

Челябинский государственный технический университет

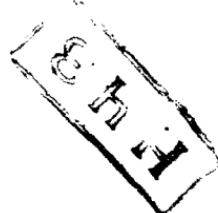
На правах рукописи

ПОНЫКИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ИЗОТРОПНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ
НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 01.02.04 - "Механика
деформируемого твердого тела".

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



Челябинск
1992

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор О.С.Садаков.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических
наук, профессор С.А.Шестериков;

доктор технических наук,
профессор Ю.А.Ивашенко.

Ведущая организация - Институт машиноведения РАН
им. А.А.Благонравова.

Зашита состоится "11" октября 1992 г.

на заседании специализированного совета Д 053.13.01 Челябинского
государственного технического университета по адресу:
454080, г.Челябинск, проспект им.В.И.Ленина,76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "8" октября 1992 г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент

В.М.Кононов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современный уровень развития машиностроения характеризуется высокими удельными мощностями производственного оборудования. При незначительных весе и габаритах конструкции работают под воздействием интенсивных внешних нагрузок, в условиях повышенных температур. При этом материал конструкций зачастую подвержен неупругому деформированию, приводящему к накоплению усталостных повреждений и малоцикловому разрушению. Это обуславливает повышенные требования к достоверности расчета полей напряжений и деформаций в процессе работы конструкции и оценке на их основе прочности и долговечности. В первую очередь это относится к областям машиностроения, связанным с авиацией, энергетикой, металлургией, химической промышленностью, к двигателестроению.

Расчеты по различным теориям пластичности показывают, что при повторно-переменном нагружении конструкций, напряженное состояние которых отличается от одностороннего, типичным является отклонение траекторий деформирования от пропорциональных. Имеющиеся в литературе данные об экспериментальных исследованиях поведения материалов при непропорциональном (сложном) нагружении выявляют комплекс деформационных свойств, которые не могут быть объяснены на основе закономерностей пропорционального деформирования. В частности, это относится к изотропному упрочнению, которое при циклическом непропорциональном нагружении протекает значительно интенсивнее и приводит к более упрочненному состоянию материала, чем при пропорциональном деформировании. Попытки описать этот эффект на основе существующих теорий пластичности не приводят к желаемым результатам.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - совершенствование методов расчета неупругого деформирования конструкций путем экспериментально-теоретического изучения реологических свойств конструкционных материалов в условиях циклического непропорционального нагружения и способов их математического описания. При этом решались следующие задачи:

- разработка методики экспериментального исследования деформационных свойств материалов при сложном нагружении;
- изучение поведения материалов и особенностей изотропного упрочнения при циклическом непропорциональном нагружении по различным программам;

- разработка модели материала, учитывающей особенности изотропного упрочнения при непропорциональном нагружении;
- сопоставление результатов расчета по разработанной модели и по некоторым известным теориям пластичности с результатами эксперимента;
- расчет тонкостенной цилиндрической оболочки, нагруженной подвижным тепловым полем, для изучения возможности использования непропорционального деформирования для технологического упрочнения элементов конструкций.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Впервые получены экспериментальные данные о деформационных свойствах жаропрочных сплавов двух марок и хромистой стали при циклическом сложном нагружении по различным программам.

Разработана структурная модель, описывающая свойства пластичности и ползучести материала с учетом влияния непропорциональности нагружения на изотропное упрочнение.

С использованием разработанной модели, а также структурной модели стабильной среды проведен расчет кинетики деформирования тонкостенной оболочки при ее циклическом нагружении подвижным тепловым полем.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ. Полученные экспериментальные данные о реологических свойствах двух жаропрочных сплавов могут использоваться при проведении расчетов на прочность элементов конструкций.

Разработана методика практического применения модели в расчетах на прочность и реализована в виде соответствующей программы для IBM-совместимых ЭВМ, предназначенной для использования в макропрограммах расчета конструкций произвольного типа.

Предложен способ технологического упрочнения труб, позволяющий существенно повысить их прочностные свойства и, в частности, снизить скорость ползучести в материале трубы в несколько раз.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения работы были доложены и обсуждались на следующих конференциях:

- областная научно-практическая конференция "Участие молодых ученых и специалистов в реконструкции и модернизации предприятий, во внедрении новой техники и технологии" (г. Челябинск, 1986 г.);
- Всесоюзная научно-техническая конференция "Эксперименталь-

ные методы в механике твердого тела" (г. Калининград, 1988 г.);

- III Всесоюзный симпозиум "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии" (г. Киев, 1989 г.);

- 39 - 43-я научно-технические конференции ЧТУ (г. Челябинск, 1986 - 1990 г.г.).

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание работы изложено в 3 статьях и 2 тезисах докладов.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников (99 наименований). Она изложена на 108 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 2 таблицы.

Основные результаты диссертационной работы используются в ОКЕМ (г. Нижний Новгород), что подтверждается соответствующим документом.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТРОПНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Одними из первых, обративших внимание на влияние непропорциональности нагружения на изотропное упрочнение материала, были американские исследователи Lamba H.S., Sidebottom O.M.¹. На медных образцах они обнаружили, что интенсивность размаха напряжения в состоянии стабилизации на траектории деформирования в виде круга на 40% превышает соответствующую величину при пропорциональном нагружении. Позднее аналогичные эффекты были обнаружены при испытаниях стали 316 японцами Ohashi Y., Kawai M., Kaito T.², которые объяснили интенсивное упрочнение материала при сложном нагружении взаимодействием дислокаций при активизации новых систем скольжения. В ряде работ отмечается существенное влияние непропорциональности нагружения на реономные свойства материалов. Так, например, скорость установившейся ползучести в образце из стали 316 после его деформирования по круговой

¹ Lamba H.S., Sidebottom O.M. Cyclic plasticity for nonproportional pats.// Trans. ASME: J. Eng. Mater. and Technol.- 1978.- 100, № 1.- P. 96-103.

² Ohashi Y., Kawai M., Kaito T. Inelastic behavior of type 316 stainless steel under multiaxial nonproportional cyclic stressing at elevated temperature // Trans. ASME: J. Eng. Mater. and Technol.- 1985.- 107, № 2.- P. 112-119.

траекториям может снижаться в несколько раз (по сравнению с пропорциональным нагружением)¹.

С целью более подробного изучения этих процессов проведена серия испытаний на образцах из циклически упрочняющихся, стабилизирующихся сплавов ХН55МВЦ и 03Х21Н32М3Б (ЭП 864), а также из разупрочняющейся хромистой стали 40Х. Образцы имели трубчатую форму с наружным диаметром 22 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной рабочей части 60 мм. Испытания проведены на установке, позволяющей нагружать образцы циклически изменяющимися осевой силой и крутящим моментом. Для измерения деформаций в образце разработан и изготовлен деформометр оригинальной конструкции. Температура испытаний - 20, 600, 700°C.

Программа испытаний каждого образца состояла из нескольких этапов, на каждом из которых нагружение осуществлялось до стабилизации по одной из траекторий, изображенных на рис.1 ($\epsilon_1 = \sqrt{3}(\epsilon - \epsilon_0)/2$, $\epsilon_3 = \gamma/2$; $\epsilon, \gamma, \epsilon_0$ - осевая, сдвиговая и средняя деформации). В конце каждого этапа осуществлялось "затухание" - циклическое деформирование того же вида с плавно уменьшающейся до нуля амплитудой деформации, проводимое для снятия деформационной анизотропии. На всех этапах интенсивность размаха деформации $\Delta\epsilon$ поддерживалась неизменной. Результаты испытаний одного из образцов представлены на рис.2. Числа 1,2,...,9 над осью абсцисс означают номер этапа нагружения. Вид траектории деформирования указан в соответствии с введенным на предыдущем рисунке правилом. Участки "затухания" не показаны.

При циклическом пропорциональном деформировании, этап 1, материал упрочняется и стабилизируется после приблизительно 40 циклов. При переходе к нагружению вдоль траектории, расположенной под углом 90° к начальной (этап 2) происходит скачкообразный рост интенсивности размаха напряжения. Французские исследователи Benallal A., Marquis D.², получившие аналогичный результат.

¹ Murakami S., Kawai M., Yamada Y. Creep after cyclic-plasticity under multiaxial conditions for type 316 stainless steel at elevated temperature // Trans ASME: J. Eng. Mater. and Technol.- 1990.- 112, № 3.- P. 346-352.

² Benallal A., Marquis D. Constitutive equations for nonproportional cyclic elastoviscoplasticity // Trans. ASME: J. Eng. Mater. and Technol.- 1987.- 109, № 4.- P. 326-336.

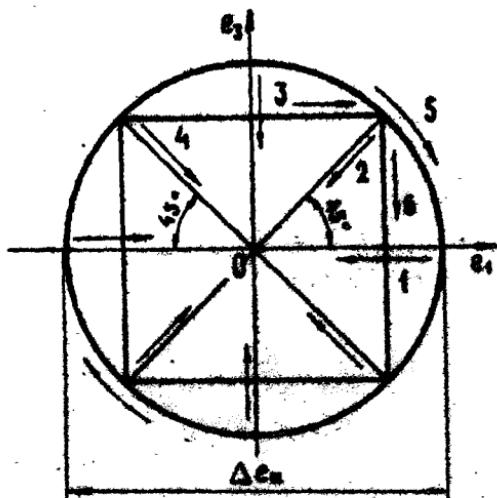


Рис. 1. Траектории деформирования в девиаторной плоскости:
 1 - растяжение-сжатие, 2 и 4 - совместное растяжение-сжатие с кручением, 3 - кручение, 5 и 6 - круговая и квадратная траектории

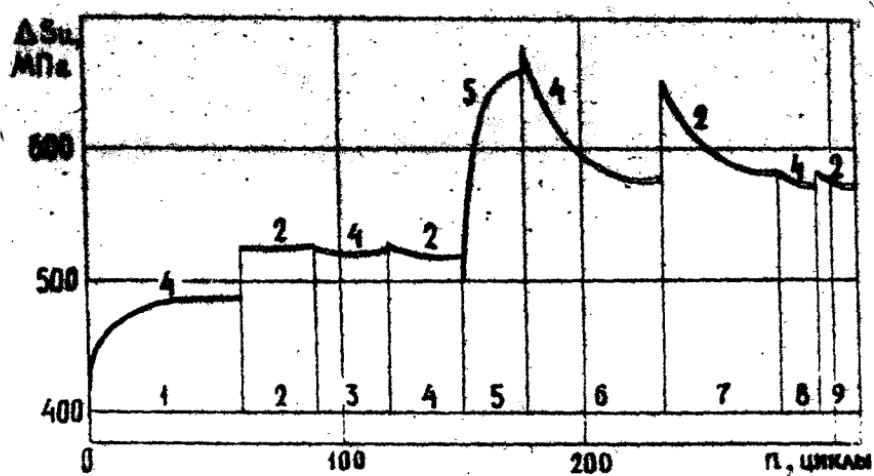


Рис. 2. Зависимость интенсивности размыва напряжения от числа циклов нагружения и вида траектории деформирования;
 ЭП 864, $T = 20^\circ\text{C}$, $\Delta e_n = (0,84 - 0,86)\%$

назвали этот эффект "поперечным" упрочнением материала и объясняют его тем, что в процессе циклического пропорционального нагружения поверхность текучести приобретает сплюснутую в направлении траектории деформирования форму. Дальнейшее чередование траекторий пропорционального деформирования (этапы 3,4) не вносит заметных изменений в свойства материала.

Круговое нагружение, этап 5, приводит к интенсивному дополнительному (по сравнению со стабилизированным состоянием при пропорциональном деформировании на первом этапе) упрочнению. Последующее пропорциональное нагружение, этап 6, разупрочняет материал, причем процесс разупрочнения носит анизотропный характер. Последнее подтверждается в начале этапа 7, где интенсивность размаха напряжения выше, чем на последних циклах этапа 6. Дальнейшее нагружение вновь приводит к разупрочнению. При этом анизотропия устраняется, что проявляется при деформировании образца на этапах 8,9.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Для учета особенностей изотропного упрочнения при непропорциональном нагружении разработана реологическая модель материала, в основу которой положены структурная модель стабильной среды¹ и понятие неупрочняющей области, введенной Ohno в пространстве пластических деформаций². Элементарный объем представляется в виде набора подэлементов, обладающих отличающимися параметрами реологических свойств. Предполагается, что деформация у всех подэлементов одинакова и равна деформации элемента среды моделируемого материала:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_0 \delta_{ij} + \epsilon_{ij}^k = \epsilon_{ij}^k = \epsilon_0^k \delta_{ij} + \epsilon_{ij}^k, \quad (1)$$

где ϵ_{ij} , ϵ_0 , ϵ_{ij}^k - тензор деформаций, его шаровая и девиационная.

¹ Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагрузлениях. - М.: Машиностроение, 1984.- 256 с.

² Ohashi Y., Tanaka F., Ooka M. Plastic deformation behavior of type 316 stainless steel subject to out-of-phase strain cycles // Trans. ASME: J. Eng. Mater. and Technol.- 1985.- 107, № 4.- P. 286-292.

части, ϵ_{1j}^k , ϵ_0^k , ϵ_{1j}^k - соответствующие величины для k-го подэлемента, $k = 1, 2, \dots, m$ (m - количество подэлементов); δ_{ij} - символ Кронекера. Из (1) следует, что $\epsilon_0^k = \epsilon_0$.

Девиатор деформации разделяется на неупругую часть и упругую, определяемую тождественно:

$$r_{1j}^k = s_{1j}^k / 2G, \quad (2)$$

где s_{1j}^k - девиатор напряжения подэлемента, G - модуль сдвига. Соответственно неупругая часть определяется в виде

$$p_{1j}^k + c_{1j}^k = \epsilon_{1j}^k - r_{1j}^k, \quad (3)$$

где p_{1j}^k , c_{1j}^k - склерономная и реономная составляющие неупругой деформации. Отметим, что разделение неупругой деформации на составляющие является идеализацией, удобной для расчетов.

Вводится определение, согласно которому составляющие неупругой деформации и напряжение в элементарном объеме представляют собой результат осреднения соответствующих величин по подэлементам. В соответствии с этим

$$r_{1j} = \langle r_{1j}^k \rangle = \sum_{k=1}^m r_{1j}^k g^k, \quad p_{1j} = \langle p_{1j}^k \rangle, \quad c_{1j} = \langle c_{1j}^k \rangle, \quad s_{1j} = \langle s_{1j}^k \rangle, \quad (4)$$

где g^k - "веса" подэлементов, угловые скобки означают операцию осреднения. Поверхность текучести подэлемента задается в виде

$$r^k(r_{1j}^k) = r_{1j}^k r_{1j}^k - (r_T^k)^2 = 0, \quad r_T^k = s_T^k / 2G, \quad (5)$$

где s_T^k - предел текучести подэлемента. Закон пластического течения определяется следующим образом:

$$dp_{1j}^k = \frac{\langle\langle r_{1j}^k (d\epsilon_{1j}^k - dc_{1j}^k) \rangle\rangle}{r_{1j}^k r_{1j}^k} H(r_u^k - r_T^k), \quad (6)$$

где $r_u^k = (r_u^k r_{1j}^k / 2)^{0.5}$ - интенсивность упругой деформации подэлемента. Двойными угловыми скобками обозначена функция: $\langle\langle x \rangle\rangle = x H(x)$, $H(x)$ - функция Хевисайда ($H(x) = 0$ при $x < 0$, $H(x) = 1$ при $x \geq 0$).

Реактивная деформация определяется выражением

$$d\alpha_{1,j}^k = \Phi(\zeta^k) r_{1,j}^k / r_u^k dt, \quad \zeta^k = r_u^k / r_t^k, \quad (7)$$

где Φ - реологическая функция, t - время. Величина ζ^k характеризует текущую относительную нагруженность подэлемента.

Для учета изотропного упрочнения для каждого подэлемента в пространстве пластических деформаций вводится неупрочняющая область, ограниченная поверхностью памяти (скращенно ПП):

$$q^k(p_{1,j}^k) = (p_{1,j}^k - \alpha_{1,j}^k)(p_{1,j}^k - \alpha_{1,j}^k) - (\rho^k)^2 = 0,$$

где ρ^k - радиус ПП, $\alpha_{1,j}^k$ - тензор, определяющий положение ее центра. ПП подэлемента является гиперсферой в пятимерном пространстве $\{p_{1,j}\}$ и отражает память этого подэлемента об истории пластического деформирования.

Эволюционные уравнения для $\alpha_{1,j}^k$ и ρ^k предлагаются в виде

$$d\alpha_{1,j}^k = (1 - C_1^k) \frac{\langle\langle A \rangle\rangle}{B^2} (p_{1,j}^k - \alpha_{1,j}^k) H(B - \rho^k), \quad (8)$$

$$d\rho^k = C_1^k \frac{\langle\langle A \rangle\rangle}{B} H(B - \rho^k) - C_2^k (dp_{1,j}^k dp_{1,j}^k)^{0.5} [1 - H(B - \rho^k)]. \quad (9)$$

$$A = dp_{1,j}^k (p_{1,j}^k - \alpha_{1,j}^k), \quad B = [(p_{1,j}^k - \alpha_{1,j}^k)(p_{1,j}^k - \alpha_{1,j}^k)]^{0.5},$$

где C_1^k , C_2^k - константы материала.

В соответствии с уравнениями (8), (9) ПП подэлемента перемещается и увеличивается в размере в том случае, если точка, изображающая процесс нагружения достигла ПП ($q^k = 0$) и вектор ее корости направлен наружу (за пределы ПП точка выйти не может). В всех остальных случаях при движении изображающей точки центр ПП остается на месте, а радиус ρ^k уменьшается.

Предел текучести подэлемента связывается с радиусом ПП выражением

$$s_t^k = s_{t0}^k + L^k \rho^k, \quad (10)$$

где s_{t0}^k - начальный предел текучести подэлемента, L^k - константа материала.

Система уравнений (1) - (10) является замкнутой и определяет реологическую модель материала, которая, обладая всеми достоинствами структурной модели стабильной среды, описывает изотропное упрочнение при пропорциональном нагружении и дополнительное упрочнение при непропорциональных траекториях деформирования. Наличие второго слагаемого в правой части уравнения (9) позволяет учесть обратимость изотропного упрочнения и, в частности, описать разупрочнение материала при переходе от непропорционального нагружения (например, кругового) к пропорциональному. В этом состоит одно из отличий предлагаемой модели от модели Ohno, предусматривающей, помимо переноса, лишь расширение неупрочняющей области и, следовательно, описывающей необратимое изотропное упрочнение.

К идентифицируемым параметрам модели относятся следующие величины: G , $s_{t_0}^k$, g^k , C_1^k , C_2^k , L^k и реологическая функция Φ . Идентификация производится по результатам испытаний одного образца, проведенного по программе (один из возможных вариантов): циклическое пропорциональное нагружение до стабилизации, "затухание", нагружение по круговой траектории с той же интенсивностью размаха деформации до стабилизации, "затухание", циклическое пропорциональное нагружение (несколько циклов). При необходимости учета ползучести в материале в одном из стабильных циклов на начальном этапе пропорционального нагружения осуществляется выдержка, и по полученной кривой ползучести строится реологическая функция. Количество подэлементов n выбирается соответственно требуемой точности в пределах 2 - 8, но при необходимости отражения тонких эффектов сложного нагружения их число может быть увеличено.

Для оценки адекватности модели проведено сопоставление расчетных траекторий деформирования для некоторых программ нагружения образца с экспериментальными данными, а также с результатами расчетов по структурной модели стабильной среды и по модели Ohno. Вся расчеты выполнены на ПЭВМ MAZOVIA CM 1914 по разработанным на языке Фортран 4 программам.

При циклическом пропорциональном нагружении модель с III и модель Ohno описывают изотропное упрочнение и стабилизацию свойств материала после некоторого числа циклов. Модель стабильной среды дает диаграмму деформирования, замыкающуюся после первого цикла нагружения.

На рис.3 приведены расчетные и экспериментальная траектории напряжений в состоянии стабилизации при круговой траектории деформирования. Сплошная линия соответствует эксперименту, штриховая - расчету по модели с III, штрихпунктирная - модели стабильной среды, штрихпунктирная с двумя точками - модели Ohno. Эти обозначения сохранены и на всех последующих рисунках. Число подэлементов, принятное в модели с III и в модели стабильной среды, равно 5.

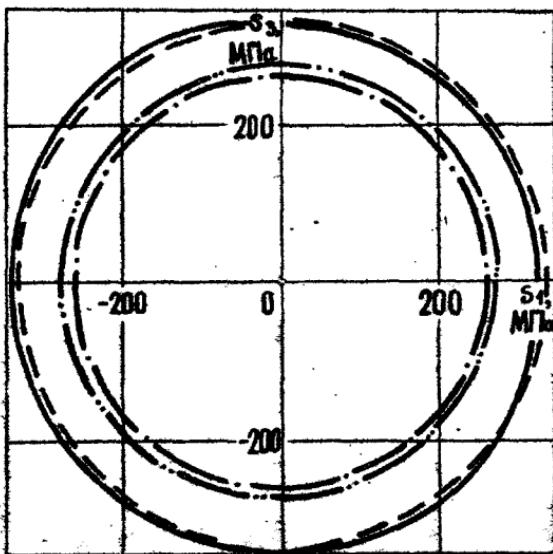


Рис. 3. Круговое нагружение, стабильный цикл;
ХН55МВЦ. $T = 600^{\circ}\text{C}$

Как видно из рисунка, ближе всего эксперименту соответствует расчет по модели с III. Модель Ohno отражает дополнительное упрочнение материала, но лишь частично, поскольку в соответствии с этой моделью увеличение размера неупрочняющей области и связанное с ним дополнительное изотропное упрочнение при переходе от пропорционального нагружения к непропорциональному возможно лишь за счет разориентации векторов напряжения и деформации.

Отметим, что модель стабильной среды на круговой траектории дает диаграммы деформирования не упрочненные, а разупрочненные по сравнению со случаем пропорционального нагружения (это связано с разориентацией векторов напряжений в подэлементах модели).

На рис.4 показаны диаграммы деформирования при циклическом растяжении-сжатии, проведенном сразу после стабилизации образца на круговой траектории нагружения. Модель с III отражает процесс разупрочнения в материале, тогда как модель стабильной среды и модель Оюто дают диаграммы, замыкающиеся после первого цикла нагружения.

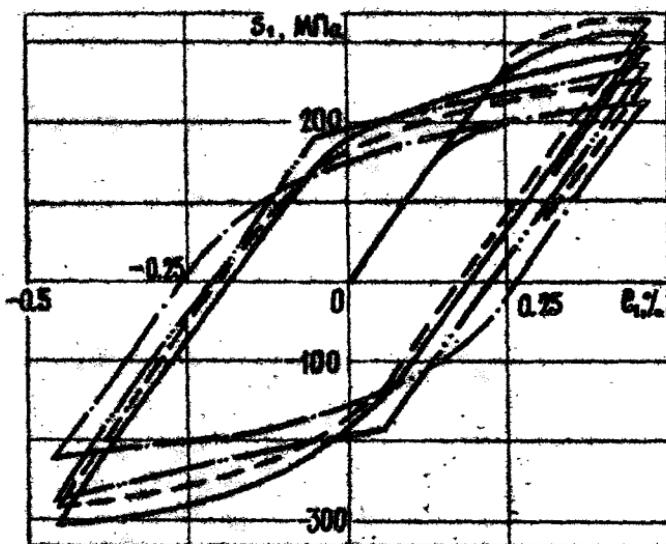


Рис. 4. Циклическое растяжение-сжатие после кругового нагружения; XН55МВЦ, $T = 600^{\circ}\text{C}$

На рис.5 показаны кривые ползучести в первом полуникле кручения после стабилизации материала на круговой траектории деформирования. Для снятия деформационной анизотропии предварительно было проведено "затухание". Кривая ползучести по модели с III практически совпадает с экспериментальной кривой.

Модель стабильной среды и модель Ойно дают существенно завышенные результаты как по накопленной деформации, так и по скорости установившейся ползучести. Различие с экспериментом в скоростях составляет для модели Ойно около 30%, а для модели стабильной среды - 110%.

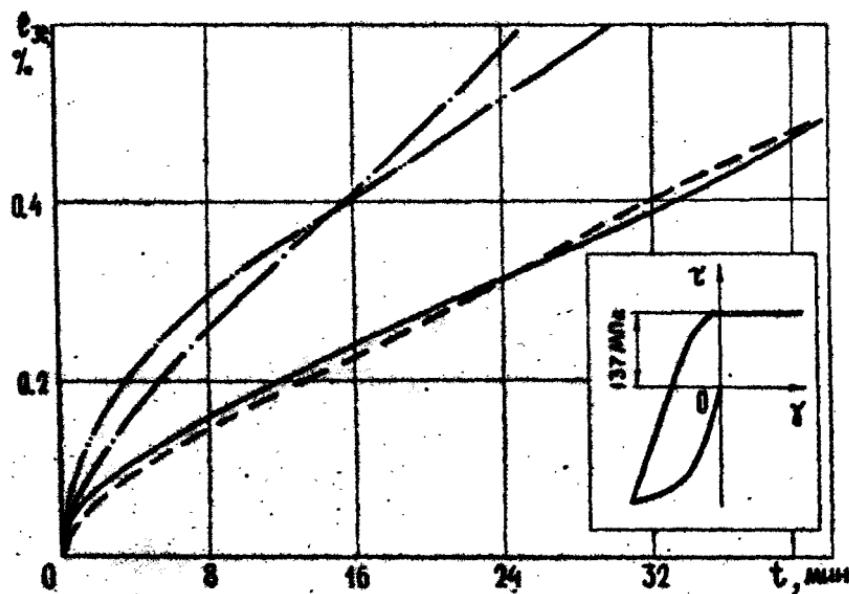


Рис. 5. Ползучесть при кручении после кругового нагружения; XN55MFI, $T = 700^{\circ}\text{C}$

Предлагаемая модель не описывает "поперечное" упрочнение материала и связанную с ним анизотропию разупрочнения при переходе от непропорционального нагружения к пропорциональному. Попытка учесть этот фактор потребовала бы введения эллипсовидных поверхностей текучести подэлементов, что существенно усложнило бы модель. Величина "поперечного" упрочнения в 3-4 раза меньше дополнительного изотропного упрочнения материала на траекториях деформирования в виде круга, квадрата, и в первом приближении ее можно пренебречь.

4. РАСЧЕТ ОБОЛОЧКИ, НАГРУЖЕННОЙ ДВИЖУЩИМСЯ ТЕПЛОВЫМ ПОЛЕМ

Возможное направление для практического приложения разработанной модели - технологическое упрочнение элементов конструкций с помощью циклически изменяющихся во времени нагрузок, вызывающих непропорциональное нагружение материала и, вследствие эффекта дополнительного упрочнения, улучшение его свойств. Такими нагрузками могут быть: нормальная сила и крутящий момент, несинфазно прикладываемые к детали или ее заготовке, нормальная сила и давление и т.п.. Достаточно простым и эффективным способом нагружения труб, валов являются тепловой фронт или тепловая волна, движущиеся вдоль оси детали.

В качестве примера проведен расчет на ЦЭВМ кинетики деформирования свободной тонкостенной цилиндрической оболочки при ее циклическом нагружении осесимметричным температурным полем в виде волны, движущейся с постоянной скоростью в осевом направлении. Длина оболочки полагалась бесконечной, радиус срединной поверхности R , толщина стенки $2h$, рис.6.

Для численного решения задачи координата длины z была заменена на относительную координату ϑ в соответствии с выражением

$$\vartheta = \pi / 2 + \arctg z / \xi .$$

где ξ - константа, имеющая размерность длины и характеризующая, насколько длинная часть оболочки в окрестности точки $z = 0$ ($\vartheta = \pi / 2$) рассматривается относительно подробно. Такая замена позволила координировать концы оболочки ($z = -\infty$, $z = +\infty$) конечными значениями координаты ϑ ($\vartheta = 0$, $\vartheta = \pi$). Вся оболочка была разбита поперечными сечениями на 40 участков равной длины по координате ϑ , в каждом сечении счет шел по пяти точкам (см. рис.6).

Расчет кинетики проводился шагами, на каждом шаге приращение неупругой деформации определялось по методу дополнительных деформаций. Решение было разделено на две независимые части. Первая часть, названная "упругим" решением*, заключалась в том,

* при решении "упругой" задачи использованы теоретические разработки, выполненные И.А.Ивановым, О.С.Садаковым, А.Е.Харитончиком

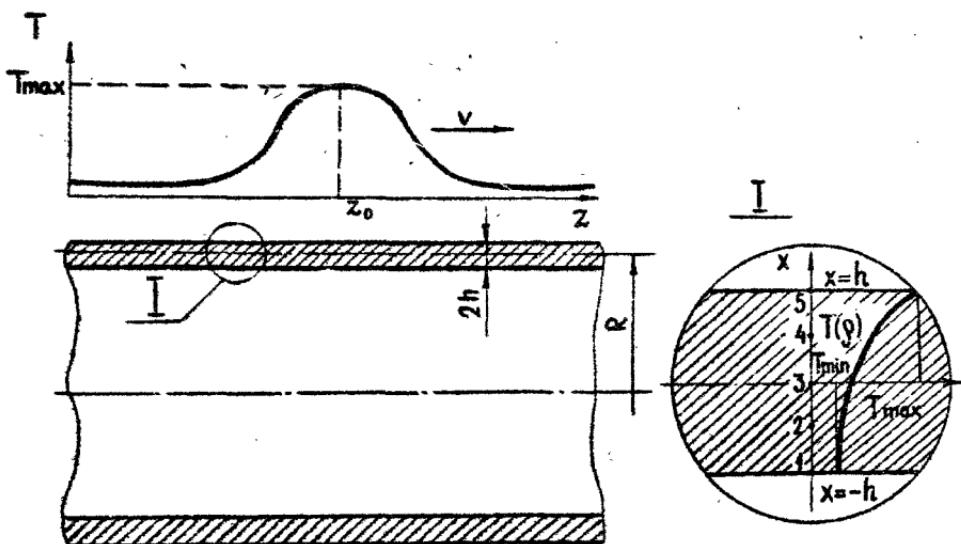


Рис. 6. Термовое нагружение оболочки: $T(p)$ – функция распределения температуры по толщине оболочки; $T_{\max} = 650^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 50^{\circ}\text{C}$, $R = 600 \text{ мм}$, $2h = 15 \text{ мм}$

что для каждого фиксированного момента времени по заданной внешней нагрузке и температурному полю, а также по полям неупругих (дополнительных) деформаций определялось поле полных деформаций. Для этого использованы уравнения термоупругости (с дополнительными деформациями). Вторая часть – "неупругое" решение, которое проводилось независимо для каждого элемента объема и состояло в определении кинетики неупругого деформирования по известной истории изменения напряжения и температуры (или деформации и температуры). В результате расчета получены поля напряжений и деформаций в оболочке за несколько десятков циклов ее нагружения подвижной тепловой волной.

На рис.7 показана траектория пластических деформаций на двух циклах нагружения для точки 4 (см. рис.6) в сечении $z = 0$. (в окрестностях этого сечения расчет проводился с повышенной точностью). По оси абсцисс отложена пластическая деформация в осевом направлении, по оси ординат – в окружном. Как видно из

рисунка, материал оболочки испытывает непропорциональное деформирование. Это приводит к дополнительному изотропному упрочнению, заметно влияющему на процесс накопления пластической деформации.

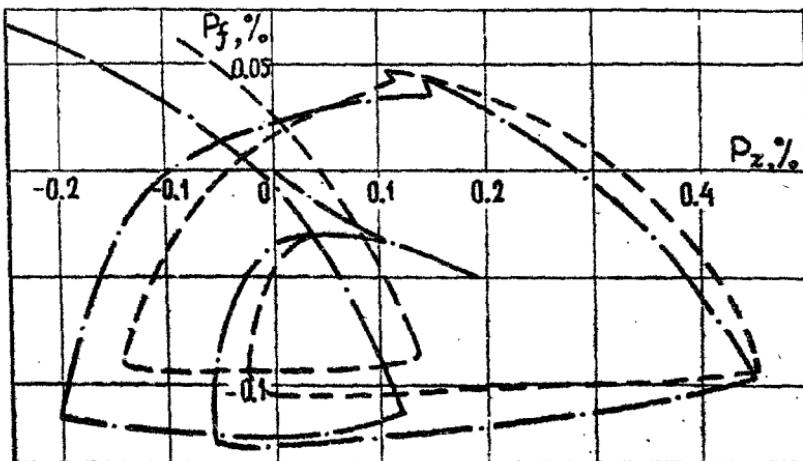


Рис. 7. Траектории пластических деформаций в оболочке; точка 4, $x = 3.75$ мм

5. ВЫВОДЫ

В диссертационной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования, относящиеся к проблеме описания деформационных свойств конструкционных сплавов в условиях повторно-переменного непропорционального нагружения. Основные результаты сводятся к следующему:

1. Исследованы реологические свойства сплавов ХН55МВИ, ЗП 864 при нормальной и повышенных (600 , 700°C) температурах. Установлено, что степень изотропного упрочнения при циклическом нагружении зависит от вида траектории деформирования. При смене одной траектории пропорционального деформирования другой траекторией происходит скачкообразный рост интенсивности размаха напряжения, достигающий 10–12%. При нагружении по траекториям, имеющим форму круга или квадрата материал получает дополнительное

упрочнение: интенсивность размаха напряжения в цикле возрастает по сравнению с пропорциональным деформированием на 30% и более (при одинаковой интенсивности размаха деформации). Переход к пропорциональной траектории деформирования, осуществляемый после того, как было достигнуто состояние стабилизации на круговой траектории нагружения, вызывает разупрочнение материала с последующей стабилизацией. Разупрочнение соответствует направлению траектории деформирования, свойства материала в других направлениях (в частности, в направлении, перпендикулярном траектории деформирования) изменяются в меньшей степени. При чередовании траекторий непропорционального и пропорционального нагружения процессы упрочнения и разупрочнения повторяются циклическим образом. В испытаниях при повышенной температуре показано, что "поперечное" и дополнительное упрочнение материала существенным образом влияют на ползучесть в материале: скорость установившейся ползучести снижается в несколько раз.

Испытания стали 40Х показали, что и в разупрочняющихся материалах в той или иной степени проявляются все особенности изотропного упрочнения (на фоне обычного разупрочнения).

2. Разработана модель, описывающая пластичность и ползучесть материала с учетом особенностей изотропного упрочнения при непропорциональном нагружении. В основу модели положены структурная модель среды и описание неупрочняющей области в пространстве пластических деформаций. Изотропное упрочнение связывается с размерами этой области, ограниченной поверхностью памяти. Приводятся определяющие уравнения модели и методика ее идентификации. Для оценки точности проводится сопоставление расчетов по предлагаемой модели с экспериментальными данными, а также с результатами расчетов по другим теориям пластичности. Сопоставление показывает хорошее соответствие модели эксперименту.

3. В качестве возможного практического приложения разработанной модели материала предлагается способ технологического упрочнения элементов конструкций, имеющих трубчатую форму. Проведен расчет тонкостенной цилиндрической оболочки, нагруженной осесимметричным температурным полем в форме волны, движущейся в осевом направлении с постоянной скоростью. Показано, что траектории деформаций в материале оболочки отличны от пропорциональных: при циклическом прохождении тепловой волны

материал получает дополнительное упрочнение. Следовательно, такой способ упрочнения труб может быть использован для повышения их несущей способности. На практике это реализуется, например, с помощью индуктивного нагрева наружной поверхности труб при одновременном охлаждении внутренней.

Основное содержание диссертации изложено в риотах:

1. Понькин А.В. Учет изотропного упрочнения в расчетах элементов конструкций при циклических нагрузках / Тез. докл. областной научно-практической конференции "Участие молодых ученых и специалистов в реконструкции и модернизации предприятий, во внедрении новой техники и технологии", г. Челябинск, 23-24 октября 1996 г.- Челябинск, 1986.- С. 18-19.

2. Понькин А.В., Иванов И.А., Апайчев М.В. Влияние обратимого изотропного упрочнения на пластичность и ползучесть при циклическом непропорциональном нагружении // Тез. докл. III Всесоюз. симпоз. "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии", г. Житомир, 24-26 октября 1989 г.- Киев: ИПП АН УССР, 1989.- С. 43-44.

3. Апайчев М.В., Иванов И.А., Понькин А.В. Особенности деформирования конструкционных сплавов в условиях непропорционального нагружения // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузлениях: Тематический сборник научных трудов. - Челябинск: ЧИИ, 1989.- С. 3-7.

4. Структурная модель среды для описания изотропного упрочнения при непропорциональном нагружении / Иванов И.А.. Понькин А.В.; Челябинск. гос. техн. ун-т.-Челябинск, 1990.- 10 с.- Деп. в ВИНИТИ 20.12.90. 6359-В90.

5. Апайчев М.В., Иванов И.А., Понькин А.В. Моделирование эффектов изотропного упрочнения при непропорциональном циклическом нагружении // Проблемы прочности.- 1991. № 1.- С. 47-51.

Подпись

Подписано к печати 07.08.92. Формат 60Х90 1/16. Печ. л. 1.
Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 109/300.

УОП ЧГТУ. 454080. Челябинск. пр. им. В.И.Ленина, 76.