

539.37(024)
M131

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Мадудин Владимир Николаевич

Мадудин

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИКЛИЧЕСКИ
НЕСТАБИЛЬНОЙ РЕАНОМНОЙ СРЕДЫ ПРИМЕНЕЛЬНО
К ОЦЕНКЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТЕРМОНАПРЯЖЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ

Специальность 01.02.06 - "динамика, проч-
ность машин, приборов и аппаратуры"

Автореферт

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1980

ЧПИ

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Шевченко Ю.Н.,
кандидат физико-математических наук,
доцент Коротких Ю.Г.

Ведущая организация - Ленинградское объединение
"Пролетарский завод".

Задача состоится "14" января 1981 года
на заседании специализированного совета Д053.13.01
в Челябинском политехническом институте
(454044, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76).

Автореферат разослан "12" декабря 1980 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
канд. техн. наук, доцент

 / А.А.Кошев /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

30Х

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. В решениях XXV съезда КПСС по дальнейшему развитию научно-технического потенциала страны особое внимание уделяется повышению экономичности и эффективности современного производства. Решение этих задач применительно к энергетическому оборудованию, маневренным транспортным установкам и другим аппаратам, используемым в различных областях техники, связано с необходимостью интенсификации рабочих и технологических процессов. Основу для оценки долговечности конструкций, работающих при повторных тепловых и силовых воздействиях, составляет анализ неупругих деформаций. Такой анализ предполагает построение математической модели материала, адекватно отражающей реальные деформационные свойства, а также разработку методов и алгоритмов решения краевых задач.

Большинство известных теорий неупругого деформирования конструкционных сталей и сплавов предназначено для описания свойств циклически стабильных материалов и не отражает частично обратимого изотропного упрочнения. Учет последнего позволяет более точно оценивать долговечность элементов конструкций. В связи с этим актуальной задачей является разработка такого варианта математической модели среды, который наряду с известными эффектами деформационной анизотропии описывал бы изотропное изменение свойств реальных материалов. Такая модель должна базироваться на экспериментальном исследовании особенностей изотропного упрочнения при повторно-переменном неупругом деформировании материалов в условиях повышенных температур. Использование более сложной модели в расчетах кинетики деформирования конструкций требует дальнейшего развития методики решения краевой упругопластической задачи.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ состоит в разработке структурной (математической) модели циклически нестабильной реальной среды, позволяющей наряду с нелинейностью трансляционного упрочнения, эффектом Баушингера, дискретной памятью о предистории нагружения и другими проявлениями деформационной анизотропии описать частично обратимое изотропное изменение свойств среды. В диссертации рассмотрены следующие задачи:

– экспериментальное исследование закономерностей изотропного изменения деформационных свойств конструкционных материалов при циклическом неупругом деформировании;

- качественный анализ уравнений, решение задачи идентификации (определение параметров модели по данным испытаний конкретного материала), оценка адекватности модели;

- использование разработанной модели среды для расчета кинетики деформирования конструкций (исследование кинетики деформирования в зоне разрушения образцов с целью более адекватного переноса данных термоусталостных испытаний на конструкцию; изучение - на примере тонкостенной цилиндрической оболочки - процесса стабилизации полей остаточных напряжений и скоростей неупругих деформаций, а также методов экстраполяции результатов расчета кинетики деформирования на весь срок службы конструкций).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ. Опытное изучение деформационных свойств ряда конструкционных сталей и сплавов при циклическом неупругом деформировании выполнено на специальных установках в условиях растяжения-сжатия и циклического кручения с использованием современной автоматической контролирующей и регистрирующей аппаратуры. Качественный анализ возможности использования предлагаемой модели для описания деформационных свойств материалов основан на аналитическом и численном исследовании ее поведения при повторно-переменном неупругом нагружении. Для решения задачи идентификации модели использован один из наиболее эффективных методов нелинейного программирования - метод деформируемого многогранника. Решение задачи идентификации модели, расчет кривых циклического деформирования и ползучести, применение модели для исследования кинетики деформирования элементов конструкций выполнено с использованием ЭВМ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Получены экспериментальные данные, позволяющие расширить и уточнить представления об особенностях повторно-переменного неупругого деформирования циклически нестабильных конструкционных сталей и сплавов в условиях повышенных температур.

Разработана структурная (математическая) модель циклически нестабильной реономной среды, позволяющая отразить частично обратимое изотропное упрочнение материала, наряду с проявлениями деформационной анизотропии.

Разработан достаточно общий алгоритм автоматизированного (с использованием ЭВМ) определения параметров реологических моделей среды, базирующейся на методах нелинейного программирования.

Разработана методика расчетного определения размахов и приращений неупругой деформации в зоне разрушения образцов цилиндри-

ческой и корсетной формы в процессе термоусталостных испытаний с учетом реального температурного поля и податливости установки.

Исследована возможность прогнозирования (экстраполяции) результатов расчета кинетики деформирования на весь срок службы конструкции. Показано, что для исключения существенных ошибок при оценке долговечности конструкций экстраполяция должна быть ограничена (по числу циклов) увеличением базы расчета в 10–20 раз.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Разработанные в диссертации алгоритмы реализованы в виде вычислительных программ, ориентированных на работу в среде ДОС ЕС ЭВМ. Они могут быть использованы для имитации испытаний конструкционных материалов при повторно–переменном неупругом деформировании, для определения параметров реологических моделей среды, для расчета односторонней и знакопеременной неупругой деформации в образцах при термоусталостных испытаниях, для оценки параметров, характеризующих долговечность прямолинейных участков трубопроводов, парогенераторов, теплообменников и т.п.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты проведенного исследования внедрены на заинтересованных предприятиях г.Горького и г.Ленинграда, а также использованы в Методических Указаниях "Испытания на термическую усталость", разрабатываемых в соответствии с Программой Госстандата СССР, и при разработке одного из разделов Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭС.

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

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы, включающего 137 наименований, и Приложений; она изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков, 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении показана актуальность рассматриваемой проблемы, определена цель работы и дана краткая аннотация всех разделов диссертации.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ диссертации "Основные закономерности неупругого деформирования конструкционных материалов и методы их описания" выполнен обзор экспериментальных и теоретических исследований деформационных свойств сталей и сплавов при повторно-переменном неупругом деформировании в условиях повышенных температур.

Экспериментальные исследования свойств конструкционных материалов, проведенные А.С.Баргялисом, А.П.Гусенковым, В.В.Заса-ринным, В.С.Зарубиным, К.М.Кононовым, М.А.Кузьминым, В.С.Ленским, М.Е.Мартыненко, Н.А.Махутовым, Г.Г.Медекшей, В.В.Москвитиным, С.В.Серенсеном, Ю.Н.Шевченко, Р.М.Шнейдеровичем, Т.Endo , Н.Р. Jhansale'ом, E.Krempel'ом, R.W.Landgraf'ом, J.D.Morrow и др., обнаруживают целый ряд проявлений деформационной анизотропии (эффект Баушингера, появление участков неустановившейся ползучести при изменении напряжений или температуры, взаимное влияние "мгновенных" и длительных неупругих деформаций), специфических эффектов неизотермического и непропорционального нагружения. Для большинства конструкционных материалов перечисленные эффекты трансляционного упрочнения дополняются изотропным изменением свойств цикла от цикла. В известной литературе, однако, закономерности изотропного упрочнения изучены недостаточно, особенно в условиях переходных режимов, связанных с изменением температуры, размака цикла по деформации или напряжению, скорости нагружения, с чередованием этапов быстрого деформирования и выдержек под нагрузкой.

Известные теории неупругого поведения материалов можно разбить на три группы. Исторически первыми начали развиваться деформационные и инкрементальные теории пластичности и ползучести, основанные на гипотезе однородной среды (исследования Р.А.Арутюнина, И.А.Биргера, А.А.Вакуленко, Д.Д.Ивлева, А.А.Ильиншина, А.Ю.Ишинского, Ю.Г.Коротких, Н.Н.Малинина, В.В.Москвитина, И.З.Паллея, Ю.Н.Работникова, А.Г.Угодчикова, Г.М.Хажинского, Ю.Н.Шевченко, Р.М.Шнейдеровича, Б.Ф.Шорра, Y.F.Dafalias'a, M.A.Eisenberg'a, W.T.Koiter'a, A.K.Miller'a, E.P.Popov'a, W.Frager'a, Y.F.Raschid'a и др.). Описание свойств реальных конструкционных материалов этими теориями ведется феноменологически, без привлечения представлений о внутренней структуре материала и механизме деформирования. Физические теории, напротив, опираются на анализ истинной микроскопической картины деформирования материала. Такой подход разрабатывается в работах Д.А.Гаврилова, В.С.Зарубина, А.Г.Костюка, А.А.Полякова, Н.И.Черняка и др. На конец, структурные модели сред-

ды основаны на формальном моделировании микронеоднородности и микронапряжений реального поликристаллического материала. Структурные модели исследовались в работах Н.Н.Афанасьева, Д.А.Гохфельда, В.С.Заубиона, И.А.Иванова, Ю.И.Кадашевича, И.А.Кузьмина, В.Ю.Мариньи, М.Е.Мартыненко, С.Т.Милейко, В.В.Новошилова, В.А.Пальмова, О.С.Садакова, R.J.Asaro, J.F.Besseling'а, K.Ionie, H.R.Jhansale'а, E.Kempl'а, K.Nakagaw'а, M.Fujiyam'а и др.

Анализ опубликованных исследований показывает, что основные затруднения при построении теорий неупругого деформирования материалов связаны с описанием трансляционного упрочнения. В настоящее время наиболее приемлемыми (с точки зрения адекватности поведению моделируемого материала и доступности для инженерных расчетов) являются теории пластического течения с дополнительными напряжениями и структурные модели среды. Последние представляются более удобными в приложениях – как при решении задачи идентификации модели (определения параметров модели по данным испытаний конкретного материала), так и при расчете кинетики напряженно-деформированного состояния элементов конструкций. В настоящее время, повидимому, наибольшей простотой и экспериментальной обоснованностью отличается вариант структурной модели упруговязкопластической среды, разрабатываемый на кафедре сопротивления материалов Челябинского политехнического института. Как показали исследования, он характеризуется не только качественным, но и хорошим количественным соответствием предсказываемых моделью и наблюдаемых в эксперименте свойств циклически стабильных (стабилизирующихся) материалов при различных программах пропорционального и непропорционального неизотермического нагружения, включая условия чередования "мгновенных" пластических деформаций и ползучести. Однако известным недостатком является то, что модель предназначена для отражения поведения материалов только в условиях стабилизации циклических свойств последних.

На основании проведенного в первой главе анализа сформулированы следующие основные задачи:

1. Экспериментальное исследование особенностей поведения циклически нестабильных материалов при повторно-переменном неупругом деформировании в условиях повышенных температур.

2. Разработка математической модели для описания изотропного изменения свойств конструкционных сталей и сплавов в процессе их циклического неупругого деформирования.

3. Дальнейшее развитие методики расчета кинетики деформирования конструкций, связанное, в частности, с использованием структурной модели циклически нестабильной реономной среды.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ "Экспериментальное исследование особенностей поведения циклически нестабильных материалов при повторно-переменном нагружении" приведены результаты опытного изучения деформационных характеристик ряда сталей и сплавов. Испытания проводились на специализированных установках в условиях циклического кручения (при скоростях изменения угловой деформации 0,12, 1,2 и 12 %/мин) и растяжения-сжатия (при скоростях осевой деформации 0,1, 1 и 10 %/мин) в диапазонах рабочих температур: для стали 20 - 20, 100, 200 и 300°C; для Х18Н9, Х16Н13МЗ, ЭИ-417 - 20, 400, 500, 600 и 700°C. Регистрировались кривые циклического деформирования и кривые ползучести, для представления результатов использовались параметры σ и ε (при кручении $\sigma = \tau$, $\varepsilon = \delta/2$, где τ - касательное напряжение, δ - угловая деформация; при растяжении-сжатии $\sigma = \sigma_{xx}/\sqrt{3}$, $\varepsilon = \frac{1-2\nu}{E}\sigma - \sqrt{3}\varepsilon_{yy}$, где σ_{xx} - осевое напряжение, ε_{yy} - поперечная деформация, E - модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона).

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что изотропное упрочнение материала может приводить к увеличению амплитуды напряжений в жестком цикле в два и более раза (рис.1).

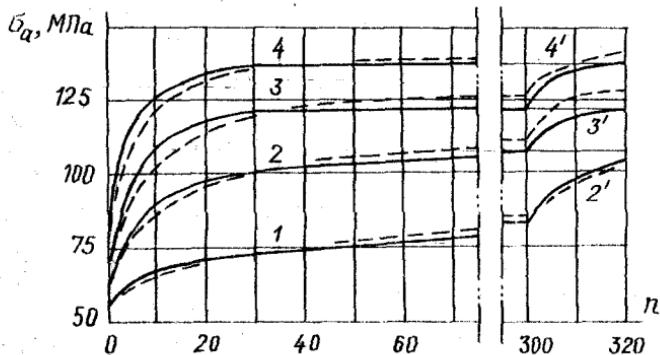


Рис.1. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) зависимости амплитуды напряжений σ_a от числа полуциклов нагружения n (Х18Н9, 650°C, $\dot{\varepsilon} = 6\%/\text{мин}$, 1 - $\varepsilon_a = 0,125\%$, 2 и 2' - $\varepsilon_a = 0,25\%$, 3 и 3' - $\varepsilon_a = 0,375\%$, 4 и 4' - $\varepsilon_a = 0,5\%$)

Стабилизация петель гистерезиса происходит тем быстрее, чем большим задан размах цикла по деформации. Кривые деформирования в опытах с различными амплитудами деформаций, как правило, не подтверждают известную гипотезу существования обобщенной диаграммы деформирования (рис.2). Форма стабильных диаграмм деформирования определяется параметрами цикла (амплитуда деформаций, температура, скорость нагружения) и не зависит от предшествовавшей истории деформирования. Изменение параметров цикла приводит к возникновению переходных режимов деформирования, наблюдается своеобразное запаздывание свойств материала (см.рис.1). Выдержки при нулевом напряжении приводят к частичному изотропному разупрочнению материала – происходит так называемый возврат исходных пластических свойств среды (рис.3,4). Деформационная анизотропия во время таких выдержек практически не изменяется (см.рис.3, диаграммы AB и AC). Утраченная часть изотропного упрочнения восстанавливается при возобновлении быстрого неупругого деформирования. Кроме взаимного влияния быстрого и вязкого неупругого деформирования, выражющегося, в частности, в ускорении первой фазы ползучести при чередовании этапов быстрого нагружения и выдержек под нагрузкой, наблюдается снижение скорости второй фазы ползучести вследствие изотропного упрочнения материала (рис.5).

Экспериментальные исследования позволяют утверждать, что изотропное упрочнение инициируется неупругой деформацией среды, в то время как возврат исходных пластических свойств связан с временем. При циклическом нагружении одновременно с трансляционным упрочнением протекают процессы необратимого изотропного упрочнения, а также уменьшения и восстановления обратимой части последнего. Стабильное поведение материала отвечает состоянию "динамического равновесия" указанных процессов, оно зависит от конкретных условий циклического нагружения.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ диссертации "Структурная модель циклически нестабильной реономной среды" предлагается математическая модель для отражения наблюдаемого в опытах изотропного изменения свойств материалов.

В соответствии с основной идеей структурной модели бесконечно малый элемент объема среды схематизируется совокупностью подэлементов с различными реологическими свойствами. Полные деформации подэлементов $\varepsilon_{ij}^{(k)}$, их температура $T^{(k)}$ считаются одинаковыми и равными полной деформации ε_{ij} и температуре T элемента.

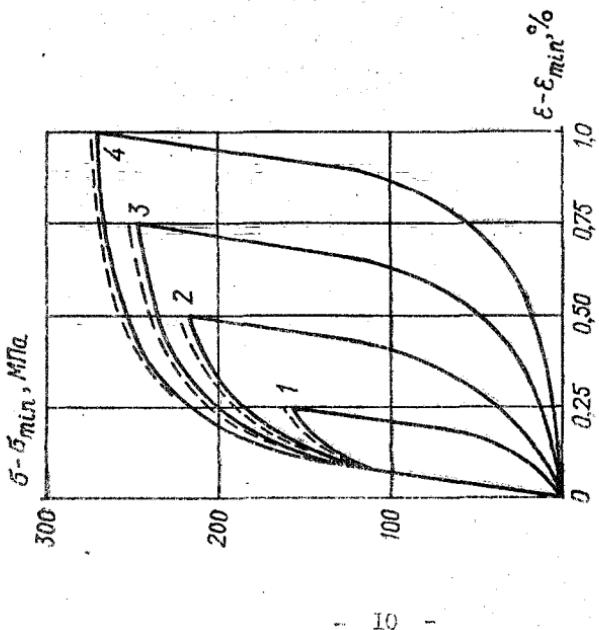


Рис.2. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) линии упругопластических циклов гистерезиса в стационарном цикле (Х18Н9, 650°C, $\dot{\epsilon} = 6\%/\text{мин}$, $T - \epsilon_a = 0,125\%$,
2 - $\epsilon_a = 0,25\%$, 3 - $\epsilon_a = 0,375\%$, 4 - $\epsilon_a = 0,5\%$)

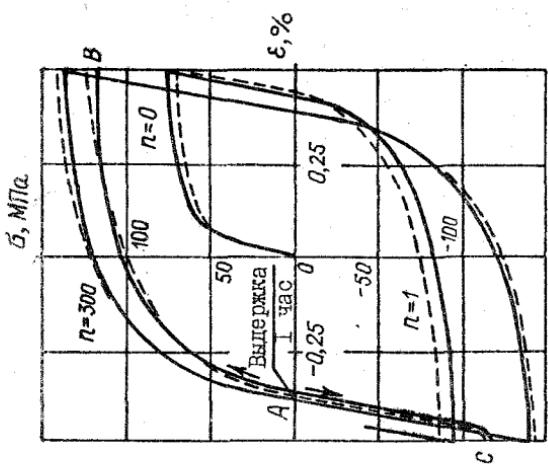


Рис.3. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) диаграммы шкического деформирования (Х18Н9, 650°C, $\dot{\epsilon} = 6\%/\text{мин}$, $\epsilon_a = 0,5\%$)

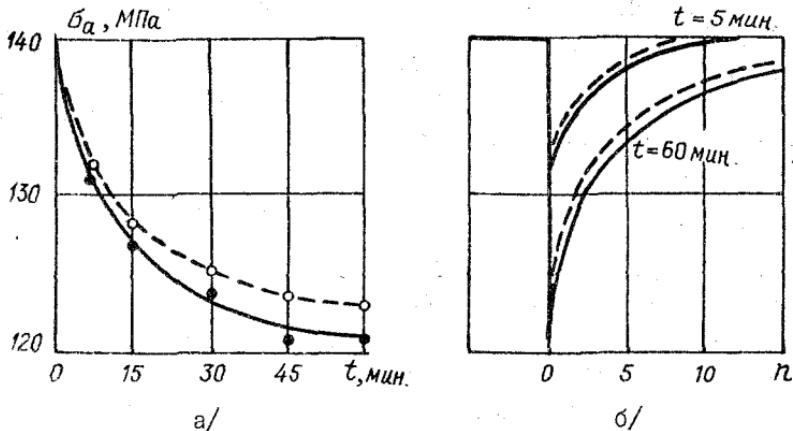


Рис.4. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) зависимости амплитуды напряжений от времени выдержки при $\sigma = 0 - a$ и от числа полуциклов нагружения после пяти - и шестидесятиминутной выдержек - б (Х18Н9, 650°C, $\dot{\varepsilon} = 0,5\%$)

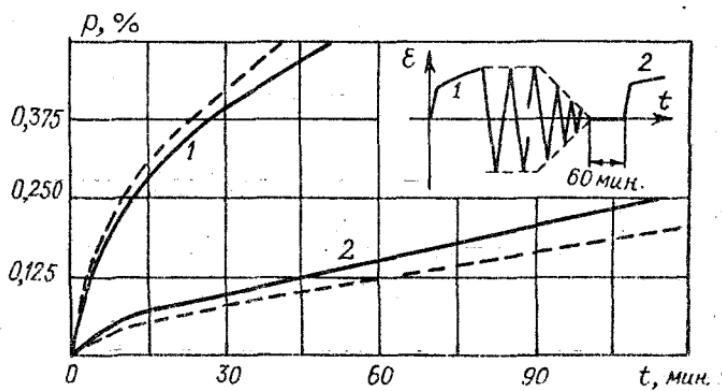


Рис.5. Программа испытаний, экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) кривые ползучести в исходном - 1 и стабильном - 2 состояниях (Х18Н9, 650°C, $\dot{\varepsilon} = 6\%/\text{мин}$, $\dot{\varepsilon}_a = 0,5\%$, $\sigma_c = 60 \text{ MPa}$)

Считается, что деформация $\varepsilon_{ij}^{(k)}$ состоит из обратимой $\rho_{ij}^{(k)} = \rho_0^{(k)} b_{ij} + r_{ij}^{(k)}$ и необратимой $r_{ij}^{(k)}$ составляющих. Среднее значение $\rho_0^{(k)}$ и девиатор $r_{ij}^{(k)}$ обратимой деформации связаны со средним значением $b_0^{(k)}$ и девиатором $s_{ij}^{(k)}$ напряжений законом Гука: $\rho_0^{(k)} = (3K)^{-1} b_0^{(k)} + \alpha T$, $r_{ij}^{(k)} = (2G)^{-1} s_{ij}^{(k)}$ (модуль объемной упругости K , модуль сдвига G и коэффициент линейного расширения α всех подэлементов принимаются одинаковыми). Аналогичные обозначения (без индекса k) используются для параметров механического состояния элемента объема; последние определяются осреднением соответствующих величин в подэлементах:

$b_{ij} = \langle b_{ij}^{(k)} \rangle$, $\rho_{ij} = \langle \rho_{ij}^{(k)} \rangle$ и т.д. Операция осреднения вводится соотношением типа $\langle b_{ij}^{(k)} \rangle = \int b_{ij}^{(k)} y(k) dk$, где $y(k)$ - функция плотности распределения значений k , которую удобно подчинить условиям $\langle 1 \rangle = \langle k \rangle = 1$. Реологические свойства каждого подэлемента полностью определены его "номером" k . Необратимая деформация $\rho_{ij}^{(k)}$ считается состоящей из реономной $c_{ij}^{(k)}$ и склерономной $b_{ij}^{(k)}$ составляющих - $\rho_{ij}^{(k)} = c_{ij}^{(k)} + b_{ij}^{(k)}$, для скоростей изменения которых предложены следующие соотношения

$$\dot{c}_{ij}^{(k)} = \frac{s_{ij}^{(k)}}{B_n^{(k)}} \Phi(\frac{B_n^{(k)}}{\alpha^{(k)} k B_s}, T); \quad (1)$$

$$\dot{b}_{ij}^{(k)} = \begin{cases} \frac{s_{ij}^{(k)}}{(B_n^{(k)})^2} \{ s_{mn}^{(k)} (\dot{e}_{mn} - \dot{c}_{mn}^{(k)} - \dot{r}_n^{(k)} \frac{s_{mn}^{(k)}}{B_n^{(k)}}) \}, & \text{при } r_n^{(k)} = r_s^{(k)}; \\ 0, & \text{при } r_n^{(k)} < r_s^{(k)}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $B_n^{(k)} = (\frac{1}{2} s_{ij}^{(k)} s_{ij}^{(k)})^{0.5}$ - интенсивность тензора напряжений подэлемента; B_s - константа материала; $\alpha^{(k)} = 1 + A(x^{(k)}) + \beta^{(k)}$ - параметр упрочнения подэлемента (для обратимой составляющей $\beta^{(k)}$ параметра упрочнения использовано соотношение типа Бейли-Орована

$$\dot{\beta}^{(k)} = C(B(x^{(k)}) - \beta^{(k)}) \dot{x}^{(k)} - D(\beta^{(k)}), \text{ где } x^{(k)} = \frac{1}{k} \int \left(\frac{1}{2} d\rho_{ij}^{(k)} d\rho_{ij}^{(k)} \right)^{0.5} =$$

величина пропорциональная параметру Одкиста подэлемента; A , B , C и D - однородные функции своих аргументов, единые для всех подэлементов; Φ - реологическая функция; \dot{e}_{mn} - скорость изменения компонент девиатора деформаций; $r_n^{(k)} = (\frac{1}{2} r_{ij}^{(k)} r_{ij}^{(k)})^{0.5}$ - интенсивность тензора обратимой деформации подэлемента; $r_s^{(k)} = (2G)^{-1} \alpha^{(k)} k B_s$ - текущее значение предельной упругой деформации подэлемента; фигурные скобки в соотношении (2) означают функцию $\{\xi\} = \xi H(\xi)$, где $H(\xi)$ - функция Хевисайда.

В диссертации дана интерпретация определяющих функций модели, показано, что функция A характеризует необратимое, а B - обратимое изотропное упрочнение материала, функции D и C -

"скорости" разупрочнения подэлементов (во времени) и восстановления обратимого изотропного упрочнения (при неуцругом деформировании). Анализ поведения одного подэлемента при циклическом неупругом деформировании, а также численное (с использованием ЭВМ) исследование возможностей предлагаемой структурной модели показали, что деформационные свойства, описываемые моделью, качественно согласуются с данными испытаний циклически нестабильных материалов.

Для количественного описания свойств конкретного материала необходимо определить его константы K , G , α , β_s и функции y , ϕ , A , B , C , D . В диссертации на основании совместного анализа уравнений модели и экспериментальных данных определен базовый для построения модели эксперимент (серия опытов, необходимая для определения всех параметров), установлен аналитический вид определяющих функций

$$y(\xi) = \sum_{i=1}^N g_i \delta(\xi - z_i), \quad \sum_{i=1}^N g_i = \sum_{i=1}^N g_i z_i = 1; \quad (3)$$

$$\phi(\xi) = \begin{cases} \phi_1 \exp(\phi_2 \xi), & \text{при } \xi \leq \phi_4; \\ \phi_1 \exp(\phi_2 \phi_4) \exp[\phi_3(\xi - \phi_4)], & \text{при } \xi > \phi_4; \end{cases} \quad (4)$$

$$A(\xi) = A_1 [1 - \exp(-A_2 \xi^{A_3})]; \quad (5)$$

$$B(\xi) = B_1 A(\xi); \quad C(\xi) = C_1 \xi^{C_2}; \quad D(\xi) = D_1 \xi^{D_2}, \quad (6)$$

где $\delta(\xi)$ – дельта-функция Дирака, N – число подэлементов модели, и определены (с некоторыми допущениями) их параметры.

Для уточнения (поиска) параметров определяющих функций модели предложен следующий подход. Определена функция R , которая количественно характеризует адекватность модели: $R = R_1 A_1 + R_2 A_2 + R_3 A_3$, где R_1 , R_2 и R_3 отражают соответственно ошибки при описании m_1 кривых деформирования, m_2 кривых ползучести и m_3 зависимостей амплитуды напряжений β_a от числа полуциклов нагружения n

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sum_{j=1}^{m_1} \omega_{1j} (\beta_j^{max} - \beta_j^{min})^{-1} \left[(\varepsilon_j^{max} - \varepsilon_j^{min})^{-1} \int_{\varepsilon_j^{min}}^{\varepsilon_j^{max}} (\sigma_j^p - \sigma_j)^2 d\varepsilon \right]^{0.5}; \\ R_2 &= \sum_{j=1}^{m_2} \omega_{2j} (\varepsilon_j^{max})^{-1} \left[(t_j^{max})^{-1} \int_0^{t_j^{max}} (\sigma_j^p - \sigma_j)^2 dt \right]^{0.5}; \\ R_3 &= \sum_{j=1}^{m_3} \omega_{3j} (\beta_{aj}^{max})^{-1} \left[(n_j^{max})^{-1} \int_0^{n_j^{max}} (\sigma_{aj}^p - \sigma_{aj})^2 dt \right]^{0.5}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

расчет кинетики деформирования. Анализ приспособляемости основан на модели идеально упругопластического тела, он позволяет качественно выделить основные предельные состояния и определять в каждом конкретном случае предельные значения параметров нагружения. Однако получаемые результаты относятся к стабилизированному поведению конструкции и не отражают повреждений, вызванных накопленными в процессе приспособляемости деформациями. Расчет кинетики деформирования позволяет использовать достаточно адекватные модели среды, но, являясь более трудоемким, обычно производится для небольшого числа первых циклов нагружения с последующей экстраполяцией результатов на весь ресурс работы конструкции.

Исследование процесса стабилизации скоростей совместных неупругих деформаций и полей остаточных напряжений выполнено на примере тонкостенной цилиндрической оболочки при постоянном внутреннем давлении и теплосменах. Совместный анализ кинетики деформирования и условий приспособляемости оболочки показал, что экстраполяция результатов расчета кинетики при малом (три-пять) числе циклов на сотни или тысячи циклов может приводить к существенной ошибке в значениях накопленной деформации. Установлено, что для экстраполяции целесообразно использовать нелинейные соотношения типа $r_{\varphi}^{(n)} = a_1 + a_2 n + a_3 \exp(-a_4 n)$, где $r_{\varphi}^{(n)}$ - накопленная за n циклов окружная деформация оболочки; прогнозирование должно быть ограничено увеличением (по числу циклов) базы расчета не более чем в 10-20 раз.

Сопоставление результатов расчета кинетики деформирования оболочки с использованием структурных моделей циклически стабильной и циклически нестабильной среды показало, что эффекты изотропного изменения свойств материала могут существенно влиять на долговечность элементов конструкций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Анализ опубликованных экспериментальных и теоретических исследований позволяет выделить среди существующих теорий неупругого деформирования конструкционных сплавов структурные модели среды, которые позволяют достаточно эффективно описать деформационную анизотропию материалов. Однако большинство известных вариантов структурной модели предназначено для отражения свойств циклически стабильных (стабилизирующихся) материалов. Особенности

поведения циклически нестабильных сталей и сплавов в современной литературе изучены не достаточно подробно.

2. Испытания стали 20, Х18Н9, Х16Н13МЗ, ЭИ-417, выполненные при растяжении-сжатии и циклическом кручении в широком диапазоне температур и скоростей деформирования, показали существенное изотропное упрочнение, которое может быть частично обратимым.

3. Для отражения обратимого и необратимого изотропного упрочнения конструкционных материалов разработана математическая (структурная) модель циклически нестабильной реономной среды.

Предложены также два упрощенных варианта модели, отличающиеся исходными предпосылками, степенью адекватности и, соответственно, областью приложений.

4. Разработана методика решения задачи идентификации модели среды, включающая метод расчетно-экспериментального определения реологических функций модели в первом приближении, а также основанные на методах нелинейного программирования алгоритм и вычислительную программу поиска (уточнения) параметров определяющих функций модели.

5. Выполнена проверка адекватности разработанной модели среды. В частности, определены параметры модели, описывающие поведение стали Х18Н9 при температурах 600, 650 и 700⁰С, проведено сопоставление расчетных и экспериментальных кривых циклического деформирования и ползучести, которое показало их удовлетворительное соответствие.

6. Получила дальнейшее развитие методика решения краевой упругопластической задачи, предусматривающая использование структурной модели циклически нестабильной реономной среды.

7. Разработан алгоритм и составлена вычислительная программа расчета кинетики неупругих деформаций в зоне разрушения цилиндрических и корсетных образцов в процессе термоусталостных испытаний с учетом реальных свойств материала, температурного поля и характеристик испытательной установки.

8. Расчеты кинетики деформирования образцов корсетной формы показали, что в процессе испытаний на термическую усталость накопления односторонней деформации в образце не происходит. В испытаниях с выдержками (при максимальной температуре цикла) размах неупругих деформаций в образце существенно больше, чем в аналогичных испытаниях без выдержки. Эти результаты должны учитываться при интерпретации данных испытаний.

расчет кинетики деформирования. Анализ приспособляемости основан на модели идеально упруго-пластического тела, он позволяет качественно выделить основные предельные состояния и определять в каждом конкретном случае предельные значения параметров нагружения. Однако получаемые результаты относятся к стабилизированному поведению конструкции и не отражают повреждений, вызванных накопленными в процессе приспособляемости деформациями. Расчет кинетики деформирования позволяет использовать достаточно адекватные модели среды, но, являясь более трудоемким, обычно производится для небольшого числа первых циклов нагружения с последующей экстраполяцией результатов на весь ресурс работы конструкции.

Исследование процесса стабилизации скоростей совместных неупругих деформаций и полей остаточных напряжений выполнено на примере тонкостенной цилиндрической оболочки при постоянном внутреннем давлении и теплосменах. Совместный анализ кинетики деформирования и условий приспособляемости оболочки показал, что экстраполяция результатов расчета кинетики при малом (три-пять) числе циклов на сотни или тысячи циклов может приводить к существенной ошибке в значениях накопленной деформации. Установлено, что для экстраполяции целесообразно использовать нелинейные соотношения типа $\rho_{\phi}^{(n)} = a_1 + a_2 n + a_3 \exp(-a_4 n)$, где $\rho_{\phi}^{(n)}$ - накопленная за n циклов окружная деформация оболочки; прогнозирование должно быть ограничено увеличением (по числу циклов) базы расчета не более чем в 10-20 раз.

Сопоставление результатов расчета кинетики деформирования оболочки с использованием структурных моделей циклически стабильной и циклически нестабильной среды показало, что эффекты изотропного изменения свойств материала могут существенно влиять на долговечность элементов конструкций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Анализ опубликованных экспериментальных и теоретических исследований позволяет выделить среди существующих теорий неупругого деформирования конструкционных сплавов структурные модели среды, которые позволяют достаточно эффективно описать деформационную анизотропию материалов. Однако большинство известных вариантов структурной модели предназначено для отражения свойств циклически стабильных (стабилизирующихся) материалов. Особенности

поведения циклически нестабильных сталей и сплавов в современной литературе изучены не достаточно подробно.

2. Исследования стали 20, X18Н9, X16Н13М3, ЭИ-417, выполненные при растяжении-сжатии и циклическом кручении в широком диапазоне температур и скоростей деформирования, показали существенное изотропное упрочнение, которое может быть частично обратимым.

3. Для отражения обратимого и необратимого изотропного упрочнения конструкционных материалов разработана математическая (структурная) модель циклически нестабильной реальной среды. Предложены также два упрощенных варианта модели, отличающиеся исходными предположениями, степенью адекватности и, соответственно, областью приложений.

4. Разработана методика решения задачи идентификации модели среды, включающая метод расчетно-экспериментального определения реологических функций модели в первом приближении, а также основанные на методах нелинейного программирования алгоритм и вычислительную программу поиска (уточнения) параметров определяющих функций модели.

5. Выполнена проверка адекватности разработанной модели среды. В частности, определены параметры модели, описывающие поведение стали X18Н9 при температурах 600, 650 и 700⁰С, проведено сопоставление расчетных и экспериментальных кривых циклического деформирования и ползучести, которое показало их удовлетворительное соответствие.

6. Получила дальнейшее развитие методика решения краевой упругопластической задачи, предусматривающая использование структурной модели циклически нестабильной реальной среды.

7. Разработан алгоритм и составлена вычислительная программа расчета кинетики неупругих деформаций в зоне разрушения шарнирных и корсетных образцов в процессе термоусталостных испытаний с учетом реальных свойств материала, температурного поля и характеристик испытательной установки.

8. Расчеты кинетики деформирования образцов корсетной формы показали, что в процессе испытаний на термическую усталость накопления односторонней деформации в образце не происходит. В испытаниях с выдержками (при максимальной температуре цикла) размах неупругих деформаций в образце существенно больше, чем в аналогичных испытаниях без выдержки. Эти результаты должны учитываться при интерпретации данных испытаний.

9. С целью расчетного определения долговечности прямолинейных элементов труб парогенераторов и теплообменников, а также трубопроводов разработан алгоритм и составлена вычислительная программа исследования кинетики деформирования тонкостенной цилиндрической оболочки при теплосменах и циклическом воздействии давления и нормальной силы.

10. Совместный анализ кинетики деформирования и условий приспособляемости оболочки показал, что для экстраполяции результатов расчета кинетики деформирования (размаха и накопления деформаций) целесообразно использовать нелинейные соотношения; экстраполяция должна быть ограничена (по числу циклов) увеличением базы расчета не более чем в 10–20 раз. На примере показано, что для геометрически нелинейных конструкций после кажущейся стабилизации темп одностороннего накопления деформаций может резко возрастать.

II. Сопоставление результатов расчета кинетики деформирования оболочки с использованием структурных моделей циклически стабильной и циклически нестабильной реономной среды показало, что учет изотропного изменения свойств материала важен для оценки долговечности элементов конструкций. Использование моделей циклически стабильного материала может приводить к занижению величин знакопеременной и односторонней деформации, идущему не в запас прочности конструкции.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Исследование кривых циклического деформирования при различных видах нагружения в условиях повышенных температур.– В кн.: XII научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций, Тезисы докладов, Киев: Наукова думка, 1974.–с.18. (Соавторы: Горский С.В., Кононов К.И., Колиаков В.Н.).

2. Методика исследования сопротивления материалов упругопластическому циклическому деформированию при растяжении–скатии.– В кн.: Вопросы прочности в машиностроении, Челябинск, ЧИИ, 1974, № 151.–с.142–148. (Соавторы: Горский С.В., Кононов К.И.).

3. Нестабильность свойств стали Х18Н9 при циклическом деформировании.– В кн.: Динамика и прочность конструкций, Челябинск, ЧИИ, 1977, № 201.–с.41–45.

4. К использованию структурной модели для отражения деформационных свойств циклически нестабильной реономной среды.– В кн.:

Динамика и прочность конструкций, Челябинск, ЧИИ, 1977, № 201.-с. 46-48. (Соавтор - Садаков О.С.).

5. О применении методов математического программирования для определения параметров реологических моделей среды.- В кн.: Динамика и прочность конструкций, Челябинск, ЧИИ, 1977, № 201.-с.53-58. (Соавторы: Гохберг В.Э., Кульчихин Е.Т.).

6. Математическое описание эффектов циклической нестабильности конструкционных материалов.-В кн.: XIV научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций, Тезисы докладов, Киев: Наукова думка, 1977.-с.76-77.

7. Анализ процесса прогрессирующего накопления односторонних деформаций при циклических тепловых деформациях в условиях ползучести.-В кн.: УП Всесоюзная конференция по прочности и пластичности, Тезисы докладов, Горький, 1978.-с.41. (Соавторы: Гохфельд Д.А., Садаков О.С., Чернявский О.Ф.).

8. Описание эффектов циклической нестабильности конструкционных материалов на основе структурной модели среды.-В кн.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузлениях, Челябинск, ЧИИ, 1979, № 236.-с.69-76.

9. Анализ кинетики полей неупругих деформаций корсетного образца при испытаниях на термическую усталость.-В кн.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузлениях, Челябинск, ЧИИ, 1979, № 236.-с.77-83.

10. О прогрессирующем выпучивании в условиях циклической ползучести.-В кн.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузлениях, Челябинск, ЧИИ, 1979, № 236.-с.83-87. (Соавтор - [Харитончик А.Е.]).

д/325/-

Техн.редактор Минах А.В.

ЗГ04620. Подписано к печати 3/III-80г. Формат бумаги 60x90 1/16.
Объем 1 п.л., 0,8 уч.-изд.л. ЧИИ. Тираж 100 экз. Заказ 486/1443.