

0 01.02.06

294

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Мартыненко Николай Евгеньевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПРИ
ТЕРМОУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Специальность 01.02.06. - "Динамика и 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 - 1978

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

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Соболев Н.Д.;
доктор технических наук
Шрон Р.З.

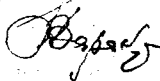
Ведущее предприятие - Государственный научно-иссле-
дательский институт машиноведения (г.Москва)

Защита состоится _____ 1978 г. на заседании
Специализированного совета К 053.13.02 по присуждению ученой
степени кандидата технических наук Челябинского политехнического
института им. Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан _____ 1978 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения,
просим направлять по адресу: 454044, г.Челябинск-44, проспект
имени В.И.Ленина, 76, ЧИИ, ученому секретарю совета.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент



А.Варанкин

АКТУАЛЬНОСТЬ. При создании новых мощных и высокоэффективных энергетических, силовых и транспортных установок важное значение имеет оптимальное решение вопросов, связанных с расчетами долговечности элементов конструкций, работающих в условиях циклически изменяющихся температур и напряжений. Это обусловлено, с одной стороны, ужесточением температурных режимов в таких установках, и, с другой стороны, стремлением к уменьшению веса и ограничению запасов прочности. В связи с этим растет актуальность тщательного и всестороннего изучения характеристик прочности конструктивных материалов при повторных воздействиях температуры и тепловых напряжений (термоусталостной прочности). Среди способов проведения испытаний на термическую усталость наибольшее распространение, благодаря своей простоте, получила методика, предложенная Л.Ф.Кохфиным и развитая в работах Ю.Ф.Баладина, А.А.Баранова, Н.Г.Бычкова, Л.Б.Гецова, Р.А.Дульнева, В.И.Егорова, В.А.Казакова, В.П.Конопленко, В.М.Костина, П.И.Котова, А.Ф.Малыгина, Н.С.Можаковского, С.В.Серенсена, Д.П.Синявского, Н.Д.Соболева, Н.Г.Тачиной, В.Т.Трощенко, Г.А.Тулякова, Б.Ф.Шорра, Берлинга, Конвея, Мэнсона и других исследователей. При испытаниях на термическую усталость особенно важное значение имеет получение надежной информации о параметрах циклического нагружения образца (напряжений, деформаций, их законов изменения во времени). Неточное знание условий работы материала образца приводит к тому, что получаемая информация о прочностных свойствах материала часто носит лишь сравнительный характер, а в некоторых случаях интерпретация результатов испытаний может оказаться и качественно неверной. Это связано как с трудностями описания упруго-вязко-пластического неизотермического циклического деформирования материалов, так и с отсутствием методов расчета образца как конструкции, с полным анализом его кинетики деформаций.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Разработка адекватного и доступного для применения в инженерной практике метода расчета кинетики деформирования образцов установки типа Коффина с целью определения параметров циклического деформирования материала, включающего методику математического моделирования деформационных свойств конкретного материала выбранной моделью среды.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ. Определение параметров циклического нагружения материала производится на основе расчета (с использованием ЭЦВМ) кинетики неупругого деформирования в образце. Выполнено расчетное исследование влияния параметров нагружения на кинетику деформирования образца.

Произведена экспериментальная проверка адекватности математической модели среды, а также метода расчета деформаций образца.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ. Разработана методика расчета кинетики неупругого деформирования образцов установки типа Коффина при термоциклическом нагружении. Расчет производится с использованием структурной модели упруго-вязко-пластической среды, учитывающей деформацию ползучести (как установившуюся, так и не установившуюся) и циклическое упрочнение.

Построены модели сталей Х18Н9, Х18Н1МЗ, IX2М для циклически стабильного состояния (с учетом ползучести) в диапазоне температур, соответственно, 20-700°C, 20-900°C, 20-600°C.

Структурная модель развита для отражения изотропного упрочнения. Разработана программа испытаний образцов материала и методика обработки их результатов для определения соответствующих параметров материала. По данным испытаний образцов при циклическом нагружении определены параметры такой модели стали IX2М при температуре 450°C и стали Х18Н9 для температур 20-500°C.

Разработана методика решения краевой задачи на основе структурной модели для пропорционального нагружения с использованием итераций по признаку пластического течения, позволяющая получать более быстрое решение по сравнению с известными итерационными методами расчета.

Расчетным путем произведено детальное исследование влияния параметров нагружения и свойств материала на кинетику деформаций образца при термоусталостных испытаниях.

Дана новая интерпретация результатов термоусталостных испытаний с выдержками (с учетом увеличения размаха неупругой деформации за цикл в наиболее нагретой части образца).

Разработана методика обработки результатов термоусталостных испытаний образцов установки типа Коффина для получения зависимости числа циклов до разрушения от параметров циклического деформирования материала в зоне трещины. Методика проверена сопоставлением результатов расчета с данными специально проведенных испытаний.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Получены модели широко применяемых в современных энергетических установках сталей Х18Н9, Х16Н13М3, IX2М, которые могут быть использованы для расчетов неупругого неизотермического деформирования элементов конструкций при повторно-переменных нагрузениях с выдержками.

Разработана методика получения параметров структурной модели для отражения деформационных свойств циклически упрочняющихся материалов. Методика использует данные обычных испытаний моделируемого сплава и доступна для применения в инженерной практике.

Разработан метод расчета неупругого деформирования элементов конструкций на основе организации итерационного процесса по признаку пластического течения, который может использоваться при решении различных краевых задач неупругого деформирования (в случае пропорционального нагружения).

Разработана методика обработки результатов термоусталостных испытаний, позволяющая обстоятельно изучать процесс неизотермического деформирования материала образца и существенно точнее, чем имеющиеся методики, определять параметры циклического нагружения материала, приводящие к разрушению. Методика доступна для применения в инженерной практике; она использует данные по деформационным свойствам моделируемого материала (полученные из обычных испытаний) и данные, характеризующие условия нагружения образца в установке (температурное поле в образце и жесткость установки).

Исследован характер деформирования образцов в условиях различных температурных режимов, испытаниях с выдержками в цикле, при разных жесткостях нагружения.

Методика обработки результатов термоусталостных испытаний и выводы работы могут найти применение в организации, занимающихся вопросами термической усталости.

Результаты работы (включая соответствующие ЭЦВ - программы) используются на заинтересованном предприятии при обосновании прочности элементов теплонапряженных конструкций.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные разделы работы докладывались на научном семинаре кафедры физики прочности МИФИ (Москва, 1972), на Всесоюзном симпозиуме по малоцикловой усталости при повышенных температурах (Челябинск, 1974), на Ленинградском объединении "Пролетарский завод" (Ленинград, 1976), на ХТУ научном совещании по тепловым напряжениям в элементах конструкций (Канев, 1977), на научно-технических конференциях ЧИИ (1972-1978).

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам выполненных исследований опубликованы 4 печатных работы.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и выводов, библиографического списка, включающего 122 наименований, приложения и содержит 172 стр. машинописного текста, в том числе 56 стр. иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ дан обзор существующих теорий, предназначенных для описания деформационных свойств конструкционных материалов при знакопеременном неупругом нагружении.

ГЛАВНОЙ ПРОБЛЕМОЙ при описании деформационных свойств в условиях знакопеременного неупругого деформирования является отражение деформационного упрочнения материала и взаимного влияния процессов быстрого (пластичность) и длительного (ползучесть) неупругого деформирования. Необходимость описания таких эффектов вызывает в последнее время развитие теорий: а) использующих разделение действующего напряжения σ на активное α и дополнительное ρ и б) основанных на математических моделях среды, отражающих ее микронеоднородность.

Деформационное упрочнение может быть разделено на изотропное и трансляционное упрочнение. Изотропное упрочнение (наиболее заметно проявляющееся в начальной стадии пластического деформирования) представляет собой необратимое увеличение области упругой работы материала. Для его описания используется некоторый увеличивающийся в процессе неупругого деформирования множитель (Н.Н.Афанасьев, И.А. Биргер, Д.А.Гаврилов, А.П.Горячев, А.П.Гусенков, В.С.Зарубин, Ю.И. Кадашевич, Ю.Г.Коротких, М.А.Кузьмин, В.В.Новожилов, А.Н.Романов, Ю.Д.Софронов, Н.И.Черняк, Бесселинг, Прагер, Толпер, Уайтман, Янсейл и другие). Трансляционное упрочнение представляет собой смещение упругой области работы материала. Математическое описание трансляционного упрочнения (из-за сложности поведения при различных программах повторно-переменного нагружения) встречает наибольшие трудности. В теориях с дополнительными напряжениями трансляционное упрочнение характеризуется величиной ρ . Обычно в этих теориях величина ρ связывается с пластической деформацией ρ . Линейное трансляционное упрочнение описывается при использовании простейшей связи $\rho = K\rho$, где $K = const$ (А.Ю.Ишлинский, В.Прагер). Более

общий закон упрочнения предложен Ю.И.Кадашевичем и В.В.Новожиловым $\rho = f(\rho)$; однако при таком подходе знаки кривизны диаграмм начального и знакопеременного нагружения оказываются одинаковыми. Соотношение, предложенное Р.А.Арутюняном и А.А.Вакуленко $d\rho = f(\sigma^2)d\rho$ позволяет описывать диаграммы деформирования при симметричном циклическом нагружении, однако при несимметричном "мягком" (заданном программой изменения напряжений) нагружении диаграмма с каждым циклом "вышагивает" на постоянную величину, что не соответствует экспериментам. В подходах, предложенных Г.М.Хажинским $d\rho = f[(\sigma - K\rho)^2]d\rho$ Б.Ф.Шорром $\frac{d\rho}{d\rho} = K + \beta\{\rho' - [\text{sign}(\sigma - \rho)](\rho - K\rho)\}$, (β, K, ρ' - положительные константы), Дафалиасом и Поповым $d\rho = g d\rho$; $g = g(\bar{\rho}, \bar{\rho}^*)$; $\bar{\rho} = \rho - K\rho$ (значение $\bar{\rho}^*$ соответствует величине $\bar{\rho}$ для момента начала пластического деформирования) при произвольном циклическом нагружении описывается асимптотическая стабилизация диаграммы деформирования. К недостаткам этих теорий следует отнести независимость стабильной петли пластического гистерезиса от предыстории нагружения.

Представления о дополнительном напряжении позволили И.З.Палев, Н.Н.Малинину и Г.М.Хажинскому предложить теории, учитывающие эффект анизотропного упрочнения при ползучести.

Таким образом, концепция разделения напряжения на активное и дополнительное оказывается удачной при описании независимо развивающихся склерономных и реономных свойств материала. Попытки связать дополнительное напряжение одновременно с мгновенным и вязким пластическим деформированием (Н.Н.Малинин и Г.М.Хажинский, А.Г.Угодчиков и Ю.Г.Коротких) приводят к существенному усложнению теорий, более трудным и неясным становится вопрос об определении функций и параметров математической модели по данным испытаний конкретного материала, что препятствует использованию этих теорий в инженерных расчетах.

Среди моделей, отражающих неоднородность реального поликристаллического материала можно выделить физические и структурные модели, отличающиеся разной степенью привлечения физических представлений о структуре конструкционных материалов. В физических моделях материал рассматривается в виде совокупности хаотически ориентированных кристаллов, погруженных в межзеренное вещество. Неупругое деформирование кристаллов происходит по заданным системам скольжения в зависимости от соответствующего касательного напряжения. Кроме этого, задаются правила взаимодействия кристаллов - зерен с межзеренным пространством. Макрохарактеристики определяются осреднением

соответствующих параметров всех зерен с учетом их ориентации. Физические модели в состоянии качественно отражать наиболее существенные особенности неупругого повторно-переменного нагружения. Например, учет ползучести позволил выявить и проанализировать взаимное влияние реономной и склерономной деформации. Однако сложность физических моделей не позволяет использовать такие модели в инженерной практике. Более простыми являются структурные модели, в соответствии с которыми элемент объема тела представляется совокупностью параллельно работающих подэлементов, обладающих отличающимися реологическими свойствами. Различные варианты структурной модели рассматриваются в работах Н.Н.Афанасьева, Д.А.Гохфельда, В.С.Зарубина, И.А.Иванова, А.Ю.Ишлинского, Ю.И.Кадашевича, К.М.Кононова, А.Г.Костюка, М.А.Кузьмина, М.Е.Мартыненко, С.Т.Мидейко, В.В.Новожилова, О.С.Садакова, Ю.Д.Софронова, Бесселинга, Мазинга, Уайтмана и других. Структурные модели позволяют отражать важные особенности изотермического и неізотермического повторно-переменного нагружения. В частности, структурной моделью с подэлементами, обладающими реономными свойствами, описываются наблюдаемые в экспериментах эффекты неустановившейся ползучести и взаимное влияние процессов быстрого неупругого нагружения и ползучести. При неізотермическом нагружении отражается влияние не только текущего значения температуры, но и истории ее изменения.

Большой цикл работ, проведенных на кафедре сопротивления материалов, динамики и прочности машин Челябинского политехнического института, позволяет выделить в качестве наиболее приемлемого для использования в инженерных расчетах вариант структурной модели, предложенный И.А.Ивановым и О.С.Садаковым. С одной стороны, эта модель обладает большими возможностями в отражении особенностей неупругого неізотермического повторно-переменного нагружения, с другой стороны, она оказывается удобной для практического применения: известна и не представляет принципиальных трудностей методика экспериментального определения параметров модели конкретного (циклически-стабильного) материала; разработан алгоритм решения краевой задачи, использующий уравнения модели.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ приводятся результаты испытаний на циклическое нагружение и ползучесть сталей X18H9, X16H1M3, IX2M. По этим данным (на основе структурной модели упруго-вязко-пластической среды) определяются параметры реологических свойств указанных материалов (для циклически стабильного состояния).

В соответствии с принятым простейшим вариантом структурной модели считается, что любой элемент объема среды работает как совокупность N подэлементов, имеющих одинаковые полные деформации ε_{ij}^k ; равные полной деформации элемента объема ε_{ij} , модули упругости G , K , коэффициент теплового расширения α и температуру T . Тензоры напряжений σ_{ij} и деформации ε_{ij} делятся на шаровые части и девიაторы: $\sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} + S_{ij}$, $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 \delta_{ij} + e_{ij}$, а девиадор деформации e_{ij} на упругую r_{ij} и пластическую p_{ij} части $e_{ij} = r_{ij} + p_{ij} = e_{ij}^k = r_{ij}^k + p_{ij}^k$. Упругая деформация связана с напряжением законом Гука. Неупругая деформация подэлемента складывается из реономной c_{ij}^k и склерономной b_{ij}^k частей $p_{ij}^k = c_{ij}^k + b_{ij}^k$. Скорости изменения реономной необратимой деформации подэлементов определяются единой зависимостью скорости ползучести от напряжений и температуры $\dot{c}_{ij}^k = \Phi(\sigma_n^k / z_k(T), T) s_{ij}^k / \sigma_n^k$, где $z_k(T)$ - параметры разброса свойств подэлементов; индекс "n" означает интенсивность соответствующего тензора, например, $\sigma_n = [\frac{1}{2} S_{ij} \cdot S_{ij}]^{1/2}$.

Склерономная часть необратимой деформации подэлемента определяется законом течения идеально-упруго-пластического материала, ассоциированным с поверхностью текучести Мизеса $db_{ij}^k = d\lambda^k s_{ij}^k$;

$$d\lambda^k = \begin{cases} \left\{ (de_{kl} - dc_{kl} - \frac{d}{dT}(r_t^k) dT \frac{s_{kl}^k}{\sigma_n^k}) s_{kl}^k \right\} (\sigma_n^k)^{-2}, & \text{при } \sigma_n^k = z_k(T) \sigma_{нв}(T) \\ 0, & \text{при } \sigma_n^k < z_k(T) \sigma_{нв}(T). \end{cases}$$

Здесь $\sigma_{нв}(T)$ - интенсивность предельного напряжения на диаграмме деформирования моделируемого материала; $r_t^k = z_k(T) \sigma_{нв}(T) / 2G(T)$ - значение интенсивности предельной упругой деформации подэлемента. Фигурная скобка означает функцию $\{y\} = \begin{cases} y & \text{при } y > 0 \\ 0 & \text{при } y < 0. \end{cases}$

Параметры состояния элемента объема σ_{ij} , r_{ij} , c_{ij} , b_{ij} находятся осреднением соответствующих величин по типу $\langle y^k \rangle = \sum_{k=1}^N y^k g_k$, где g_k - "веса" подэлементов ($\sum_{k=1}^N g_k = 1$).

При решении задачи представлений моделью свойств реального материала используется известная методика нахождения параметров структурной модели, заключающаяся в определении (помимо констант упругости материала) реологической функции Φ и параметров z_k , g_k . Реологическая функция Φ , совпадающая с зависимостью скорости установившейся ползучести моделируемого материала от напряжения и температуры, определяется из обычных испытаний на ползучесть. Параметры z_k , g_k определяются по кривой циклического

(или начального) деформирования материала при пропорциональном нагружении.

Учитывая цели настоящей работы (для сокращения длительности счета), можно получить уравнения структурной модели для случая одноосного напряженного состояния. Система уравнений структурной модели в этом случае будет иметь вид

$$\varepsilon = \alpha T + \rho + \rho = \varepsilon^k = \alpha T + \rho^k + \rho^k;$$

$$\rho = \langle \rho^k \rangle;$$

$$\sigma_n^k = \frac{E}{\sqrt{3}} \left[\frac{3}{2} \frac{(\rho - \rho^k)}{(1 - \mu)} + \rho \right];$$

$$\sigma = E \rho;$$

(I)

$$d\sigma^k = \frac{2}{\sqrt{3}} \phi(\sigma_n^k / z_k(T), T) dT,$$

$$d\sigma^k = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_n^k d\sigma_n^k \leq 0, & \text{или } \sigma_n^k = \sigma_T^k = \sigma_B \sqrt{3} z_k(T); \\ d(\varepsilon - \alpha T - \frac{1-2\mu}{3} \rho) - d\sigma^k - \frac{d}{dT}(\rho^k) dT; \end{cases}$$

Структурные модели сталей X18H9, X16H11M3, IX2M были получены по результатам испытаний образцов на установке, созданной на кафедре сопротивления материалов ЧПИ. Установка позволяет производить знакопеременное кручение трубчатых образцов и выдержки при постоянном напряжении или деформации. Испытания образцов проводились при "жестком" (с постоянной амплитудой деформации) симметричном циклическом нагружении с постоянной скоростью деформирования $\dot{\delta} = 10\%/мин$ ($\dot{\varepsilon}_n = 5\%/мин$). Каждое испытание при определенной температуре начиналось с циклического нагружения до стабилизации деформационных свойств материала образца; после этого записывалась замкнутая петля диаграммы деформирования и проводились испытания на ползучесть (для 3+5 выбранных значений напряжения). Амплитуды деформаций и температуры испытаний были:

Сталь X18H9:

$$\delta_a = \pm 1,5\%; \quad T = 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700^\circ\text{C}.$$

Сталь X16H11M3:

$$\delta_a = \pm 2,0\%; \quad T = 20, 450, 600, 650, 700, 800, 900^\circ\text{C}.$$

Сталь IX2M:

$$\delta_a = \pm 2,0\%; \quad T = 20, 450, 500, 600^\circ\text{C}.$$

Испытания на ползучесть указанных материалов проводились при температурах 600, 650, 700°C.

По этим результатам для циклически стабильного состояния были определены параметры структурных моделей сталей X18H9, X16H11M3 и IX2M, пригодные для расчетов неизотермического нагружения в соответствующих диапазонах температур.

По кривым начального нагружения при различных температурах, представленными кафедрой физики прочности МИФИ, были определены также параметры структурной модели стали IX2M в исходном (недеформированном) состоянии для температур 20+600°C.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассматривается структурная модель, отражающая изотропное упрочнение материала. Многие конструкционные материалы обладают заметным изотропным упрочнением. Так, при "жестком" циклическом нагружении образцов из меди, алюминиевых сплавов, некоторых марок стали амплитуда напряжений может возрастать с увеличением числа циклов в 3-7 раз. Понятно, что в некоторых случаях учет изотропного (циклического) упрочнения уточнит расчетные величины и напряжений и пластических деформаций.

Для отражения изотропного упрочнения в структурных моделях вводится зависимость предела текучести подэлемента от некоторых параметров его истории деформирования. Подэлементы считают упрочняющимися изотропно (Н.Н.Афанасьев, Бесселинг, Ю.Д.Софронов, И.А.Иванов и О.С.Садаков) и анизотропно (В.С.Зарубин и М.А.Кузьмин, Н.И.Черняк и Д.А.Гаврилов, Ю.И.Кадашевич и В.В.Новожилов). Поскольку анизотропное упрочнение отражается всей системой подэлементов в целом, целесообразнее, повидимому, использовать более простой вариант модели с изотропным упрочнением подэлементов.

При экспериментальном изучении диаграмм циклического деформирования параметрами предистории, определяющими изотропное упрочнение материала, принимают номер полуцикла (А.П.Гусенков, А.Н.Романов, Р.М.Шнейдерович) или номер полуцикла и амплитуду деформации (Янсейд, Топпер). В структурных моделях предел текучести подэлемента связывают с номером полуцикла (Уайтман) или с параметром Одвишта подэлемента $\lambda_k = \int_0^t |dp^k/dt| dt$ (Н.Н.Афанасьев, В.С.Зарубин, И.А.Иванов, О.С.Садаков, Ю.Д.Софронов, Бесселинг и др.). Последний вариант может быть выражен, например, в виде

$$\sigma_T^k = \sigma_{T0}^k + \varphi_k(\lambda_k),$$

(2)

где σ_{T0}^k - начальный предел текучести подэлемента.

тальное определение функций φ_k связано с известными трудностями: требуется по кривым деформирования, представляющим собой результат совместной работы системы подэлементов (каждый из которых имеет свое значение параметра λ_k) оценить работу каждого подэлемента в отдельности. Поэтому в большинстве случаев (Н.Н.Афанасьев, Бесселинг, Д.Д.Софонов, Ю.И.Кадашев и В.В.Новожилов) зависимость упрочнения от λ_k принимается линейной и одинаковой для всех подэлементов. Другой вариант конкретизации функций φ_k предложен в работе И.А.Иванова и О.С.Садакова, где предполагается, что функции упрочнения всех подэлементов подобны $\varphi_k = \sigma_{T0}^k \cdot f(2G\lambda_k/\sigma_{T0}^k)$.

Однако существует возможность, не задаваясь конкретным видом функций φ_k , определять их из эксперимента. Рассмотрим поведение структурной модели при циклическом "жестком" нагружении в пределах $\epsilon_1 \leq \epsilon \leq \epsilon_2$ (рис.1). При увеличении деформации от величины ϵ_1 до ϵ подэлементы, для которых $2G\sigma_T^k/2\alpha > \epsilon - \epsilon_1$, остаются упругими; остальные деформируются пластически, причем наклон диаграмм деформирования последних определяется законом упрочнения (2)

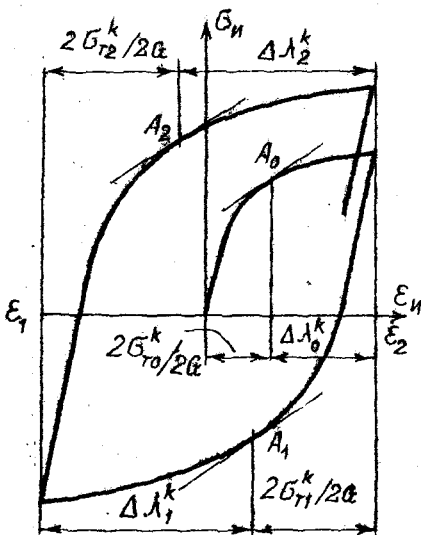


Рис. 1

$$\frac{d\sigma^k}{d\epsilon} = \left[\frac{1}{2\alpha} + \left(\frac{d\sigma_T^k}{d\lambda_k} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (3)$$

Используя функцию $P(\sigma_T^k)$ интегрального распределения значений σ_T^k ($P(\alpha)$ есть относительное число подэлементов, для которых $\sigma_T^k \leq \alpha$), получим наклон диаграммы деформирования системы подэлементов

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \left\langle \frac{d\sigma^k}{d\epsilon} \right\rangle = \int_0^1 \frac{d\sigma^k}{d\epsilon} dP =$$

$$= 2G \left[1 - \frac{1}{\varphi'/2G + 1} P\left(2G \frac{\epsilon - \epsilon_1}{2} \right) \right] \quad (4)$$

где φ' - некоторое среднее значение среди величин $\frac{d\varphi_k}{d\lambda_k}$

для подэлементов, вошедших в пластическое течение. Если пренебречь изменением $\varphi'/2G$ от цикла к циклу (неизбежным, если функции φ_k

нелинейны, но весьма малым, так как обычно малы сами значения $\varphi_k/2\sigma$ (поскольку $\varphi_k \ll 2\sigma$), точки с одинаковыми наклонами на диаграммах деформирования для различных полуциклов соответствуют моментам, когда равны значения $P(2\sigma | \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{2})$ ($i = 1$ при деформировании от ε_1 к ε_2 ; в противоположном полуцикле $i = 2$). Это означает, что в моменты, отмеченные на рис. I точками A_0, A_1, A_2 в пластическое течение вошло одинаковое число подэлементов, т.е. в эти моменты достигает предела текучести один и тот же подэлемент; величина $2\sigma(\frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{2})$ соответствует удвоенному пределу текучести данного подэлемента. С другой стороны, величина $|\varepsilon_{3-i} - \varepsilon|$ есть увеличение параметра Одквиста в этом подэлементе за данный полуцикл (если пренебречь упрочнением подэлемента за время неупруго деформирования в текущем полуцикле). Таким образом, по экспериментально полученным диаграммам циклического деформирования можно находить точки на плоскости $\sigma_T^k \sim \lambda_k$ для различных подэлементов (большой наклон соответствует "слабым", меньший - "сильным" подэлементам) и тем самым экспериментально строить зависимость (2).

В соответствии с изложенной методикой были определены функции упрочнения подэлементов (выражение (2) для стали IX2M при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ и стали X18N9 при $T = 20, 100, 200, 300, 400^\circ\text{C}$. Использовались результаты испытаний тонкостенных трубчатых образцов в условиях симметричного циклического кручения. Испытания проводились на установке, созданной на кафедре сопротивления материалов ЧПИ; на двухкоординатном приборе ПДС-02I записывались диаграммы циклического деформирования до стабилизации петли пластического гистерезиса.

Результаты обработки показывают, что функции φ_k нелинейны, скорость упрочнения "слабых" подэлементов вначале выше, чем "сильных", хотя относительное увеличение пределов текучести подэлементов (к моменту стабилизации петли гистерезиса) примерно одинаково. Это позволяет (при $T = \text{const}$) ввести единую для всех подэлементов функцию ξ с аргументом $x_k = \lambda_k 2\sigma / \sigma_{To}^k$

$$\frac{\varphi_k(\lambda_k)}{\sigma_{To}^k} = \xi(x_k); \quad (5)$$

при этом экспериментальные точки для различных подэлементов ложатся достаточно близко к одной кривой (отклонения не превышают 15%). Более того, после обработки диаграмм деформирования, полученных с различными амплитудами деформации, графики $\sigma_T^k / \sigma_{To}^k \sim x_k$ для различных подэлементов оказываются близкими к одной кривой. Для

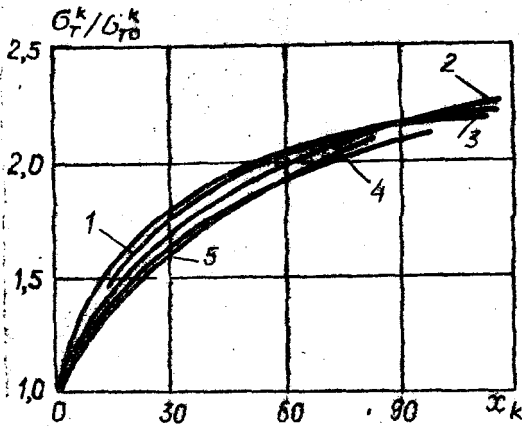


Рис. 2

расхождения для одинаковых амплитуд. Аналогичные данные получены и при обработке результатов испытаний образцов из стали X18H9 для температур 20-400°C.

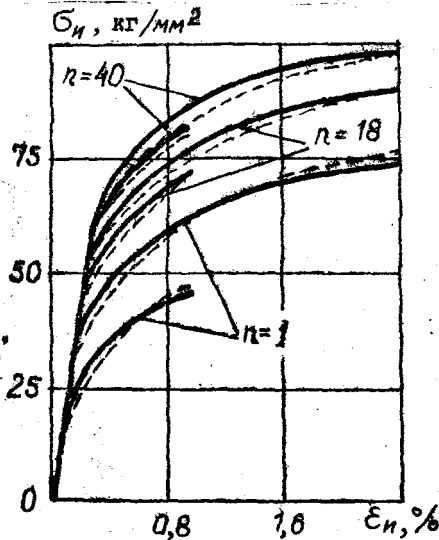


Рис. 3

примера на рис.2 представлены результаты обработки испытаний пяти образцов из стали IX2M при амплитудах деформации $\epsilon_a = \pm 1,25\%$ (образцы 1, 2), $\pm 0,75\%$ (образец 3), $\pm 0,5\%$ (образцы 4, 5). Графики отмечены номерами образцов; отличие кривых $\sigma_T^k / \sigma_{T0}^k \sim x_k$, полученных для различных амплитуд деформации, не превышает естественного

Таким образом, структурная модель, отражающая циклическое упрочнение, однозначно определяется двумя функциями: а) кривой начального деформирования и б) функцией упрочнения подэлементов $\xi(x_k)$. В модели с конечным числом подэлементов, удобной для практического использования, первая функция отражается с помощью наборов значений z_k и g_k (аналогично модели циклически-стабильной среды); техника получения функции ξ показана выше.

На основании такой модели были произведены расчеты (на

ЭЦВМ М-222) диаграмм циклического деформирования. Сопоставление расчетных и экспериментальных диаграмм деформирования для разных полуциклов (n) и амплитуд деформаций (на рис.3 экспериментальные кривые показаны сплошными линиями, расчетные - штриховыми; диаграммы построены от начала разгрузки) показывает вполне удовлетворительную адекватность модели поведению реального материала. Из этого же рисунка видно, что кривые для одинакового номера полуцикла, взятые из испытаний с отличающимися амплитудами, различны. Таким образом, выбор номера полуцикла в качестве аргумента для функции упрочнения приводит к существенно большей ошибке.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена разработке метода расчета кинетики неупругого деформирования образца установкой типа Коффина. На основе расчетов показаны основные закономерности развития неупругой деформации в образце; произведен анализ влияния параметров нагружения образца на кинетику деформаций.

Для определения истории изменения напряжений и деформаций в образце в течение последовательных циклов нагружения выделяется ряд (достаточно близких) последовательных моментов времени и расчет заключается в определении состояния образца в эти моменты. Решение задачи о кинетике неупругого деформирования можно разделить на три независимых, рассматриваемых последовательно части.

1. Расчет "мгновенного" состояния конструкции по заданному внешнему воздействию и известному полю начальных деформаций в данный момент времени - получение "упругого" решения. Используются уравнения равновесия, совместности и, в качестве физических - уравнения термоупругости (с заданными начальными деформациями). Реологическая модель среды в "упругом" решении не участвует.

2. Определение приращений неупругой деформации в отдельно взятом элементарном объеме, удовлетворяющих физическим уравнениям - "локальная неупругая" задача. Под решением "локальной неупругой" задачи понимается следующее:

по известным значениям σ_1 , ϵ_1 , T_1 , ρ_1 для некоторого элементарного объема материала в момент времени t_1 и заданным значениям ϵ_2 , T_2 для момента $t_2 = t_1 + \Delta t$ определяется прирост неупругой деформации Δp в данном элементарном объеме за интервал времени Δt .

3. Синтез "упругой" и "локально неупругой" задач с целью получения алгоритма расчета кинетики - "неупругое" решение. "Неупругая" задача может быть решена методом переменных параметров упругости, методом дополнительных нагрузок, деформаций, безытерационными методами

При решении "упругой" задачи образец установки рассматривается как прямой брус, закрепленный в податливых опорах и подверженный воздействию температуры, переменной во времени и по длине. Из условия равновесия следует постоянство напряжений по длине образца. "Упругое" решение получается из условия, что общее удлинение образца (тепловое в сумме с силовым) связано с его нормальной силой коэффициентом, характеризующем податливость (жесткость) опоры (установки).

Решение "локальной неупругой" задачи осуществляется для ряда сечений образца x_i , в каждом из которых элементарный объем материала представляется набором N подэлементов, имеющих одинаковую деформацию $\varepsilon(x_i)$ и температуру $T(x_i)$. Прирост неупругой деформации k -го подэлемента за интервал времени Δt определяется как сумма приростов склерономной $\Delta b_k(x_i)$ и реономной $\Delta c_k(x_i)$ деформации. Прирост реономной составляющей неупругой деформации вычисляется однозначно по известному напряженно-деформированному состоянию образца в начале временного интервала в предположении постоянства скорости ползучести в течение данного интервала. Вычисление приростов склерономной неупругой деформации в подэлементах за интервал времени производится методом последовательных приближений. Вводится параметр κ , являющийся признаком пластического течения k -го подэлемента в i -м сечении

$$\kappa_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{при } \Delta b_k(x_i) > 0; \quad \sigma_n^k = \sigma_T^k [T(x_i)]; \\ 0 & \text{при } \Delta b_k(x_i) = 0; \quad |\sigma_n^k| < \sigma_T^k [T(x_i)]; \\ -1 & \text{при } \Delta b_k(x_i) < 0; \quad \sigma_n^k = -\sigma_T^k [T(x_i)]. \end{cases} \quad (6)$$

Условие (6) позволяет решить системы "упругой" и "локально неупругих" задач относительно $\Delta b_k(x_i)$ (коэффициенты этого решения зависят от величин κ_{ik}). Таким образом, если "признаки" известны, из выражения (6) для каждого подэлемента находятся либо $\Delta b_k(x_i)$ (если $\kappa = 0$), либо σ_n^k (если $|\kappa_{ik}| = 1$). Требуется лишь организовать итерационный процесс по определению значений κ_{ik} . Ввиду того, что числа κ_{ik} могут быть только ± 1 или 0, этот процесс итераций быстро сходится к точному решению.

По вычисленным величинам $\Delta c_k(x_i)$, $\Delta b_k(x_i)$ находятся значения пластической деформации в конце интервала (и, следовательно, в начале следующего); их осреднение по N подэлементам дает $\rho(x_i)$, что позволяет найти (из "упругого" решения) напряжение в образце σ и напряжения в подэлементах $\sigma_k(x_i)$, необходимые для расчета следующего интервала.

Изложенным способом, шагами по времени, производится расчет кинетики деформирования образца в течение необходимого числа циклов теплосмен.

Данный метод расчета реализован в программе, составленной для ЭЦВМ "М-222". Расчетным путем исследована кинетика неупругого деформирования образцов из материалов Х18Н9, Х16Н13М3, ХХ2М при различных программах нагружения. Сопоставлением двух вариантов расчета (в одном варианте скорость ползучести принималась равной нулю во всем диапазоне температур и напряжений) показано влияние ползучести, приводящей к большей локализации неупругой деформации в наиболее нагретой части образца. При этом обнаруживается не только знакопеременное пластическое деформирование, но и накопление односторонней неупругой деформации от цикла к циклу: сжимающей в центре и растягивающей на краях образца. Такое одностороннее поцикловое накопление пластической деформации приводит к необратимому формированию образца, неоднократно отмечавшемуся в экспериментах.

Исследовано влияние максимальной температуры цикла, изменения тепловой деформации образца за цикл (значение которой связано с разностью экстремальных температур цикла), жесткости установки. Показано, что повышение максимальной температуры, тепловой деформации образца за цикл, жесткости установки приводит к большей концентрации и увеличению абсолютных значений размаха неупругой деформации за цикл. Важно, что при этом отношение максимального размаха деформации к осредненному (по длине образца) значению существенно изменяется.

Расчетами показано, что для режимов испытаний с выдержками при максимальной температуре происходит перераспределение пластической деформации по длине образца за время выдержки, приводящее к увеличению размаха неупругой деформации за цикл в наиболее нагретой части образца. (Обычно увеличение размаха деформации за цикл в этих условиях считают существенно меньшим, связывая его лишь с релаксацией напряжения в образце за время выдержки). Если оценивать число циклов до разрушения N_p на основе формулы Коффина $\Delta \rho^2 N_p = \delta_c(t)$ ($\delta_c(t)$ - остаточная деформация при статическом разрыве в соответствующих температурных условиях), учитывая фактические размахи неупругой деформации за цикл $\Delta \rho$, то можно получить соотношение $\frac{N_p}{N_{p0}} = \left(\frac{\Delta \rho_0}{\Delta \rho}\right)^2 \left(\frac{\delta_c(t)}{\delta_{c0}}\right)$, где сопоставлены параметры двух циклов, отличающихся лишь тем, что в одном из них выдержка отсутствует (индекс "0"), а в другом имеется. Помимо изменения ширины петли

гистерезиса, здесь учтено снижение пластических свойств в связи с длительным воздействием напряжений при высокой температуре (соответствующие данные для стали Х16Н11М3 были взяты при растяжении).

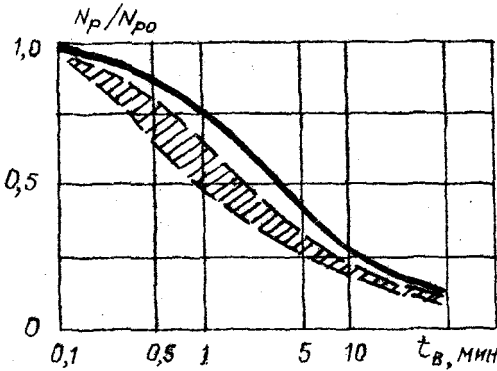


Рис. 4

Результаты укладываются в заштрихованную область. Расчетная и экспериментальная зависимость подобны, количественные расхождения невелики и, по-видимому, могут быть уменьшены при уточнении некоторых данных (в частности, при учете выравнивания температурного поля образца при выдержке, при использовании данных об охрупчивании при сжатии).

Для стали Х16Н11М3 показано, что в испытаниях с выдержками наибольшее накопление неупругой деформации (расширение петли пластического гистерезиса) происходит за первые 2-5 минут от момента начала выдержки, а при больших временах выдержки ($t_B > 30$ мин) дальнейшее увеличение t_B практически не приводит к росту размаха деформации за цикл. Этим может быть объяснено существование замеченных в испытаниях некоторых материалов "опасных" выдержек малой длительности ($t_B = 2+6$ мин), при которых долговечность материала образца (определяемая произведением $t_B N_p$) оказывается минимальной, а также отмеченная экспериментально практическая независимость числа циклов до разрушения от времени выдержки испытаний с выдержками большой длительности ($t_B > 30$ мин).

Рассмотрены особенности распределения по длине образца одностронне накопленной неупругой деформации при различных режимах нагружения.

Полученная для стали Х16Н11М3 расчетная кривая снижения числа циклов до разрушения N_p/N_{p0} от времени выдержки t_B показана на рис.4 сплошной линией. Она сопоставляется с результатами испытаний образцов из аустенитных сталей на длительную термическую усталость. Опытные ре-

Проведены расчеты, иллюстрирующие влияние температуры закрепления образца в установке на кинетику деформирования.

Выполнены расчеты с использованием структурной модели циклически упрочняющегося материала. Показано (сталь X18H9, режим $500 \rightleftharpoons 100^{\circ}\text{C}$), что изотропное упрочнение снижает (при увеличении числа циклов) эффект локализации деформации, приводит к нестационарности процесса деформирования образца, затухающей по числу циклов нагружений и к последующей стабилизации.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ на основе выполненного анализа кинетики деформаций образца устанавливается методика обработки результатов термоусталостных испытаний с целью получения зависимости числа циклов до разрушения от параметров циклического деформирования материала образца (знакопеременной и односторонне накопленной неупругой деформации за цикл) в зоне появления трещины.

Определение параметров циклического деформирования производится на основе расчета кинетики неупругого деформирования в образце. Расчет ряда циклов нагружения до стабилизации выполняется на ЭЦЕМ по имеющейся программе. Исходными данными для расчета являются: а) характеристики деформационных свойств материала образца; б) данные, характеризующие условия нагружения образца в установке (распределение температуры по длине образца и по времени цикла, коэффициенты жесткости установки).

Методика расчета проверена сопоставлением вычисленных значений деформаций, напряжений с соответствующими результатами специально поставленных экспериментов. Экспериментальные замеры, осуществляемые в рамках программы совместных научно-исследовательских работ, проводились в г. Горьком (сталь X18H9, режим $600 \rightleftharpoons 100^{\circ}\text{C}$) и на кафедре физики прочности МИФИ, г. Москва (сталь X12M, режим $500 \rightleftharpoons 100^{\circ}\text{C}$). Результаты сопоставления замеров напряжения в образце и деформаций в определенных его сечениях с соответствующими расчетными значениями указывают на количественное их соответствие (наибольшая относительная погрешность в значениях деформаций не превышает 7%; напряжений - 15%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

I. В связи с неравномерностью распределения температуры и деформации по длине образца установки для испытания на термическую усталость по методу Л.Ф. Коффина определение действительных значений

параметров деформирования, определяющих долговечность материала в зоне трещины, возможно только на основе расчета кинетики деформаций в образце с самого начала нагружения.

2. На основании анализа существующих теорий, предназначенных для описания повторно-переменного неупругого неизотермического нагружения, наиболее приемлемым подходом для предсказания деформационных свойств, с точки зрения адекватности экспериментальным данным и доступности для практического применения, является структурная модель упруго-вязко-пластической среды. В данной работе для расчета кинетики деформаций образца установки типа Коффина за основу принят вариант структурной модели упруго-вязко-пластической среды, разработанный на кафедре сопротивления материалов ЧПИ.

3. Необходимые для проведения расчетов параметры реологических свойств материалов определены по результатам испытаний на циклическое нагружение и ползучесть трубчатых образцов из стали X16H1M3 для температур 20, 450, 650, 700, 800, 900°C; из стали X18H9 для температур 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700°C; из стали IX2M для температур 20, 450, 500, 600°C.

4. Для отражения изотропного упрочнения, проявляющегося в течение первых циклов и существенного для многих конструкционных материалов, выполнено соответствующее развитие структурной модели. Разработана программа испытаний и методика экспериментального определения параметров модели изотропно упрочняющегося склерономного материала. По этой методике определены параметры модели стали IX2M при температуре 450°C и стали X18H9 для температур 20, 100, 200, 300, 400, 500°C. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых циклического деформирования при различных амплитудах деформации показало их удовлетворительное соответствие (наибольшая относительная погрешность в значениях напряжений не превышает 10%).

5. Получила дальнейшее развитие методика решения краевой задачи с использованием структурной модели среды. В итерациях, определяющих прирост склерономной деформации за интервал времени, последующими приближениями уточняется не величина изменения пластической деформации, а информация о том, происходит ли изменение пластической деформации в данной точке и данном подэлементе. Применение итераций "по признаку" существенно ускоряет сходимость, причем решение получается более точным.

6. Составлена программа расчета кинетики деформирования образцов установки типа Коффина. Программа позволяет проследить изменение

напряжений и деформаций в различных сечениях по длине образца в течение циклов нагревов - охлаждений.

7. Выполнен расчетный анализ влияния условий нагружения на кинетику деформаций образцов из стали Х1ВН9, Х16Н1М3, ХХ2М. Получены следующие основные результаты:

а). При заданной неравномерности распределения температуры по длине образца увеличение максимальной температуры цикла и жесткости установки наиболее существенно повышают локализацию и величину знакопеременной деформации образца за цикл.

б). Показано, что в режимах испытаний с выдержками при максимальной температуре вследствие неравномерности распределения температуры по длине образца за счет ползучести происходит увеличение размаха неупругой деформации за цикл в наиболее нагретой части образца. Этим объясняется кажущееся противоречие между данными о существенном снижении долговечности материала при увеличении времени выдержки в испытаниях на термическую усталость и о практической независимости числа циклов до разрушения от времени выдержки в полцикле сжатия в условиях испытаний на малоцикловую усталость (жесткий цикл, соответствующий уровень температуры). Использование фактических размахов неупругой деформации за цикл с учетом ползучести позволяет применять формулу Коффина и для интерпретации результатов термоусталостных испытаний с выдержками.

в). При испытаниях с выдержками в цикле наибольшее накопление неупругой деформации (увеличение размаха пластической деформации за цикл) происходит за первые 2 - 6 минут от момента начала выдержки. Этим можно объяснить существование замеченных в испытаниях "опасных" выдержек, при которых ресурс материала (определяемый временем работы до разрушения) оказывается минимальным.

г). Заметное влияние на увеличение размаха неупругой деформации за цикл при испытаниях с выдержками оказывает жесткость установки: за одинаковое время выдержки для жесткой установки накопление пластической деформации оказывается меньшим, чем для податливой.

д). Расчеты показывают, что при термоусталостных испытаниях наряду с циклической деформацией возникает и односторонняя пластическая деформация, характер распределения которой по длине образца качественно соответствует наблюдаемому в экспериментах. Наличие односторонней пластической деформации приводит с числом циклов к необратимому формоизменению образца; результатом ее действия в определенных условиях может быть заметное снижение прочности (статическое повреждение), которое следует учитывать при оценке долговечности.

е). Влияние температуры, при которой происходит закрепление образца в установке, сказывается лишь на величине неупругой деформации, накопленной после первого цикла, но не влияет на размах пластической деформации за цикл и, следовательно, не должно влиять на число циклов до разрушения. Это соответствует известным экспериментальным данным.

ж). Циклическое (изотропное) упрочнение материала приводит к нестабильности процесса деформирования образца, затухающей по числу циклов нагружений. При этом происходит понижение эффекта концентрации деформации. В рассмотренном случае (сталь Х18Н9, режим $500 \pm 100^\circ\text{C}$) отношение максимального размаха деформации за цикл к соответствующему осредненному (по длине образца) значению для 2-го цикла составляет: 2, 1; для 30-го - 1, 6; для 65-го - 1, 3; для стабильного ($N_2 = 120$) - 1, 22.

8. На основании результатов проведенного расчетного анализа разработана методика обработки термоусталостных испытаний образцов установки типа Коффина с целью получения зависимости числа циклов до разрушения от параметров циклического деформирования материала в зоне трещины. Использование методики позволяет существенно точнее (по сравнению с ранее используемыми расчетными методами) определять параметры, входящие в уравнения, описывающие условия разрушения материала при знакопеременном неупругом неизотермическом нагружении.

9. Методика проверена сопоставлением результатов расчета с опубликованными экспериментальными данными. Отмечено их качественное соответствие. Экспериментальная проверка, проведенная по результатам специально проведенных для этой цели испытаний в г. Горьком и на кафедре физики прочности МИФИ (г. Москва) указывает и на количественное их соответствие (наибольшая относительная погрешность в значениях деформаций не превышает 7%; напряжений - 15%).

10. Предложенная методика дает возможность проводить объективное сопоставление и анализ экспериментальных данных, полученных на различных установках. В частности, ее применение сближает результаты исследований малоциклового и термической усталости.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. В.Э.Гохберг, Н.Е.Мартыненко, О.С.Садаков. Применение структурной модели упруго-вязко-пластической среды для расчета кинетики повторного неизотермического деформирования бруса. Сборник научных трудов № 151, Челябинск, 1974.

2. К.М.Кононов, Н.Е.Мартыненко, О.С.Садаков. Кинетика деформирования образца при испытаниях на термическую усталость с выдержками. Материалы всесоюзного симпозиума по малоцикловой усталости при повышенных температурах, Челябинск, 1974.

3. Д.А.Гохфельд, К.М.Кононов, Н.Е.Мартыненко, О.С.Садаков. Анализ распределения деформаций в образце при испытаниях на термическую усталость в условиях ползучести. Прочность материалов и конструкций. Киев, "Наукова думка", 1975.

4. Н.Е.Мартыненко, О.С.Садаков, Т.В.Хрулева. К описанию циклического упрочнения конструкционных материалов. Тезисы докладов XIУ научного совещания по тепловым напряжениям в элементах конструкций, Киев, "Наукова думка", 1977.

Техн.редактор Т.В.Симакова

ФБ 04247. Подписано к печати 18/IX-78 г. Формат бумаги 60x90
I/16. Объем 1,25 п.л., I уч.-изд.л. Тираж 100 экз. ЧПИ. За-
каз № 420/II67.