phi^0[\Phi(x, T), T] = x$). Это означает, что кривые деформирования в координатах $\{\epsilon, r\}$ при различных скоростях деформации или температурах центрально подобны функции F с коэффициентами подобия θ . При неизотермическом деформировании ($\dot{T} = \text{var}$, $\dot{\epsilon} = \text{const}$) точка состояния находится на термомеханической поверхности $r = \theta F(\epsilon/\theta)$. В координатах $\{\epsilon/\theta, r/\theta\}$ все диаграммы (включая и диаграммы неизотермического деформирования) ложатся на одну кривую $r = \theta F(\epsilon/\theta)$.

В момент, когда происходит реверс скорости деформации или скорости изменения секущего модуля (последнее возможно при резком понижении температуры, или при увеличении скорости деформации) условие (а) или (б) в выражении (5) нарушается и вектор состояния A , соответствующий этому моменту, включается в "память" $\{P\}$ в качестве последнего ($A = A_{R+1}$).

Каждой точке на плоскости $\{\epsilon - \epsilon_R, r - r_R\}$, характеризуемой величинами θ и C , так же, как и при начальном нагружении, соответствует определенная скорость неупругой деформации (выражение (1)); линии уровня $\theta = \text{const}$ представляют собой диаграммы деформирования, центрально подобные кривой F с коэффициентами подобия $\theta^* = \theta - \theta_R$; линии уровня $C = \text{const}$ - лучи из точки R (рис. 1). Таким образом, уравнение состояния материала после реверса также соответствует теории упрочнения, но уже в новых координатах $\{\epsilon - \epsilon_R, r - r_R\}$. В диссертации получены дифференциальные уравнения, определяющие кривые ползучести, релаксации и процессов длительного деформирования при произвольном постоянном значении производной ds/de .

После реверса уравнение состояния (1)+(5) определяет скорость неупругой деформации в смещенной системе координат $\{\epsilon - \epsilon_R, r - r_R\}$. При заданных $\dot{\epsilon}$ и T решением уравнения (1) будет $\theta = \Phi^0(\dot{\epsilon}, T) = \text{const}$. Это означает, что кривые деформирования после реверса также являются центрально подобными по отношению к кривой F с коэффициентами подобия, равными $\theta - \theta_R$ и зависящими не только от текущих значений $\dot{\epsilon}$ и T , но и от их величин в момент последнего реверса R . В случае неизотермического нагружения ($\dot{\epsilon} = \text{const}$) точка состояния находится на новой термомеханической поверхности в координатах $\{\epsilon - \epsilon_R, r - r_R\}$ на кривой $(r - r_R)/(\theta - \theta_R) = F[(\epsilon - \epsilon_R)/(\theta - \theta_R)]$.

Если в процессе деформирования нарушается условие (а) или (б) из соотношения (5), что соответствует возникновению новых моментов реверса, то параметры состояния этих моментов фиксируются в "памяти" $\{P\}$ либо, при нарушении условий (в), (г) (из выражения (5)), исключаются последние вектора из "памяти" $\{P\}$. Так, например, если точка состояния достигает линии OR (рис. 1), то в этот момент $C=C_R$, вектор A_R "забывается", последним вектором становится $A_R=A_0$, далее уравнение состояния соответствует выражению (6).

В диссертации получены дифференциальные уравнения, необходимые для определения кривых деформирования после резкого уменьшения скорости деформации, а также кривых ползучести и релаксации при выдержке после произвольной предыстории нагружения. Уравнение состояния (1)+(5) отражает известные из экспериментов эффекты взаимного влияния процессов быстрого и медленного нагружений: ускорение ползучести после догрузки или неупругого деформирования обратного знака, разупрочняющее действие этапов выдержки на диаграммы последующего деформирования.

Для использования уравнения состояния (1)+(5) в расчетах кинетики неупругого деформирования конструкций разработана соответствующая методика (на основе известного метода дополнительных деформаций); в диссертации представлен алгоритм расчета изменения неупругой деформации за интервал времени.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ диссертации "Методика нахождения функций, определяющих деформационные свойства конструкционных материалов в стабильном состоянии" рассматривается задача экспериментального определения функций, входящих в уравнение состояния (1)+(5) (задача идентификации).

Температурные зависимости модулей упругости и коэффициента линейного расширения находятся из эксперимента обычным путем. Необходимо найти также функции Φ и F , определяющие закон развития неупругой деформации. Функция $r=F(\epsilon)$ определяется по диаграмме деформирования $r=f(\epsilon)$, снятой при некоторой скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуре T путем масштабирования: $r=f(\epsilon)=r_B F(\epsilon/r_B)$, где r_B - предельная упругая деформация на кривой $f(\epsilon)$.

Разработана методика ускоренного определения зависимости скорости установившейся ползучести от напряжения (реологической

функции). Методика основана на использовании выражения (1): по известным экспериментальным зависимостям $\dot{p}(t)$ и $F(e)$ при некоторой температуре T определяем (t - время)

$$\Phi(\theta, T) = \dot{p}(t) / F_1(C). \quad (7)$$

Параметр θ находится из соотношения $\theta = \theta_R + e^* / F_2^0(C)$ (выражение (2)). Данное уравнение дает возможность определить значения функции Φ при ряде значений аргументов θ по одной кривой $p(t)$. Отметим, что для определения функции $\dot{p}(t)$, входящей в уравнение (7), достаточно располагать любой из экспериментально найденных зависимостей $p(t)$ при выдержке (напряжение при этом может быть постоянным или релаксировать). В диссертации показано, что уравнение (7) не противоречит ранее предлагавшимся способам определения этой функции.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ диссертации "Проверка адекватности уравнения состояния" представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на ряде жаропрочных сталей и сплавов, имеющих широкое применение в машиностроении. Целью экспериментов является, с одной стороны, нахождение определяющих функций этих материалов и, с другой, проверка адекватности уравнения состояния свойствам реальных материалов при разнообразных программах нагружения.

Экспериментальные исследования проведены на специальной испытательной установке, предназначенной для циклического кручения тонкостенных трубчатых образцов (скорость изменения интенсивности полной деформации может меняться в интервале $(0,08 \div 9,4) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$). Диапазон рабочих температур, принятый в испытаниях: для образцов из стали Х18Н9 - $20 \div 700^\circ\text{C}$, ЭИ868 - $20 \div 750^\circ\text{C}$, ЭИ826 - $20 \div 800^\circ\text{C}$, ЭИ765 - $20 \div 700^\circ\text{C}$. Испытания на ползучесть при заданном уровне напряжения (4-8 значений напряжения на каждой температуре) и при различных скоростях деформации проводили при следующих температурах: Х18Н9 - 600, 650, 700 $^\circ\text{C}$, ЭИ868 - 650, 700, 750 $^\circ\text{C}$, ЭИ826 - 600, 700, 800 $^\circ\text{C}$, ЭИ765 - 650, 700 $^\circ\text{C}$ (эксперименты были проведены при участии мл.научн.сотр. ЧИИ Ю.Н.Ребякова). В процессе испытаний при заданном размахе полной деформации регистрировались кривые деформирования циклически стабильного состояния материала. Найденные из опытов температурные зависимости модуля упругости $G(T)$ и предельного напряжения $S_B(T)$, а также уравнения кривых $F(e)$ представлены в таблице I. Реологическая функция

Таблица 1. Параметры моделей деформирования конструкционных сталей (T , °C)

Материал	$\sigma \cdot 10^{-3}$, МПа	S_B , МПа	$lg \Phi$, (Φ , с $^{-1}$)	$F: lg \frac{P}{T_B} = \alpha + b lg \frac{T}{T_B}$	
				α	b
X18H9	95,4 - 0,064T	583 - 0,42T	$\max \begin{cases} 7,55 - \frac{16974}{T} + 5,88\alpha \\ -53,3 + 50,3\alpha \end{cases}$	3,79	8,88
ЭИ868	$\min \begin{cases} 87,4 - 0,0176T \\ 205 - 0,20T \end{cases}$	$\min \begin{cases} 460 - 0,24T \\ 958 - 1,01T \end{cases}$	$\max \begin{cases} 6,72 - \frac{7350}{T} + 6,01g\alpha \\ -3,03 + 20,31g\alpha \end{cases}$	0,306	9,62
ЭИ826	$\min \begin{cases} 87,5 - 0,0188T \\ 121 - 0,075T \end{cases}$	620 - 0,260T	$\max \begin{cases} 3,37 - \frac{5039}{T} + 8,01g\alpha \\ -3,04 + 34,01g\alpha \end{cases}$	0,282	4,55
ЭИ765	93,7 - 0,027T	580 - 0,152T	$\max \begin{cases} 1,41 - \frac{7644}{T} + 4,7\alpha \\ -41,5 + 38,5\alpha \end{cases}$	-0,101	9,70

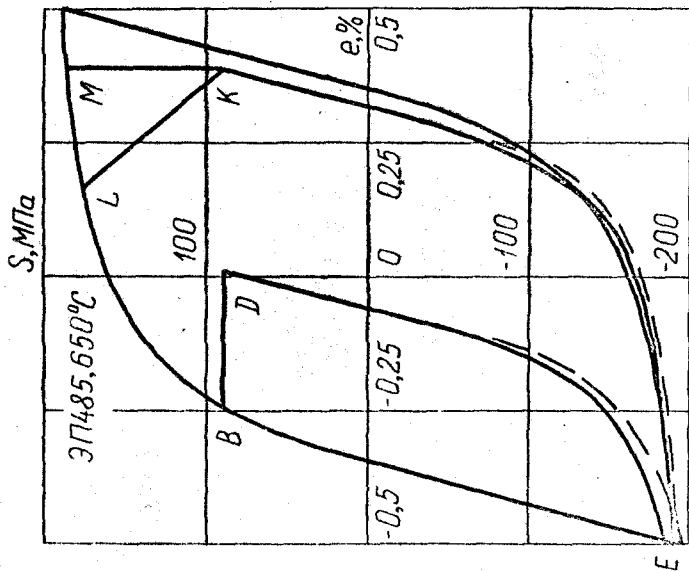


Рис.2. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) кривые деформирования после этапа выдержки

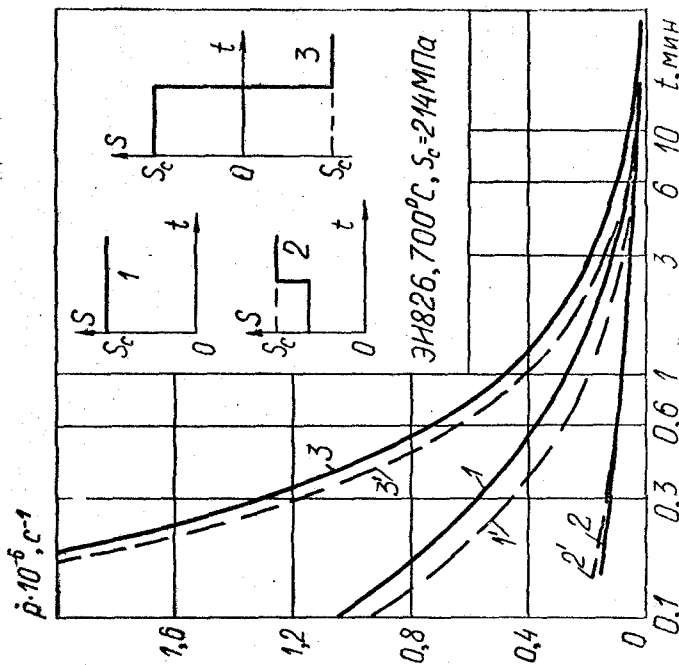


Рис.3. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) кривые изменения скорости неупругой деформации

для данного материала определялась по кривой ползучести $p(t)$ на некотором уровне напряжения.

По найденным таким образом определяющим функциям уравнения состояния (из двух типов испытаний) выполнено сопоставление расчетных кривых ползучести с экспериментальными, полученными при различных уровнях напряжений. Такое сопоставление позволило оценить адекватность уравнения, используя минимум экспериментальных данных о материале. Кроме того, реологическая функция была определена по кривым ползучести, полученным на ряде уровней напряжений (на каждой кривой неустановившейся ползучести выбиралось 5-15 точек). Отклонение полученных значений реологической функции от среднего не превышало 20%, что указывает на единственность этой функции для данного материала и также служит подтверждением адекватности предложенного уравнения состояния. Реологические функции испытывавшихся материалов представлены в диссертации, а соответствующие аппроксимирующие зависимости, коэффициенты которых определялись с использованием симплекс-метода (по минимуму квадратичной погрешности), записаны в таблице I (выражения для Φ , где $\alpha = S/S_B(T)$ - относительное напряжение).

Проверка адекватности уравнения состояния осуществлялась также путем сопоставления реологических функций, полученных по данным различных типов испытаний с выдержками (рис. 2): ползучесть, релаксация, в общем случае деформирования при $dS/de = const$ (в каждом типе испытания проводилось три эксперимента при различных значениях параметров нагружения). Сопоставление полученных результатов показало, что разброс точек не превышает 20%. Отсюда следует, что реологическая функция не зависит от типа испытаний и является единой для данного материала при данной температуре.

Описанные выше исследования позволяют сделать вывод о том, что реологическая функция является одной из основных, фундаментальных функций, определяющих деформационные свойства конструкционных материалов как на стадии установившейся ползучести, так и на первой, неустановившейся стадии, а также при изменяющихся во времени напряжениях.

Предлагаемая методика определения реологической функции сопоставлена с ранее известными. С этой целью указанная функция определялась тремя методами: по скорости второй фазы ползучести, по диаграммам деформирования при различных скоростях деформации и

путем совместного использования кривых неустановившейся ползучести и диаграмм деформирования. Сопоставление показывает, что независимо от методики получается одна и та же реологическая функция. Следовательно, такие свойства конструкционных материалов, как зависимость диаграмм деформирования от скорости нагружения, явления ползучести, релаксации и т.п. есть результат наложения двух фундаментальных свойств реального материала — микронеоднородности и реономности (вязкости). Эти свойства характеризуются соответственно функциями Φ и F .

Анализ реологических функций, полученных из эксперимента (таблица I, выражения для Φ) показывает, что их можно разделить на два характерных участка; в логарифмических либо полудифференциальных координатах они отвечают двум прямым линиям. С ростом температуры обе прямые смещаются по оси напряжений, не изменяя своих наклонов. Это позволяет полагать, что исследованные материалы обладают двумя различными механизмами неупругого деформирования. Первый механизм (при напряжениях, приближающихся к пределу прочности) отвечает процессам быстрого неупругого деформирования, при которых малому изменению напряжения соответствует существенное изменение скорости деформации. Неупругое деформование при реализации этого механизма близко к склерономному. Второй механизм, реализуемый при более низких напряжениях и скоростях деформации, представляет обычную ползучесть. Таким образом, хотя неупругая деформация в исследуемом диапазоне скоростей и напряжений является реономной, можно выделить область, в которой поведение материала относительно нечувствительно к длительности действия нагрузки. В этой области свойства материала можно считать практически склерономными.

Проверка адекватности уравнения состоявшаяся проводилась также путем сопоставления расчетных и экспериментальных кривых деформирования и ползучести при различных программах нагружения. Испытания проводились на образцах из следующих материалов: Х18Н9, ЭИ826, ЭП220, ЭП485. Исследовалось влияние ступенчатого изменения уровня напряжения (рис.3) и неупругой деформации обратного знака на процессе ползучести. Было получено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных диаграмм повторно-переменного деформирования при достаточно произвольных программах нагружения, в частности, и при деформировании с различными скоростями деформации.

Исследовалось влияние этапа выдержки на диаграммы последующего деформирования. Например, для образца из стали ЭП485 при температуре 650°C получены диаграммы разгрузки и обратного нагружения в трех испытаниях (рис. 2): после ползучести BD , релаксации $МК$, либо промежуточного деформирования LK . В испытаниях $МК$ и LK выдержка заканчивается в точке K и экспериментальные диаграммы KE , полученные для этих двух случаев практически совпадают и представлены одной сплошной линией. В соответствии с уравнением состояния (1)+(5) диаграмма определяется параметрами состояния в момент реверса, поэтому расчетные кривые в указанных программах совпадают (штриховая линия KE). Удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных кривых также подтверждает адекватность уравнения состояния.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ диссертации "Приближенный метод расчета неупругой деформации в зоне концентрации напряжений" разработана методика определения параметров неупругого деформирования в зонах концентрации на основе известного метода Г.Нейбера и предложено уравнение состояния.

Метод Г.Нейбера, получивший дальнейшее развитие в работах Н.А.Махутова, *E. Z. Stowell* и др., постулирует связь между напряженно-деформированными состояниями в зоне концентрации идеально упругой детали (интенсивность напряжений S^e , интенсивность деформаций e^e) и детали, выполненной из реального материала. В соответствии с формулой Г.Нейбера указанная связь определяется уравнением $S_e = S^e e^e$ (S, e - интенсивности напряжений и полных деформаций). В диссертации приведен краткий обзор экспериментальных данных и расчета кинетики неупругого деформирования, свидетельствующих об удовлетворительном соответствии их приближенной формуле Г.Нейбера.

Для определения неупругой деформации в зоне концентрации напряжений при произвольной программе нагружения необходимо иметь программы изменения интенсивности деформации упругой детали $e^e(t)$ и температуры $T(t)$, а также определяющие функции уравнения состояния (1)+(5) для материала детали. Система уравнений, определяющих напряженно-деформированное состояние в зоне концентрации, будет замкнутой, если к выражениям (1)+(5) добавить уравнение связи параметров состояния упругой и неупругой деталей (формула Г.Нейбера)

$$r^* e^* = (e_*^e)^2, \quad (8)$$

где $e_*^e = e^e - e_R^e$, значение с индексом R соответствует параметру состояния e^e в момент последнего реверса R . Таким образом, вектор состояния в зоне концентрации включает параметры $A = \{r, e, \theta, C, e^e\}$.

В диссертации приведены разрешающие уравнения для определения неупругой деформации в зоне концентрации напряжений при частных программах $e^e(t)$: циклическом регулярном изо- и неизотермическом нагружении, циклическом нагружении с выдержкой в одном полуцикле. Разработан алгоритм и приведена блок-схема расчета неупругой деформации при произвольной программе изменения $e^e(t)$. В качестве примера выполнен расчет кинетики неупругого деформирования в замковых пазах диска газовой турбины.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа поведения структурной модели упруговязкопластической среды с учетом реального характера реологических функций конструкционных сплавов в рабочих диапазонах температур получено уравнение состояния циклически стабильной реономной среды для условий пропорционального нагружения. Оно позволяет аналитически описать диаграммы повторно-переменного неизотермического деформирования при заданной скорости нагружения, а также закономерности ползучести, релаксации и промежуточных процессов длительного деформирования.

В соответствии с этим уравнением деформационные свойства материала зависят не только от текущих параметров состояния (напряжения, деформации, температур), но и от их значений в характерные моменты предистории ("реверсы"). Введены новые параметры состояния, позволяющие влияние предистории свести к влиянию значений этих параметров в момент последнего реверса.

2. Показано, что уравнением состояния описываются эффекты неупругого деформирования, наблюдаемые в опытах при ряде частных случаев нагружения.

а/ При начальном неизотермическом нагружении диаграммы лежат на термомеханической поверхности. При повторно-переменном неизотермическом нагружении они отвечают термомеханическим поверхностям, определяемым значениями напряжения, деформации и температуры в момент последнего реверса. Диаграммы, перестроенные с ис-

пользованием введенных вспомогательных параметров состояния, ложатся на одну кривую.

б/ На этапе выдержек происходит накопление неупругой деформации со скоростью, зависящей от текущих значений вспомогательных параметров состояния. Эта зависимость соответствует известной теории упрочнения, дополненной правилами формирования "памяти" материала к предыстории изменения напряжения, деформации и температуры ("память" о реверсах).

в/ Отражаются эффекты взаимного влияния процессов быстрого и медленного деформирования. Описывается появление первой фазы ползучести, возникающей каждый раз после догрузки; ускорение ползучести после быстрого неупругого деформирования обратного знака; разупрочняющее действие этапов ползучести на последующие диаграммы быстрого деформирования.

3. Уравнение состояния содержит две определяющие функции материала: уравнение кривой деформирования и реологическую функцию (зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения и температуры). Предложен метод ускоренного определения реологической функции, в котором используются полученные в испытаниях кривая первой и второй фазы ползучести, а также диаграмма деформирования. Достаточно одной кривой ползучести, чтобы построить реологическую функцию в целом интервале изменения напряжений. Составлена программа для ЭВМ, которая позволяет автоматизировать процесс обработки полученных экспериментально кривой ползучести и диаграммы деформирования с целью определения реологической функции материала.

4. Проведены экспериментальные исследования деформационных свойств сталей Х18Н9, ЗИ826, ЗИ868, ЗИ765 в соответствующих рабочих диапазонах температур при повторно-переменном нагружении с выдержками. На основе проведенных экспериментов найдены определяющие функции указанных сталей. Характер реологических функций, полученных из испытаний данных материалов, подтверждает предположение о реономности неупругой деформации во всем диапазоне изменения напряжений.

5. Экспериментально подтверждено, что зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения, полученная с использованием различных методик по данным различных типов испытаний (ползучесть, релаксация, промежуточный процесс деформирования), является единой для каждого конкретного материала. Таким образом, эта

зависимость (реологическая функция) является одной из фундаментальных функций, определяющих реологические свойства материала при разнообразных условиях деформирования, включая действие изменяющихся во времени напряжений.

6. Произведено сопоставление расчетных и экспериментальных кривых деформирования и ползучести при повторно-переменном нагружении, включающем этапы ползучести, релаксации либо промежуточных процессов длительного деформирования. Максимальное отклонение расчетных и опытных данных не превышает 10% по напряжениям при сопоставлении диаграмм деформирования и 17% - при сопоставлении скоростей неупругих деформаций в процессах длительного деформирования.

7. Разработана методика определения неупругой деформации в зоне концентрации напряжений при циклическом нагружении с выдержками, основанная на использовании метода Нейбера в сочетании с полученным уравнением состояния. Данная методика позволяет определять значения односторонней накопленной и знакопеременной деформации, необходимые для расчетной оценки долговечности элементов конструкций. В качестве примера произведен расчет неупругой деформации в диске газовой турбины (в месте соединения с лопаткой).

Основные **положения** диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Экспериментальное и расчетное исследование некоторых особенностей взаимного влияния пластической деформации и ползучести стали Х18Н9Т. - В кн.: XIII научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций. Тезисы докладов, Киев: Наукова думка, 1974. - с. 40-41. (Соавторы: Кононов К.М., Ребяков Ю.Н., Садаков О.С.).

2. К описанию взаимного влияния процессов быстрого пластического деформирования и ползучести при циклическом нагружении. - В кн.: Вопросы прочности в машиностроении. Челябинск, ЧПИ, 1974, № 151. - с. 101-105. (Соавторы: Гохберг В.Э., Ребяков Ю.Н.).

3. Исследование некоторых особенностей взаимного влияния пластической деформации и ползучести стали Х18Н9Т. - *Машиноведение*, 1975, № 2, с. 59-61. (Соавторы: Кононов К.М., Ребяков Ю.Н., Садаков О.С.).

4. Расширенный принцип Мазинга для описания кривых неизотермического деформирования в испытаниях с выдержками. - *Проблемы*

прочности, 1979, № II. - с. 46-48. (Соваторы: Мартыненко М.Е., Садаков О.С.).

5. Определение реологической функции конструкционных сплавов по кривой неустановившейся ползучести. - В кн.: Динамика и прочность конструкций. Челябинск, ЧПИ, 1977, № 201. - с. 48-53. (Соваторы: Ребяков Ю.Н., Садаков О.С.).

6. О применении методов математического программирования для определения параметров реологических моделей среды. - В кн.: Динамика и прочность конструкций. Челябинск, ЧПИ, 1977, № 201. - с. 53-58. (Соваторы: Гохберг В.Э., Мадудин В.Н.).

7. Накопление односторонней пластической деформации при асимметричном мягком циклическом нагружении. - В кн.: Динамика и прочность конструкций. Челябинск, ЧПИ, 1977, № 201. - с. 68-72. (Соваторы: Колпаков В.П., Мартыненко М.Е.).

8. Расширенный принцип Мазинга для описания неупругого деформирования при циклическом неизотермическом нагружении с выдержками. - В кн.: УП Всесоюзная конференция по прочности и пластичности, Тезисы докладов, Горький, 1978. - с. 84-86. (Соваторы: Мартыненко М.Е., Садаков О.С.).

9. О ползучести конструкционных материалов при переменном нагружении. - В кн.: Прочность машиностроительных конструкций, Челябинск, ЧПИ, 1979, № 236. - с. 40-48. (Соватор - Садаков О.С.).

10. Принцип подобия для описания кривых деформирования и ползучести при повторно-переменном неизотермическом нагружении с выдержками. - В кн.: XV научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций, Тезисы докладов, Киев: Наукова думка, 1980. - с. 54. (Соваторы: Мартыненко М.Е., Садаков О.С.).

Кул

Кульчикин Евгений Тимофеевич

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕУПРУТОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ
ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ С ВЫДЕРЖКАМИ**

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

Техн. редактор Миних А.В.

**ФБ 04080. Подписано к печати 13/IV-81г. Формат бумаги 60x90 1/16.
Объем 1,25 п.л., 1 уч.-изд.л. ЧП. Тираж 100 экз. Заказ № 156/471.**