

01.02.06 (043)
М. 294

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

МАРТЫНЕНКО Михаил Евгеньевич

ОПИСАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАСЧЕТАМ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 01.02.06 -

"Динамика, прочность и надежность машин
приборов и аппаратуры"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1976

Работа выполнена на кафедре "Сопротивление материалов" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

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

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ЗАРУБИН В.С.

доктор технических наук, профессор СОРОКИН О.В.

Ведущее предприятие - Специальное конструкторское бюро Ленинградского объединения "Пролетарский завод".

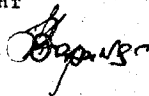
Защита диссертации состоится 20 октября 1976 г., в 15 часов, в ауд.244 на заседании Специализированного совета № 2 по присуждению ученой степени кандидата технических наук Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола (454044, Челябинск-44, проспект им. В.И. Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук, доцент

А. ВАРАНКИН



Актуальность темы. Расчет на прочность и жесткость высоконагруженных элементов современных машин требует расширения знаний о процессах неупругого деформирования конструкционных материалов. Очень часто такие детали, как лопатки и диски турбин, тепловые компенсаторы, оболочки тепловыделяющих элементов ядерных реакторов и камеры сгорания ХРД, работают в условиях резко нестационарных тепловых и силовых воздействий. Соображения эффективности и экономичности при проектировании таких узлов приводит к тому, что в процессе работы в них могут возникать значительные пластические деформации. В связи с этим возникает необходимость экспериментальных исследований неадиабатического повторно-переменного неупругого деформирования и создания надежных теорий, позволяющих производить расчеты кинетики деформирования таких конструкций.

Цель работы. Провести экспериментальные исследования диаграмм неадиабатического деформирования конструкционных материалов и выполнить апробацию структурной модели упруго-вязко-пластической среды для их математического описания. Разработать методику расчета конструкций, работающих в условиях пропорционального неадиабатического деформирования с использованием структурной модели материала.

Методы выполнения исследований. Экспериментальные исследования неупругого неадиабатического деформирования конструкционных материалов базируются на всестороннем и подробном анализе поведения структурной модели среды, обобщенной на соответствующие условия работы. Рассмотрены два варианта модели, отличающиеся степенью соответствия: модель склерономной среды, предназначенная для описания диаграмм повторно-переменного неадиабатического деформирования без учета влияния ползучести, и вариант модели, отражающий реономность среды, предназначенный для описания поведения материалов в широком диапазоне рабочих температур, когда влияние ползучести приводит к проявлению новых эффектов. Для проведения экспериментальных исследований разработана и изготовлена испытательная установка, позволяющая производить кручение тонкостенных трубчатых образцов по различным программам изменения внешнего усилия и температуры.

По разработанной методике произведена серия изотермических испытаний, в результате которых определены параметры моделей исследуемых материалов. Для проверки адекватности модели выполнены эксперименты на неизотермическое нагружение и произведено сопоставление расчетных и опытных диаграмм.

Научная новизна работы. Получены экспериментальные данные о работе конструкционных материалов, позволяющие расширить и уточнить представления об особенностях неупругого деформирования в неизотермических условиях. Разработана методика построения диаграммы деформирования конструкционных материалов, учитывающая историю изменения температуры и деформации (напряжения) и получены соответствующие аналитические выражения для их описания. Проанализированы эффекты, связанные с нестабильностью петли пластического гистерезиса (проявляющиеся в смещении её при многократном циклическом нагружении) и найдены аналитические выражения, определяющие условия накопления односторонней пластической деформации и её величину в зависимости от заданных параметров цикла.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Подробная экспериментальная проверка адекватности структурной модели и удовлетворительное совпадение результатов расчета с данными опыта позволяет уверенно использовать развиваемый теоретический подход в расчетах кинетики неупругого деформирования элементов конструкций, подвергаемых нестационарным тепловым воздействиям. Разработанная методика расчета стержня, работающего при неравномерном нагреве и циклически изменяющейся внешней нагрузке, может быть использована при оценке работоспособности конструкций, материал которых работает в условиях пропорционального неизотермического нагружения. К ним относятся лопатки и ободы турбин ГТД, оболочки ТВЭЛ ядерных реакторов, оболочки камер сгорания КРД, различное металлургическое оборудование.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях ЧПИ (1970-1976), на XII и XIII научных совещаниях по тепловым напряжениям в элементах конструкций (Канев, 1972, 1974), на Всесоюзном симпозиуме по малоцикловой усталости при повышенных температурах (Челябинск, 1974), на семинаре по теории пластичности в МВТУ им. Баумана (1975).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 работ.

Объем диссертации. Диссертация изложена на 120 страницах основного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Библиография содержит 84 наименования работ.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известны два подхода к описанию связи между напряжением σ_{ij} и деформацией ϵ_{ij} за пределом упругости: теории пластичности феноменологического типа и теории, отражающие микронеоднородность реальных материалов. Второй подход, называемый иногда онтологическим, представляют, в частности, структурные и физические модели среды.

Проблеме отражения процесса неупругого неизотермического деформирования с феноменологических позиций посвящены работы И.А.Биргера, А.А.Вакуленко, А.П.Гусенкова, В.С.Зарубина, И.З.Палляя, В.Прагера, Ю.Н.Шевченко, Б.Ф.Шорра.

Теория пластического течения, обобщенная В.Прагером на неизотермическое нагружение, предполагает существование поверхности текучести вида $f(\epsilon_{ij}, \epsilon_{ij}, \beta, T) = 0$. Параметр β , определяемый диссипацией энергии, позволяет учесть изотропное упрочнение. Для циклически стабильного материала ($\beta = 0$) при пропорциональном нагружении из теории следует существование двух термомеханических поверхностей (далее сокращенно ТМП) $\varphi(\sigma, \epsilon, T) = 0$ пластического течения в прямом и обратном направлениях. Имеющиеся экспериментальные данные подтверждают ТМП начального нагружения, но предварительная пластическая деформация изменяет ТМП в прямом и обратном направлениях. Поэтому теория В.Прагера при большой простоте недостаточно достоверно отражает свойства материалов.

В теории И.А.Биргера ($dp_{ij} = [\Phi_\sigma(\sigma, T) d\sigma_{ij} + \Phi_T(\sigma, T) dT] s_{ij}$) концепция ТМП отсутствует, однако если функции Φ_σ и Φ_T определять по кривым начального деформирования, лежащим на ТМП, указанная теория сводится, по существу, к теории В.Прагера.

Ю.Н.Шевченко предлагает описывать процесс знакопеременного неизотермического деформирования в виде ТМП начального $\sigma = F(\epsilon, T)$ и обратного $\sigma = f(\epsilon, \rho^*, T)$ нагружений (здесь и далее величины, отмеченные звездочкой, характеризуют значения соответствующих параметров в момент начала разгрузки). В.С.Зарубин и И.А.Кузьмин конкретизируют вид функции F_1 , связывая её с F принципом Мавзинга: $F_1 = F(\rho^*, T) - 2F(\frac{\epsilon^* - \epsilon}{2}, T)$. Такое выражение предлага-

ется использовать для любой (второй, третьей и т.д.) разгрузки и последующего нагружения обратного знака.

А.П.Гусенковым и Р.М.Шнейдеровичем использован подход, основанный на предположении о существовании обобщенной диаграммы циклического нагружения. Для циклически стабильного материала он сводится к предположению о существовании ТМН $F_j = F(\rho_j^*, T^*) - \bar{F}(\epsilon^* \epsilon, T)$ в "смещенных" осях координат $\sigma^* \epsilon$, $\epsilon^* - \epsilon$. При циклическом неизотермическом нагружении в общем случае диаграмма деформирования оказывается незамкнутой, что приводит к неограниченному росту деформации при мягком (ограниченном по напряжениям) нагружении или напряжения при жестком (ограниченном по деформациям). Последнее обстоятельство противоречит опыту.

Существует большой класс теорий пластичности, основанных на разделении полного напряжения σ_{ij} на активное α_{ij} и дополнительное β_{ij} , $\sigma_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij}$. Пластическое течение имеет место при $\alpha = \sigma_T(T)$. По-видимому, наиболее адекватной является теория, предложенная Б.Ф.Шорром ($d\rho/d\rho = E'_0(T) + \alpha[\beta(T) - \text{sign}(\alpha)\beta - E'_0(T)\rho]$). При циклическом неизотермическом нагружении, в отличие от других теорий, описывается асимптотическая стабилизация диаграммы деформирования, приводящая к замкнутой петле. К недостаткам этой теории можно отнести независимость положения стабильной петли пластического гистерезиса от предыстории нагружения.

Особенность рассмотренных работ состоит в том, что процесс деформирования рассматривается вне связи со временем, то есть является склерономным. Для описания реономного деформирования необходимо использовать существующие теории ползучести. Однако подобное сочетание теорий не позволяет отразить эффекты взаимного влияния пластических и вязких деформаций, которые в ряде случаев могут быть весьма существенными.

А.А.Вакуленко и И.З.Паллем предложен объединенный подход к описанию пластического и вязкого деформирования. Постулируется отказ от концепции поверхности текучести, а неупругая деформация считается реономной ($\dot{\rho} = d\rho/dt = \Phi(\sigma, T)$). Для более адекватного описания деформационных свойств И.З.Паллем предлагает теорию, в которой $\sigma_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij}$, а закон трансляции поверхности текучести задан в виде $\dot{\rho}_{ij} = W(s_{ij}, \rho_{ij}, T)_{ij}$. Теорией отражается влияние ползучести на вид кривой деформирования, однако при несимметричном по напряжениям мягком циклическом нагружении описывается неограниченное накопление односторонней пластической деформации при

любой степени асимметрии цикла, что экспериментально не подтверждается.

Среди теорий онтологического типа наиболее простыми и пригодными для практического применения являются структурные модели среды. Элемент объема материала представляется состоящим из бесконечного (или конечного) числа подэлементов, полная деформация которых считается одинаковой. Подэлементы отличаются между собой значениями параметров реологических свойств.

Структурная модель исследовалась в работах Г.Мазинга, Дж.Бесселинга, Н.Н.Афанасьева, С.Т.Милейко, В.С.Зарубина, М.А.Кузьмина, О.С.Садакова, И.А.Иванова и др.

Анализ поведения структурной модели при повторно-переменном изотермическом нагружении показал хорошее соответствие её экспериментальным данным, причем более адекватное, чем известные феноменологические теории. Аналитические исследования поведения модели при неизотермическом нагружении качественно не противоречат известным опытным данным. Для детальной апробации подхода необходима его количественная проверка. Для модели разработан простой и четкий алгоритм определения её параметров по результатам испытаний реальных материалов. Для расчета кинетики деформирования конструкций решена краевая задача с использованием уравнений модели.

Таким образом, проведенный анализ работ, посвященных проблеме описания деформационных свойств материалов при неизотермическом повторно-переменном нагружении показал, что наиболее перспективным для решения поставленной задачи представляется подход с использованием структурной модели среды.

Экспериментальным методам исследований неупругого изотермического деформирования посвящены работы А.П.Гусенкова, Т.П.Захаровой, В.С.Зарубина, М.А.Кузьмина, Р.Г.Терехова, Ю.Н.Шевченко.

Проверка существования ТМР начального нагружения производилась Т.П.Захаровой, Р.Г.Тереховым, Ю.Н.Шевченко. Опыты показали, что концепция ТМР в основном подтверждается, если при обработке кривых деформирования учитывается влияние ползучести.

В работах А.П.Гусенкова приводятся данные по циклическому неизотермическому нагружению при температуре изменяющейся синхронно с напряжением. В.С.Зарубиным и М.А.Кузьминым производилась проверка возможности применения принципа Мазинга в случае повтор-

но-переменного нагружения и ступенчато меняющейся температуре. Однако имеющихся сведений явно недостаточно для всестороннего изучения процесса изотермического деформирования и, кроме того, ограниченность приводимых данных не позволяет использовать их для апробации структурной модели.

Таким образом, в работе выявилась необходимость поставить и решить следующие задачи:

1. Провести подробный анализ поведения структурной модели с целью разработки метода построения диаграммы неадиабатического деформирования.

2. Выполнить экспериментальные исследования неупругого неадиабатического деформирования конструкционных материалов, имеющих широкое распространение в машиностроении, с целью проверки адекватности структурной модели.

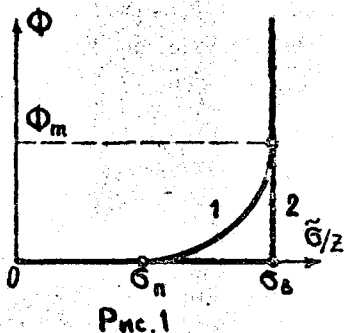
3. Разработать методику расчета кинетики деформирования конструкций с применением полученных уравнений диаграммы деформирования для использования модели в инженерной практике.

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СКЛЕРОСКОПОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В соответствии с принятым для структурных моделей допущением элемент объема среды представляется состоящим из набора параллельно нагруженных подэлементов, имеющих одинаковую полную деформацию ϵ_{ij} , модуль упругости E , температуру T , коэффициент линейного расширения α . Полная деформация подэлемента представляет собой сумму упругой $\tilde{\epsilon}_{ij}$, пластической $\tilde{\rho}_{ij}$ и тепловой ϵ_T составляющих. Напряжение $\tilde{\sigma}$ связано с упругой деформацией законом Гука: $\tilde{\sigma} = E\tilde{\epsilon}$. Реологические свойства подэлементов определяются единой для всех подэлементов зависимостью скорости ползучести от напряжения $\tilde{\sigma}$ и температуры: $\dot{\rho} = \Phi(\frac{\tilde{\sigma}}{Z}, T)$, где Z - параметр разброса свойств подэлементов, задаваемый функцией плотности распределения $y(z, T)$.

Параметры $\epsilon, \tau, \rho, \epsilon_T, \sigma$, характеризующие объем среды в целом, находятся осреднением по подэлементам соответствующих величин, например, $\sigma = \int_0^{\infty} \tilde{\sigma}(z)y(z, T)dz$.

В рабочем диапазоне температур $T_0 \leq T \leq T_{max}$ и скоростей деформаций $\dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_{max}$ функцию $\Phi(\frac{\tilde{\sigma}}{Z})$ конструкционных сплавов можно схематизировать в виде, показанном линией I на рис. I. При скоростях



нагружения $\dot{\epsilon} > \dot{\Phi}_m$ подэлементы практически не отличаются от идеально-пластических с пределом текучести $\tilde{\sigma}_n = \sigma_n Z$, что соответствует реологической функции, показанной линией 2. Если нагружение происходит со скоростью близкой к нулю, подэлементы также являются идеально-пластическими, но с пределом текучести $\tilde{\sigma}_n = \sigma_n Z$.

В данной главе рассмотрен вариант модели, отвечающий реологической функции Φ вида 2. Проведенный анализ поведения такой модели показал, что процесс неизотермического нагружения из начального недефор-

мированного состояния описывается соответствующей ТМН $\sigma = F(\epsilon, T)$. При разгрузке и нагружении обратного знака диаграмма описывается выражением: $\sigma = F(\rho^*, T^*) - F_1(\rho^*, T^*)$, согласно которому ТМН обратного нагружения не существует. Данное уравнение показывает, что в отличие от схемы, предложенной Ю.Н.Шевченко, структурной моделью отражается влияние предыстории как деформации, так и температуры. Отметим, что в подходе А.П.Гусенкова и Р.М.Шнейдеровича также учитывается история температуры (определяется положение точки начала разгрузки), вид кривой деформирования определяется только текущей температурой.

При циклическом неизотермическом нагружении моделью описывается замкнутая петля пластического гистерезиса (напомним, что данным вариантом модели ползучести не учитывается).

Для конкретизации уравнений начальной ТМН и кривой обратного нагружения вводится допущение, что функция плотности распределения $y(z)$ параметров разброса Z не зависит от температуры. Справедливость принятого ограничения подтверждается соответствующей обработкой экспериментальных диаграмм деформирования. Модель в этом случае значительно упрощается, что позволяет получить аналитические выражения, описывающие диаграмму повторно-переменного нагружения. Анализ поведения модели производится с помощью элпр распределения упругих деформаций $\tilde{\gamma}(z)$ подэлементов по параметру Z . По заданной программе изменения деформа-

ции ε и температуры T строится соответствующая эпюра $\tilde{r}(z)$, которая для любого момента истории нагружения может быть представлена в виде суммы эпюр $\tilde{r}(z)$, соответствующих начальному нагружению. При этом, если задана кривая начального нагружения $r = f(\varepsilon, T_0)$, не определяя функции $y(z)$ можно найти величину $\sigma(t) = Er(t)$ путем сложения эпюр $\tilde{r}(z)$ типа начальных.

Полученное уравнение ТМП исходного нагружения имеет вид:

$$\sigma = E(T)\theta(T)f\left(\frac{\varepsilon}{\theta(T)}\right); \quad \theta(T) = \frac{\sigma_B(T)E(T_0)}{\sigma_B(T_0)E(T)}. \quad (1)$$

При фиксированной температуре $T = T_K$ уравнение (1) описывает диаграммы изотермического деформирования, которые в координатах $r \sim \varepsilon$ оказываются центрально-подобными с коэффициентом подобия $\eta = \theta(T_K)$ по отношению к кривой $r = f(\varepsilon, T_0)$. Это условие с одной стороны ограничивает класс конструкционных материалов, деформационные свойства которых могут быть описаны данным вариантом модели, с другой стороны указывает способ экспериментального определения функции $\theta(T)$.

Уравнение кривой разгрузки и нагружения обратного знака имеет вид:

$$\sigma^* - \sigma = E(T)[\theta(T) + \theta(T^*)]f\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon^*}{\theta(T) + \theta(T^*)}\right) \quad (2)$$

и может рассматриваться как обобщение принципа Мазинга на неизо-термическое нагружение.

Для построения диаграммы повторно-переменного нагружения разработаны правила использования выражений (1) и (2). Их получение основывается на анализе кинетики изменения эпюры $\tilde{r}(z)$ в зависимости от истории деформации и температуры. Сущность их сводится к следующему. До момента первой разгрузки диаграмма описывается уравнением (1). Начиная с момента 1 изменения знака скорости деформирования $\dot{\varepsilon}$ используется уравнение (2) в котором $\theta^* = \theta_1$, $\varepsilon^* = \varepsilon_1$, $\sigma^* = \sigma_1$. Значения θ_1 , ε_1 , σ_1 запоминаются. Диаграмма деформирования подчиняется этому выражению до тех пор, пока $|\varepsilon/\theta| \leq |\varepsilon_1/\theta_1|$; при дальнейшем нагружении опять описывается ТМП (1), а память о точке поворота 1 стирается. Если новый поворот траектории деформирования произошел при $|\varepsilon/\theta| < |\varepsilon_1/\theta_1|$ (момент 2), диаграмма описывается выражением

(2), в котором $\theta^* = \theta_2, \varepsilon^* = \varepsilon_2, \sigma^* = \sigma_2$, значения $\theta_2, \varepsilon_2, \sigma_2$ запоминаются и хранятся в памяти до тех пор, пока $|\dot{\varepsilon}/\theta| < |\dot{\varepsilon}_2/\theta_2|$. Начиная с момента, когда $|\dot{\varepsilon}/\theta| = |\dot{\varepsilon}_2/\theta_2|$, $\theta^* = \theta_1, \varepsilon^* = \varepsilon_1, \sigma^* = \sigma_1$, а память о точке поворота 2 стирается. Вообще, для i -ой точки поворота $\theta^* = \theta_i, \varepsilon^* = \varepsilon_i, \sigma^* = \sigma_i$ при $|\dot{\varepsilon}/\theta| \leq |\dot{\varepsilon}_i/\theta_i|$ и $\theta^* = \theta_k, \varepsilon^* = \varepsilon_k, \sigma^* = \sigma_k$ при $|\dot{\varepsilon}_k/\theta_k| \geq |\dot{\varepsilon}/\theta| \geq |\dot{\varepsilon}_{k-1}/\theta_{k-1}|$.

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ЧАСТИЧНО-РЕОНОМНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассмотренный выше вариант модели не учитывает реономность материала (отличие реологической функции от линии I, рис. I), которая, по-видимому, может проявляться не только при выдержках с постоянным напряжением или деформацией (ползучесть, релаксация), но и при циклическом деформировании без выдержек. В настоящей главе производится анализ подобных эффектов для модели, подэлементы которой обладают реологической функцией, показанной линией 1 на рис. I. Исследуется процесс нагружения со скоростями деформации $\dot{\varepsilon} > \Phi_m$. Диаграмма деформирования подэлемента при этом не отличается от идеально-пластической с предельным напряжением $\tilde{\sigma}_7 = \sigma_7 Z$. Отметим, что если скорость нагружения $\dot{\varepsilon} \approx 0$, диаграмма также близка к идеально пластической, но с предельным напряжением $\tilde{\sigma}_n = \sigma_n Z$. Если после быстрого нагружения подэлемента до $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}_7$ зафиксировать достигнутую деформацию, при последующей выдержке будет происходить релаксация напряжения до $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}_n$.

Анализ поведения модели с бесконечным числом подэлементов производится аналогично предыдущему (используются эпюры $\tilde{\sigma}(z)$), но с учетом возможности релаксации $\tilde{\sigma}_7 \rightarrow \tilde{\sigma}_n$.

При быстром нагружении описывается обычная кривая деформирования, которую, как и ранее, будем обозначать функцией $\sigma = F(\varepsilon)$. Если $\dot{\varepsilon} \approx 0$ (реализуется предельное напряжение подэлементов $\tilde{\sigma}_n$), кривая деформирования проходит ниже и описывается уравнением

$$\sigma = F_0(\varepsilon) = \varkappa F(\varepsilon/\varkappa), \quad \varkappa = \sigma_n/\sigma_7. \quad (3)$$

Если после достижения некоторой деформации ε^* (при $\dot{\varepsilon} > \Phi_m$) производится выдержка при $\dot{\varepsilon}^* = \text{const}$, напряжение релаксирует до величины $\varkappa F(\varepsilon^*/\varkappa)$, то есть точка состояния с кривой F

переходит на кривую F_0 . Если фиксируется напряжение $\sigma^* = const$, происходит ползучесть, причем точка состояния также стремится к линии F_0 . В случае, когда σ^* достаточно велико ($\sigma^* \gg \sigma_B$), ползучесть не прекращается.

При циклическом нагружении моделью описываются следующие эффекты.

Если цикл симметричен, диаграмма соответствует принципу Мазинга и поведение модели не отличается от рассмотренного ранее склерономного варианта. При несимметричном жестком нагружении с невысокими амплитудами деформации ($\epsilon_a < \approx \sigma_{mц}/E$, $\sigma_{mц}$ - предел пропорциональности материала) ненулевое среднее напряжение первых циклов постепенно релаксирует (циклическая релаксация). При этом максимальное напряжение цикла стремится к линии F_0 . Если производится несимметричное мягкое нагружение, моделью описывается поцикловое смещение петли, приводящее к накоплению односторонней деформации (циклическая ползучесть), которое протекает до тех пор, пока точка диаграммы с максимальным напряжением не достигнет кривой F_0 . Если $\sigma_{max} > \approx \sigma_B$ накопление деформации неограничено.

При больших амплитудах деформации ϵ_a предельное смещение петли пластического гистерезиса определяется линией

$$\sigma = \bar{F}_0(\epsilon) = F_0(\epsilon) + F(\epsilon_a) - F_0(\epsilon_a), \quad (4)$$

построение которой ясно на рис.2.

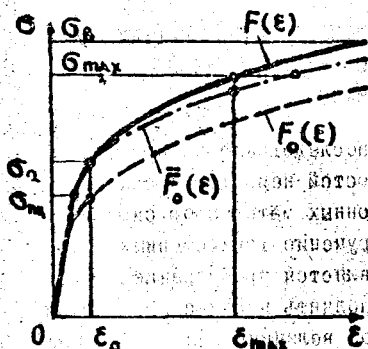


Рис.2

При неизотермическом циклическом нагружении $\approx = \approx(T)$ и полученные выражения соответствующим образом обобщаются. "Симметричным" циклом, при котором отсутствует эффект циклической ползучести или релаксации, является цикл, коэффициент асимметрии $\alpha = \frac{T_{min}}{T_{max}}$ которого равен критическому:

$$\alpha_0 = \frac{\theta(T_{min})}{\theta(T_{max})}. \quad (5)$$

Если $\alpha > \alpha_0$ смещение петли происходит в полудиклах

с максимальным напряжением σ_{max} ; при $\alpha < \alpha_0$ - в полуциклах с минимальным напряжением σ_{min} . При мягком несимметричном цикле $\{\sigma_1, T_1\} \rightleftharpoons \{\sigma_2, T_2\}$ накопление деформации ограничено, если выполняются условия:

$$|\sigma_i| < \varkappa(T_i)\sigma_0(T) + \theta(T_i)F\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\theta(T_i) + \theta(T_2)}\right) - \varkappa(T_i)\theta(T_i)F\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varkappa(T_i)\theta(T_1) + \theta(T_2)}\right), \quad (6)$$

($i = 1, 2$)

здесь $\Delta\varepsilon$ - размах деформации в цикле, который определяется с помощью выражения (2) (ползучесть практически не влияет на величину $\Delta\varepsilon$). Если для одного из i неравенство (6) не выполняется, накопление деформации в соответствующем направлении неограничено.

Для построения модели реального материала разработана методика экспериментального определения ее параметров. Нахождению в опыте подлежат функции $r = f(\varepsilon)$, $\theta(T)$, $\varkappa(T)$. Функция $r = f(\varepsilon)$ определяется по кривой начального деформирования в координатах "упругая деформация - полная деформация" при температуре $T = T_0$. Функция $\theta(T)$ строится по ряду точек $\theta_k = \theta(T_k)$, где $\theta(T_k)$ - коэффициент центрального подобия кривой начального нагружения в координатах $r \sim \varepsilon$ при $T = T_k$ по отношению к диаграмме $f(\varepsilon)$. Аналогично определяются значения $\varkappa_k = \varkappa(T_k)$, как коэффициенты центрального подобия кривых $F_0(\varepsilon)$ и $F(\varepsilon)$ при $T = T_k$. Кривая $F_0(\varepsilon)$ строится по серии испытаний на релаксацию напряжений при ряде значений деформации ε .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИАГРАММ ЦИКЛИЧЕСКОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для проведения экспериментальных исследований по проверке адекватности модели и изучения особенностей неизоотермического циклического деформирования конструкционных материалов сконструирована испытательная установка на кручение тонкостенных трубчатых образцов, нагрев которых осуществляется пропусканием тока. Силовая автоматика машины позволяет выполнять жесткое или мягкое нагружение, поддержание в цикле заданной величины напряжения или деформации (при испытаниях на ползучесть и релаксацию). Регистра-

ция результатов испытаний производится с помощью автоматических потенциометров и двухкоординатного прибора.

По разработанной методике определены параметры моделей сплавов IX18N10T, IX18N9T, 45XHMΦA, ЭИ-765, ЭИ-698, ЭИ-826. Обработка результатов показала удовлетворительное выполнение условия центрального подобия диаграмм изотермического деформирования: для большинства испытанных материалов отклонения не превышают 4-5% на базе деформации $\epsilon = 1,5\%$. Графики функций $\theta(T)$, построенные для указанных материалов, представлены на рис.3. По данным испытаний на релаксацию напряжений найдены зависимости $\alpha(T)$ (рис.4). Отклонения от условия центрального подобия диаграмм $F(\epsilon)$ и $F_0(\epsilon)$ не превышают 3-4%.

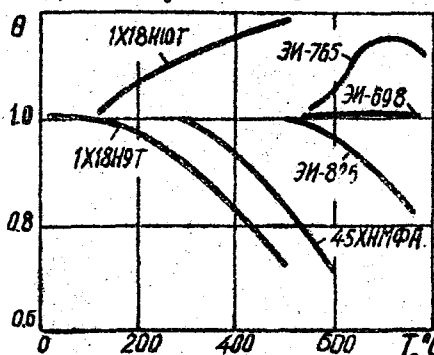


Рис.3

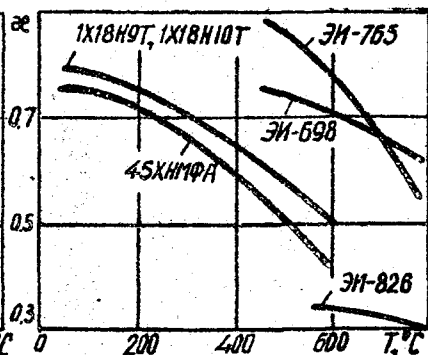


Рис.4

В опытах на неизотермическое циклическое нагружение проверялась справедливость выражений, описывающих диаграмму деформирования. Опыты производились при различных программах изменения полной деформации и температуры (ступенчатое изменение температуры при поддержании заданной деформации; синхронное с деформацией или напряжением изменение температуры). Обработка полученных диаграмм показала, что процесс начального неизотермического нагружения удовлетворительно описывается уравнением (1) термомеханической поверхности активного нагружения. При разгрузке и нагружении обратного знака вид кривой деформирования определяется не только температурой, но и её значением в момент начала разгрузки. Уравнение (2) лучше, чем ранее известные подходы, описывает процесс повторно-переменного нагружения. На фиг.5 представлена диаграмма деформирования стали IX18N9T, полученная при цикличес-

ком нагружении с температурой, изменяющейся синхронно с деформацией. Штриховой линией показана расчетная диаграмма, описываемая уравнениями (1) и (2). Для сравнения приведены расчетные диаграммы, построенные по методике В.С.Зарубина и М.А.Кузьмина (штрих-пунктирная линия) и А.П.Гусенкова (отмечена крестиками).

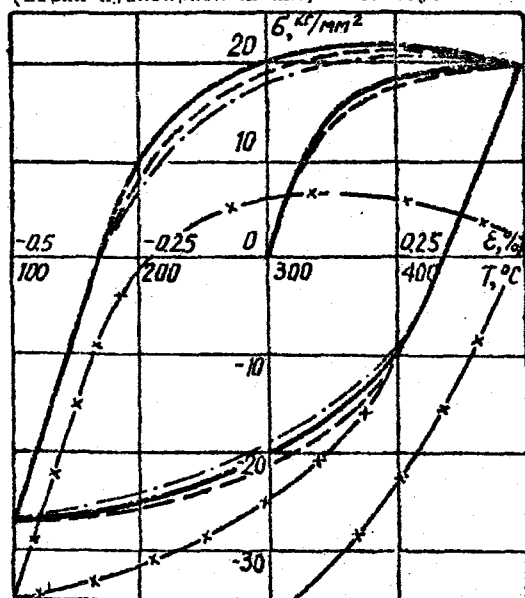


Рис. 5

Оценка влияния реономности на поведение петли пластического гистерезиса при многократном циклическом нагружении проверялась в изотермических (при асимметрии цикла нагружения) и неизотермических условиях нагружения. Опыты показали, что в зависимости от параметров цикла нагружения процесс циклической ползучести может прекратиться или продолжаться неограниченно. Погрешности результатов расчета по отношению к данным опыта не превышают 5-7%.

РАСЧЕТ КИНЕТИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Методика расчета кинетики деформирования конструкции с использованием уравнений (1) и (2) диаграмм в принципе не отличается от известных методов расчета с применением аппарата теории пластичности. Отличие состоит в учете истории деформирования введением соответствующих правил, определяющих использование указанных уравнений. При известной истории изменения температуры и деформации применение формул подчиняется правилам, изложенным выше. Однако при расчетах кинетики деформирования конструкции известен закон изменения внешних нагрузок и температур, а опреде-

ление истории нагружения в выделенных точках конструкции является предметом вычислений.

Для этой цели разработан алгоритм, по которому производится определение условия выхода на ТМН (1) или разгрузки и нагружения обратного знака (2). В последнем случае программой производится вычисление значений θ^* , ϵ^* , σ^* и их запоминание или стирание в зависимости от предыстории.

В качестве иллюстрации метода рассмотрен расчет бруса при неравномерном нагреве, нагруженного циклически изменяющейся нормальной силой. Уравнение диаграммы $r = f(\epsilon)$ принято в виде:

$$r = D \arctg\left(\frac{D\epsilon}{F}\right), \quad (7)$$

где D, F - константы, определяемые по кривой деформирования, найденной экспериментально.

Выполненные расчеты различных вариантов нагружения, отличающиеся величиной внешней силы и значениями градиентов температурного поля иллюстрируют эффекты формоизменения стержня, выражающиеся в поцикловом накоплении пластической деформации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Произведен обзор существующих методов описания поведения конструкционных материалов при неупругом неизотермическом нагружении, который показал, что наиболее приемлемым подходом с точки зрения соответствия метода экспериментальным данным и доступности его в практическом применении следует считать структурные модели среды.

2. Обзор имеющихся сведений по экспериментальным исследованиям показал их существенную недостаточность для подробного изучения закономерностей неизотермического деформирования.

3. Выполнен детальный анализ поведения склерономного (не учитывающего ползучести) варианта структурной модели среды, по результатам которого разработаны правила построения диаграмм деформирования при произвольной программе неизотермического нагружения.

4. Для более точного отражения деформационных свойств конструкционных материалов в широком диапазоне температур использован вариант модели, учитывающий частичную реономность материала. Анализ поведения модели показал нестабильность петли пластического гистерезиса при многократном циклическом нагружении, которая вы-

ражается в смещении её в зависимости от степени асимметрии цикла. При жестком нагружении моделью описывается изменение среднего напряжения цикла (циклическая релаксация), при мягком – одно-стороннее накопление деформации (циклическая ползучесть).

5. Для определения предельной величины смещения петли пластического гистерезиса получены аналитические выражения, которые интерпретируются схемой, использующей диаграммы быстрого и медленного нагружений и параметры цикла – экстремальные значения напряжения или деформации.

6. Построена диаграмма предельных состояний мягкого циклического деформирования для определения величины накоплений деформации.

7. Разработана методика экспериментального определения параметров модели по результатам изотермического циклического деформирования и испытаний на релаксацию напряжений.

8. Для проведения экспериментальных исследований неизотермического деформирования разработана и изготовлена автоматизированная установка на кручение тонкостенных трубчатых образцов. Установка позволяет производить циклическое жесткое или мягкое нагружение с включением этапов ползучести или релаксации. Температурная автоматика дает возможность изменять температуру образцов по заданной программе.

9. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на материалах, имеющих широкое применение при производстве высоконагруженных деталей современных машин, показали хорошее соответствие предсказываемых моделью эффектов неизотермического циклического нагружения. Изотермические диаграммы деформирования, обработанные по соответствующей методике, близки к центрально подобным. Отклонения не превышают 5% для большинства испытанных марок материалов.

10. При неизотермическом нагружении подтверждается вывод о существовании термомеханической поверхности начального активного нагружения. Отклонения расчетных и опытных диаграмм не превышают 5-10%.

11. При повторно-переменном нагружении исследования показали, что вид кривой деформирования определяется историей нагружения. Зависимость между напряжением и деформацией в области вторичных пластических деформаций определяется значением деформации и температуры в момент начала разгрузки. Расчетные диаграммы,

построенные с использованием обобщенного принципа Мазинга находят-ся в удовлетворительном согласии с опытными данными.

12. Исследования диаграмм циклического нагружения показали влияние асимметрии цикла на протекание процессов циклической ползучести и релаксации. Величины предельного смещения петли пластического гистерезиса определяются параметрами цикла нагружения и соответствуют значениям, предсказываемым моделью, с точностью до 5-7%.

13. Для расчетов кинетики неупругого поведения конструкций с помощью полученных аналитических зависимостей, описывающих диаграмму деформирования разработана методика и алгоритм счета, реализованный на ЭЦВМ М-222 на примере расчета бруса, нагруженного циклически изменяющейся нормальной силой в условиях нестационарного осесимметричного нагрева.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. К описанию диаграмм изотермического деформирования. Труды ИПИ, № 92, Пермь, 1972. (Соавторы Иванов И.А., Садаков О.С.).
2. К описанию диаграмм деформирования конструкционных материалов при повторном неизоотермическом нагружении. XII научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций. Тезисы докладов, "Наукова думка", Киев, 1972. (Соавтор Садаков О.С.).
3. Использование структурной модели материала для описания ограниченной ползучести при неизоотермическом циклическом нагружении. XIII научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций. Тезисы докладов, "Наукова думка", Киев, 1974. (Соавтор Садаков О.С.).
4. Применение структурной модели упруго-вязко-пластической среды к описанию циклического неизоотермического деформирования. В сб. Материалы Всесоюзного симпозиума по малоциклоевой усталости при повышенных температурах, вып.3, Челябинск, 1974.
5. К вопросу о накоплении односторонней пластической деформации при асимметричном мягком циклическом нагружении. В сб. Материалы Всесоюзного симпозиума по малоциклоевой усталости при повышенных температурах, вып.4, Челябинск, 1974.
6. О циклической ползучести конструкционных материалов при нормальной температуре. В сб. Вопросы прочности в машиностроении. Сб. трудов ЧПИ, № 151, Челябинск, 1974. (Соавтор Садаков О.С.).