

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОЧНОСТИ

На правах рукописи

БОРОДИЙ МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ

МОДЕЛЬ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ТЕЛА ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1992

Работа выполнена в Институте проблем

АН Украины



00819772 (Y)

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор
В.А.Стрижало
кандидат физико-математических наук
Н.К.Кучер

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Н.И.Бобыр
кандидат технических наук
П.П.Лепихин

Ведущая организация: Институт механики АН Украины

9³⁰ Защита диссертации состоится "24" декабря 1992 г. в
часов на заседании специализированного совета Д 016.33.01
при Институте проблем прочности АН Украины (252014, Киев-14,
ул. Тимирязевская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Института проблем прочности АН Украины.

Автореферат разослан "24" ноября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук

Ф.Ф.Гигиняк

АД-26.138

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

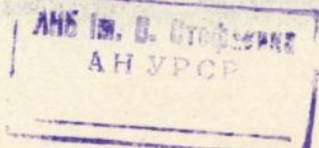
Актуальность работы. Многие элементы конструкций современной техники находятся под действием сложных циклических нагрузок. Прогнозирование их несущей способности при максимальном использовании прочностных ресурсов материала требует анализа напряженно-деформированного состояния с учетом конечных областей пластических деформаций. Существующие теории пластичности достаточно полно описывают процессы деформирования при однократном нагружении. В случае сложных историй циклического деформирования требуется дальнейшее развитие как уравнений состояния, так и методов решения соответствующих краевых задач.

Проблема сопротивления материалов действию циклически изменяющихся во времени нагрузок привлекает пристальное внимание многих исследователей. Наибольшие успехи в развитии циклической пластичности были достигнуты благодаря работам советских и зарубежных ученых Д.А.Гохфельда, А.П.Гусенкова, Ю.И.Кадашевича, В.Г.Карнаухова, Н.А.Махутова, Н.С.Можаровского, В.В.Москвитина, В.В.Новожилова, Г.С.Писаренко, С.В.Серенсена, В.А.Стрижало, В.Т.Трощенко, Ю.Н.Шевченко, Р.М.Шнейдеровича, А.И.Биргера, И.Ф.Бесселинга, К.С.Валаниса, С.С.Менсона, Й.Д.Морроу, З.Мроза, Р.М.Нахди, И.Охаши, Е.Танаки, В.Прагера и др.

Из экспериментов на малоцикловую усталость известно, что долговечность образца определяется кинетикой напряженного состояния. При сложном знакопеременном деформировании циклически упрочняющихся материалов уровень напряжений может повышаться в 1,5 - 2 раза по сравнению с простым циклическим деформированием при одной и той же амплитуде деформаций. В то же время, значительно меньшее изменение напряженного состояния может приводить к изменению долговечности на порядок и выше. Поэтому точность определения кинетики напряженного состояния элементов конструкций имеет важное значение для прогнозирования их остаточного ресурса.

Цель работы заключается в изучении законов упругопластического деформирования циклически нестабильных материалов при сложном нагружении и разработке на их основе экспериментально обоснованной модели упрочняющегося тела для описания процессов непропорционального циклического деформирования материалов.

Научная новизна работы. Разработаны уравнения состояния эндохронной теории пластичности для описания сложных историй циклического деформирования начально изотропных, циклически нестабильных материалов, учитывающие зависимость интенсивности циклического упрочнения от размахов пластических деформаций и формы циклов. Применительно к сложному нагружению сформулированы новые правила для учета изотропного и кинематического уп-



рочнений. Для описания блочного нагружения, на основании выдвинутой в работе гипотезы о дискретной шкале внутреннего времени, предложено использовать непрерывную функцию изотропного упрочнения, которая позволяет учитывать эффекты поперечного упрочнения и памяти материала о наибольшем упрочнении. Обоснован выбор базовых экспериментов и на их основе разработаны расчетно-экспериментальные методики конкретизации функций и констант материалов при описании простого и сложного циклического деформирования.

Достоверность научных результатов обеспечивается корректностью постановки задачи, строгостью математических выкладок, использованием гипотез непротиворечащих эксперименту. Результаты расчетов, полученные при моделировании процессов сложного циклического деформирования, подтверждаются известными экспериментальными данными.

Практическая ценность. Предложен более общий функционал пластичности эндохронной теории. Полученные на его основе разрешающие уравнения являются базой для создания алгоритмов расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, работающих при переменных нагрузках, с учетом истории нагружения. Обоснован выбор минимального количества базовых экспериментов, разработаны расчетно-экспериментальные методики конкретизации функций и констант материала. Получены точные аналитические решения при моделировании нагружения по двухзвенным траекториям как в пространстве деформаций, так и в пространстве напряжений. Произведена оценка пределов применимости предложенных определяющих соотношений.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на III Всесоюзной конференции "Прочность материалов и конструкций при низких температурах" (Винница, 1991 г.); Научном совещании "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций" (Канев, 1992 г.); IV Симпозиуме "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии" (Севастополь, 1992 г.).

В полном объеме работа докладывалась на семинаре отдела прочности материалов и элементов конструкций при криогенных температурах Института проблем прочности АН Украины под руководством профессора В.А.Стрижало (Киев, 1991 г.); тематическом кустовом семинаре "Статическая (кратковременная и длительная прочность" Института проблем прочности АН Украины под руководством академика АН Украины А.А.Лебедева (Киев, 1992 г.); семинаре лаборатории прочности и пластичности Киевского политехнического института под руководством профессора Н.С.Можаровского (Киев, 1992 г.); семинаре "Механика связанных полей в материалах и элементах конструкций" Института механики АН Украины под ру-

ководством член-корреспондентов АН Украины Ю.И.Шевченко и Н.А.Шульги (Киев, 1992 г.).

По теме диссертации опубликовано 8 работ,

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованной литературы 146 наименований. Ее содержание изложено на 150 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков, 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, перечислены цель, научная новизна, основные результаты и практическая ценность выполненных исследований, содержатся сведения об их апробации. Приведен краткий обзор по наиболее распространенным математическим моделям неупругого деформирования материалов, отмечены их достоинства и недостатки.

Первая глава работы посвящена обзору литературы по современному состоянию исследований, базирующихся на использовании определяющих соотношений эндохронной теории пластичности. Показано место этой теории в классе теорий пластичности, не использующих понятие поверхности текучести. Обсуждается ее связь с классическими теориями пластичности. Акцентируется внимание на значительном вкладе в разработку и развитие этого подхода З.Бажанта, К.С.Валаниса, О.Ватанабе, Х.Ву, Ю.И.Кадашевича, А.Б.Мосолова, В.В.Новожилова.

Отмечается, что первоначальный вариант эндохронной теории основывается на простом и удобном для практических расчетов функционале наследственного типа, аналогичном функционалу линейной теории вязкоупругости, если в последнем физическое время t заменить на другой параметр отслеживания процесса - длину дуги траектории деформаций. Рассмотрены недостатки этого варианта теории и предложенный К.С.Валанисом способ их устранения. В новом подходе изменена формулировка меры внутреннего времени, при этом функционал пластичности представляется в виде

$$v = v_0 \frac{de^p}{dz} + \int_0^z J(z - z') \frac{de^p}{dz'} dz', \quad (1)$$

$$\text{где} \quad dz = \frac{d\xi}{f(\xi)}, \quad (2)$$

$$d\xi^2 = (de^p \cdot de^p). \quad (3)$$

Здесь z - внутреннее время; ξ - мера внутреннего времени (па-

параметр Одквиста); $f(\xi)$ - функция упрочнения; J - наследственная функция (ядро); σ_T - предел текучести.

Представлены различные модификации определяющих соотношений для описания циклической ползучести, анизотропного упрочнения, сложного нагружения и др. Рассмотрены некоторые аспекты моделирования циклической неустойчивости за пределом упругости в рамках данной теории.

Отмечается, что наряду со значительными успехами в описании целого ряда важных особенностей упругопластического деформирования, таких как поперечное упрочнение, эффект Баушингера, влияние предварительного деформирования, циклическая ползучесть и релаксация, нелинейная разгрузка и гистерезис и др., практически, отсутствуют работы по моделированию сложных процессов циклического нагружения.

На основании вышеизложенного были сформулированы основные задачи исследования:

- усовершенствовать методы моделирования неупругого деформирования материалов при пропорциональном циклическом нагружении с отработкой расчетно-экспериментальных методов конкретизации функций и констант материала;

- провести комплексное исследование эффективности, используемых в работе, определяющих соотношений при изучении сложных процессов нагружения;

- разработать определяющие соотношения эндохронной теории пластичности для прогнозирования непропорционального циклического деформирования.

Во второй главе приведен краткий обзор экспериментальных исследований по изучению поведения материалов при одноосном повторно-переменном деформировании, дана классификация материалов относительно их циклических свойств. Предложены уравнения состояния эндохронной теории пластичности для моделирования циклического деформирования материалов. Представлены разрешающие уравнения для описания установившихся процессов при жестком асимметричном нагружении. Проанализированы различные варианты базовых экспериментов.

Основное содержание второй главы посвящено развитию уравнений состояния эндохронной теории пластичности, учитывающих зависимость циклического упрочнения от параметра Одквиста и размаха пластических деформаций. Для этого впервые было предложено использовать усложненную функцию упрочнения, зависящую от двух переменных - внутреннего времени и размаха (амплитуды) пластической деформации, $P = P(z, \Delta \epsilon^P)$.

В качестве базового эксперимента для конкретизации функции упрочнения и ядра, предложено использовать опыт на знакопеременное деформирование образца в жестком режиме нагружения

до стабилизации петли упругопластического гистерезиса. Описание процессов деформирования при таком подходе будет наиболее эффективным, если использовать кривую упругопластического деформирования, полученную при максимальной амплитуде пластической деформации исследуемого диапазона. Информация о падении напряжений при упругой разгрузке на нулевом полуцикле нагружения и в режиме насыщения дают возможность определить параметры функции упрочнения, а аппроксимируя диаграмму деформирования для первого полуцикла соответствующим уравнением, находим параметры ядра.

Для иллюстрации возможностей предложенных уравнений и сценки соответствия расчетных и экспериментальных данных при моделировании процессов деформирования в качестве объекта исследования выбраны стали и сплавы с хорошо изученными механическими свойствами. Это углеродистая сталь 45, аустенитная хромоникелевая сталь 316 и алюминиевый сплав В96, нашедшие широкое применение при изготовлении элементов конструкций. Экспериментальные данные об их поведении при различных режимах силового нагружения получены из работ А.С.Вавакина, Е.Танаки, С.В.Серенсена и Р.М.Шнейдеровича. В рассматриваемых условиях испытаний данные сплавы относятся к начально изотропным циклически стабилизирующимся материалам и для них выполняются основные гипотезы, обычно принимаемые при формулировке определяющих соотношений теорий пластичности.

Исследованы закономерности упругопластического деформирования указанных материалов при следующих условиях:

- симметричном циклическом деформировании при постоянной амплитуде деформации;
- блочном симметричном нагружении с увеличивающейся амплитудой;
- симметричном циклическом нагружении до состояния стабилизации с последующим переходом к нагружению с уменьшающимися размахами деформации.

Показано, что соответствие расчетных и экспериментальных данных при исследовании кинетики напряженно-деформированного состояния вполне удовлетворительное, ошибка не превышает 3-4%. Отмечается, что закономерности изотропного упрочнения при монотонном и циклическом деформировании существенно отличаются, в связи с чем предусматривается их раздельное описание.

В третьей главе работы при моделировании простейших непропорциональных траекторий в виде двухзвенных ломаных в пространстве деформаций и напряжений изучались эффекты непропорционального нагружения, которые вызываются изломом траектории деформирования и проявляются в запаздывании векторных и скалярных свойств материала.

Рассмотрено механическое поведение стали 45 на двухзвенных

траекториях в пространстве полных деформаций $\varepsilon - \gamma/\sqrt{3}$ и стали 316 на двухзвенных траекториях в пространстве напряжений $\sigma - \sqrt{3}\tau$ для различных значений углов излома. Соответствующие опыты выполнялись на тонкостенных трубчатых образцах нагруженных осевой силой и крутящим моментом. Было принято, что отличными от нуля являются только две компоненты тензора напряжений и пластической деформации, остальные компоненты не учитывались ввиду их малости.

При исследовании стали 45 использовались уравнения эндохронной теории с изотропно-кинематическим упрочнением и регулярным ядром. При выводе разрешающей системы уравнений задача свелась к решению неоднородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами относительно неизвестной функции Φ , связывающей компоненты тензора пластической деформации, а именно

$$\Phi(z) = \varepsilon^p(z) - k \cdot \gamma^p(z) / \sqrt{3}, \quad (4)$$

где k - тангенс угла наклона второго участка двухзвенной траектории.

Искомые компоненты тензора напряжений для второго звена определялись из соотношений

$$\sigma = \sigma_\tau \frac{d\varepsilon^p}{dz} + \int_{z_1}^z E(z - z') \frac{d\varepsilon^p}{dz'} dz', \quad (5)$$

$$\sqrt{3}\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sigma_\tau \frac{d\gamma^p}{dz} + \int_{z_1}^z E(z - z') \frac{d\gamma^p}{dz'} dz' \right]$$

с учетом выражений

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{1}{k^2 + 1} \left[\dot{\Phi} + k \cdot \sqrt{(k^2 + 1)F^2 + \dot{\Phi}^2} \right], \quad (6)$$

$$\dot{\gamma}^p / \sqrt{3} = \frac{1}{k^2 + 1} \left[-k \cdot \dot{\Phi} + \sqrt{(k^2 + 1)F^2 + \dot{\Phi}^2} \right],$$

где z_1 - значение внутреннего времени в точке излома. Точка над буквенным выражением обозначает дифференцирование по z .

Подобная система разрешающих уравнений получена при описании нагружения по двухзвенным траекториям в пространстве напряжений (сталь 316). Искомые поля пластических деформаций находились из выражений (6) при соответствующем интегрировании.

Представлено решение для данной задачи применительно к уравнению состояния с кинематическим упрочнением и сингулярным ядром. В этом случае неизвестная функция Φ определялась решением интегрального уравнения Вольтерра первого рода.

Установлена существенная зависимость векторных и скалярных свойств материала от угла излома. С его ростом длина следа запаздывания векторных свойств уменьшается, а длина следа скалярных свойств растет, что согласуется с экспериментальными данными.

Сравнительный анализ расчетов, выполненных по двум моделям эндохронной теории, свидетельствует об их хорошем соответствии. Наблюдаемое незначительное рассогласование полей пластических деформаций практически не зависит от угла излома и используемых в функционале пластичности ядер, а объясняется отличиями законов упрочнения.

Несмотря на то, что для всех двухзвенных траекторий константы материала определялись из результатов базовых экспериментов при пропорциональном нагружении, для большинства непропорциональных путей обнаружено удовлетворительное качественное и количественное соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

В четвертой главе рассматривается моделирование сложных процессов циклического нагружения, в том числе, для траекторий пластических деформаций в виде "креста", "звезды", квадрата и окружности, рис.1. Использование уравнений эндохронной теории с изотропно-кинематическим упрочнением показало удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных для первых циклов нагружения. Однако они оказались неэффективными для описания последующего циклического нагружения. В этом случае стабилизация процесса деформирования происходит значительно быстрее, чем наблюдаемая в опыте. Более того, уровень циклического упрочнения практически не зависит от формы цикла и значительно меньше достигнутого в эксперименте.

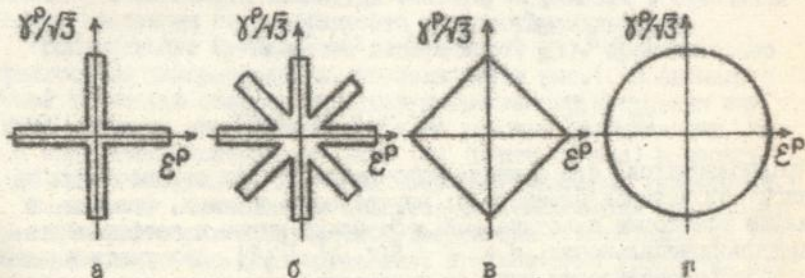


Рис.1. Непропорциональные траектории деформирования.

В связи с этим проанализировано влияние формы цикла на деформационные свойства материалов и показано, что при сложном циклическом деформировании материал упрочняется гораздо сильнее, чем при пропорциональном. Степень упрочнения возрастает с ростом сложности траектории при одинаковой максимальной амплитуде цикла. Это заметное деформационное упрочнение не коррелирует с простыми мерами деформирования, такими как длина дуги траектории деформации или пластической деформации, работа пластической деформации и др. В качестве характеристики формы цикла деформирования предложено использовать коэффициент непропорциональности Макдауэлла

$$\Phi = \left| 1 - \frac{\pi}{\pi - 2} \left| \lambda - \frac{2}{\pi} \right| \right|, \quad 0 \leq \Phi \leq 1, \quad (7)$$

где

$$\lambda = \frac{1}{l^p} \int_{\xi_n}^{\xi_k} \left| \left(\mathbf{N} \cdot \frac{d\mathbf{e}^p}{d\xi} \right) \right| d\xi', \quad l^p = \xi_k - \xi_n, \quad (8)$$

\mathbf{N} - единичный вектор, действующий в направлении максимального размаха пластической деформации; ξ_n и ξ_k - значения накопленной пластической деформации в начале и конце цикла нагружения.

Из соотношения (8) следует, что λ представляет собой отношение накопленной пластической деформации, спроектированной на главное направление, к общей накопленной пластической деформации за цикл. Коэффициент непропорциональности принимает минимальное значение ($\Phi = 0$) для пропорциональных траекторий и максимальное ($\Phi = 1$) для траекторий в виде окружности при одной и той же амплитуде.

Исходя из вышеизложенного, предложены следующие определяющие соотношения эндохронной теории пластичности для описания сложного циклического деформирования пластически несжимаемых материалов

$$\mathbf{v} = s_r \frac{d\mathbf{e}^p}{dz} + \int_0^z p \cdot \mathbf{J}(z - z') \frac{d\mathbf{e}^p}{dz'} dz', \quad (9)$$

$$dz = \frac{d\xi}{F}, \quad d\xi^2 = k(d\mathbf{e}^p \cdot d\mathbf{e}^p). \quad (10)$$

Предполагается, что функция упрочнения в этих соотношениях зависит от четырех параметров: внутреннего времени, размаха и длины траектории пластической деформации цикла и коэффициента непропорциональности, т.е. $F = \bar{F}(z, l\mathbf{e}^p, l^p, \Phi)$. Для учета влияния непропорциональности пути на кинематическую составляющую упрочнения в уравнения состояния введена функция дополнительного ки-

нематического упрочнения p , зависящая от размаха пластической деформации и коэффициента непропорциональности, $p(\Delta \epsilon^p, \Phi)$.

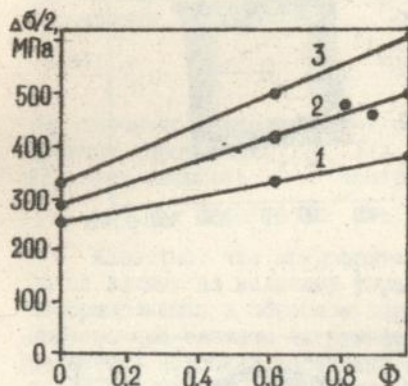


Рис. 2. Связь амплитуды вектора напряжений в установившемся состоянии с коэффициентом непропорциональности для значений амплитуд $\Delta \epsilon^p/2 = 0,1\%$ (1), $0,2\%$ (2), $0,4\%$ (3):
● - эксперимент Танаки.

одноосном нагружении, анализа установившихся петель упругопластического гистерезиса для круговых траекторий и длительности переходных процессов. Ядро J находится в результате аппроксимации экспериментальной зависимости $\sigma - \epsilon^p$ для первого полцикла при одноосном нагружении соответствующим выражением. Для вычисления функции p используется экспериментально обнаруженный факт о линейной зависимости амплитуды вектора напряжений в стабилизированном состоянии от коэффициента непропорциональности.

Использование функционала пластичности (9), применительно к траекториям деформирования, показанным на рис. 1, позволило с хорошей точностью описать кинетику напряженного состояния как на первых циклах нагружения, так и на участке стабилизации. На рис. 3 приведены экспериментальные (а) (опыты Танаки) и расчетные (б) поля напряжений для двух непропорциональных траекторий.

Если после стабилизации процесса деформирования происходит изменение траектории пластической деформации с переходом на другой вид циклического деформирования, предложенные уравнения состояния без соответствующих условий "сопряжения" могут приводить к существенным погрешностям. Для описания траекторий, в виде

Обработка экспериментальных данных для стали 316 позволила установить зависимость амплитуды вектора напряжения, от коэффициента непропорциональности в установившемся режиме деформирования, рис. 2. Показано, что эту зависимость можно аппроксимировать линейной функцией, построенной по двум точкам, соответствующим минимальному и максимальному упрочнению при различных амплитудах деформаций. Для определения функций R , J , и p , применительно к уравнению (9), можно ограничиться только двумя сериями базовых опытов - знакопеременным кручением (растяжением-сжатием) и деформированием по круговым траекториям пластических деформаций до состояния стабилизации пластических свойств материала. При этом функция R определяется из рассмотрения упругой разгрузки при

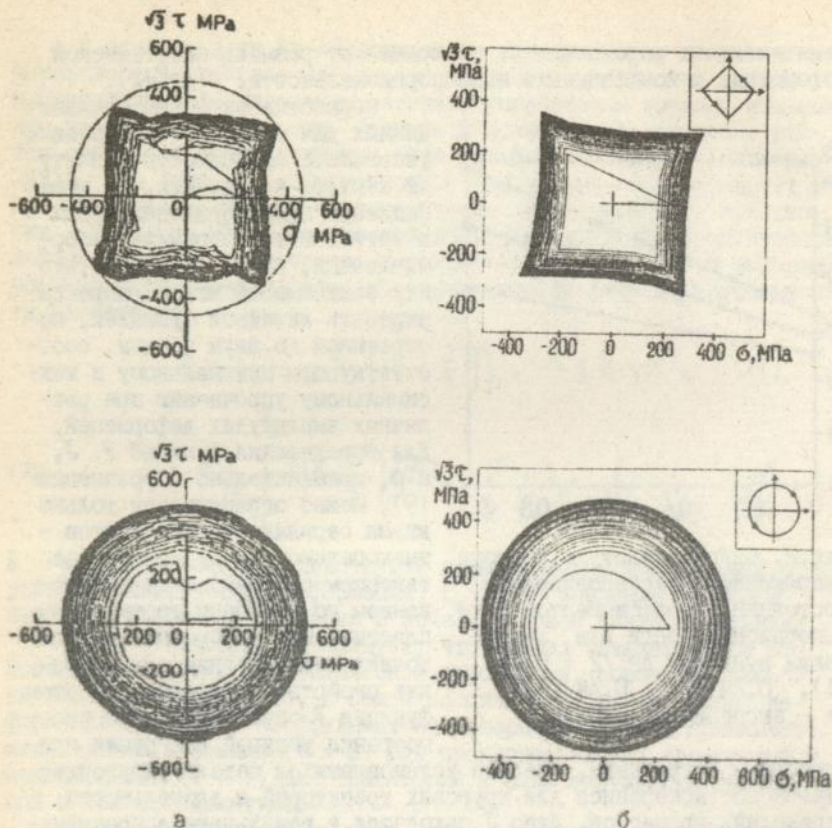


Рис.3. Распределение напряжений для траекторий пластических деформаций в виде квадрата и окружности: а - эксперимент, б - расчет.

последовательности различных блоков нагружения при условии стабилизации процесса деформирования на каждом этапе, предложен более общий функционал пластичности

$$s^{(n)} = s_r \frac{de^{p(n)}}{dz} + \int_0^z p^{(n)} J(z - z') \frac{de^{p(n)}}{dz'} dz', \quad (11)$$

где n - номер блока нагружения. В уравнении (11) предполагается использование дискретной шкалы внутреннего времени при нулевом отсчете параметра z для каждого этапа нагружения и выполнение следующего условия сопряжения:

$$z \lim_{\rightarrow 0} P^{(n)}(z, \dots) = z \lim_{\rightarrow \infty} P^{(n-1)}(z, \dots). \quad (12)$$

Удовлетворяя (12), можно предложить следующую запись функции упрочнения

$$F^{(n)} = C_n - (C_n - C_{n-1}) e^{-\beta^n z}, \quad C_0 = 1, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (13)$$

где параметр C представляет собой стабилизированное значение функции упрочнения $z \lim_{\rightarrow \infty} F(z, \dots) = C$, а величина β характеризует скорость протекания переходных процессов и

$$C = C(\Delta \epsilon^P, \Phi), \quad \beta = \beta(\Delta \epsilon^P, l^P).$$

Известно, что предварительная деформация меньшей амплитуды не влияет на величину упрочнения при большей амплитуде, а деформирование в обратном порядке приводит к разупрочнению, причем, при сложном нагружении некоторый запас упрочнения сохраняется. Подобный частичный возврат упрочнения наблюдается и после реализации нагружения, изменяющегося с непропорционального на пропорциональное. Для учета этого эффекта предлагается использовать следующее выражение для параметра C рассматриваемого блока

$$\bar{C}_n = a C_{n-1} + (1 - a) C_n, \quad 0 \leq a \leq 1, \quad (14)$$

где C_{n-1} - максимальное значение функции упрочнения в предыдущем блоке, а C_n - значение функции упрочнения для текущей геометрии цикла без учета предыстории. Если $a = 1$ материал полностью запоминает упрочнение предыдущего блока, а при $a = 0$ такой тип памяти в материале отсутствует (эффект затирания памяти). Очевидно, что во всех остальных случаях нагружения материалы обладают частичной памятью о наибольшем упрочнении и в уравнении (14) должны присутствовать оба слагаемых.

Несколько отличаются законы циклического деформирования для последовательности пропорциональных блоков. В случае внезапного изменения направления нагружки наблюдается резкое возрастание упрочнения (эффект поперечного упрочнения). Для описания этого эффекта предлагается следующее выражение применительно к параметру упрочнения C

$$\bar{C}_n = j C_n - j + 1, \quad (15)$$

где j - целое число, равное количеству нагружений в ортогональном направлении. Другие более точные формулировки законов упрочнения при таком блочном нагружении требуют дополнительных экспериментальных исследований.

На примере описания процессов деформирования в виде последовательностей блоков с различной формой (рис.4) и амплитудой (рис.5) циклов приведено сравнение результатов расчетов ко

предложенным уравнениям, уравнениям двухповерхностной теории течения и экспериментом. Показано, что предлагаемые уравнения состояния эндодронной теории пластичности при выполнении конкретных расчетов обеспечивают высокую степень адекватности эксперименту и выглядят предпочтительнее двухповерхностной теории, поскольку отличие результатов при их сравнении, носит не только количественный, но и качественный характер.

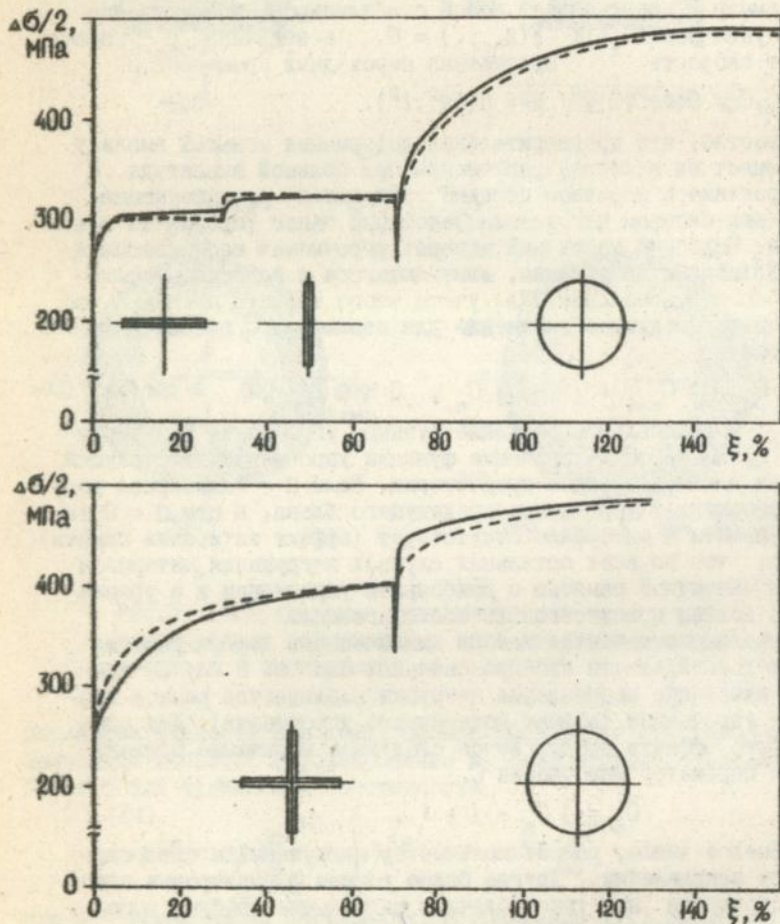


Рис.4. Распределение амплитуды напряжений в зависимости от накопленной пластической деформации для последовательности блоков при $\Delta\epsilon^P/2 = 0,2\%$: — — расчет, --- — эксперимент.

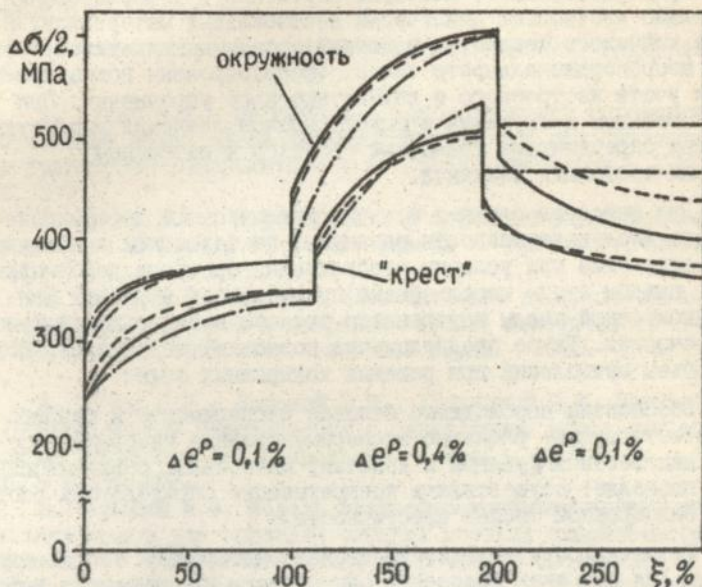


Рис.5. Распределение амплитуды напряжений в зависимости от накопленной пластической деформации для однотипных блоков при ступенчатом изменении амплитуды пластической деформации: — — — — — эндохронная теория, — · — — — — двухповерхностная теория течения, — — — — — эксперимент.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность обобщенных в диссертации результатов исследования представляет собой решение актуальной научной задачи, состоящее в разработке уравнений состояния, позволяющих осуществлять комплексное изучение деформационных свойств конструкционных материалов в условиях простого и сложного циклического нагружения. Решение этой задачи имеет важное практическое значение при построении расчетных комплексов для оценки ресурса ответственных элементов конструкций, эксплуатируемых при сложных силовых воздействиях за пределами упругости.

Основные результаты выполненного исследования сводятся к следующему:

1. В рамках эндохронной теории пластичности впервые раз-

работаны определяющие соотношения, позволяющие описывать процессы непропорционального повторно-переменного деформирования для начально изотропных циклически нестабильных материалов. В качестве ключевого параметра в данной модели используется коэффициент непропорциональности цикла. Сформулированы новые правила для учета изотропного и кинематического упрочнений. При пропорциональном нагружении и фиксированном значении амплитуды деформации определяющие уравнения сводятся к известным уравнениям состояния Валаниса.

2. Для описания сложных историй циклического деформирования в виде последовательности различных по форме или амплитуде циклов нагружения при условии стабилизации процесса деформирования на каждом этапе использована предложенная в работе концепция дискретной шкалы внутреннего времени с непрерывной функцией упрочнения. Такое предположение позволяет значительно сократить объем вычислений при решении конкретных задач.

3. Обоснованы необходимые базовые эксперименты и разработаны соответствующие расчетно-экспериментальные методики определения неизвестных функций и констант материала, совокупность которых позволяет осуществлять конкретизацию определяющих соотношений эндохронной теории пластичности.

4. Уточнены определяющие уравнения эндохронной теории пластичности для описания процессов одномерного циклического деформирования на основе использования функции упрочнения, зависящей от двух переменных - внутреннего времени и амплитуды (размаха) пластической деформации, что значительно расширяет область их применения.

5. Решены задачи о механическом поведении материалов при нагружении по двухзвенным траекториям как в пространстве деформаций, так и в пространстве напряжений. В рамках модели с изотропно-кинематическим упрочнением разрешающие уравнения сводятся к неоднородным дифференциальным уравнениям второго порядка с постоянными коэффициентами. Получены точные оценки пределов применимости используемых уравнений состояния.

6. Для ряда программ циклического пропорционального деформирования образцов из стали 45, нержавеющей стали 316 и алюминиевого сплава В96 проведено сопоставление расчетов, выполненных по предложенным модифицированным определяющим соотношениям, с известными экспериментальными данными. Показано, что используемые уравнения состояния обеспечивают высокую степень адекватности эксперименту. При моделировании нагружения по двухзвенным траекториям отмечена существенная зависимость векторных и скалярных свойств исследуемых материалов от угла излома. Достоверность разработанных уравнений состояния для описания

непропорционального циклического деформирования подтверждена решениями ряда практически важных задач, которые хорошо согласуются с экспериментом.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Кучер Н.К., Бородий М.В. Достоверность определяющих соотношений эндохронной теории пластичности при описании сложных траекторий деформирования // Пробл. прочности.- 1989.- № 7. - С. 3-7.

2. Кучер Н.К., Бородий М.В. К описанию одноосного знакопеременного деформирования материалов // Пробл. прочности. - 1989.- № 11. - С. 65-69.

3. Кучер М.К., Бородий М.В. Описання процесів складного навантаження в рамках ендохронної теорії пластичності // Доп. АН УРСР Сер. А. Фіз.-мат. та техн. науки.- 1990.- № 3.- С. 55-59.

4. Кучер Н.К., Бородий М.В., Рудницкий Н.И. Вариант эндохронной теории пластичности с сингулярным ядром при описании сложных процессов деформирования // Пробл. прочности.- 1990.- № 4. - С. 97-102.

5. Бородий М.В. Модель изотропно-кинематического упрочнения материалов для описания сложных историй циклического деформирования // III Всесоюз. Конф. "Прочность материалов и конструкций при низких температурах", Винница, 17-19 сентября 1991г. : Тез. докл.- Киев, 1991.- С.8-9.

6. Кучер Н.К., Бородий М.В. Модель упрочняющегося тела для прогнозирования непропорционального циклического деформирования материалов // III Всесоюз. Конф. "Прочность материалов и конструкций при низких температурах", Винница, 17-19 сентября 1991г. : Тез. докл.- Киев, 1991.- С. 35-36.

7. Кучер Н.К., Бородий М.В. Достоверность определяющих соотношений эндохронной теории пластичности при прогнозировании сложных процессов циклического деформирования материалов // Науч. совещание "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций", Канев, 27-29 мая 1992 г. : Тез. докл.- Киев, 1992.- С. 43.

8. Кучер Н.К., Бородий М.В. Численное моделирование процессов сложного циклического деформирования материалов // IV Симпозиум "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии", Севастополь, 18-20 июня 1992 г. : Тез. докл.- Киев, 1992.- С. 39.

Подп. к печ. 12.XI.92. Формат 60x84/16. Бум. офс. Офс. печ.
Усл. печ. л. 0,85 .Усл. кр.-отт. 0,97 . Уч.-изд. л. 0,9 .
Тираж 100 экз. Заказ 325. Бесплатно.

Участок ротاپринтной печати ОНТИ ИПП АН Украины
252014, Киев-14, ул. Тимирязевская, 2.

468854

Ab 26.138

AB 26.138