

1.02.06
P 319
V
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Ребяков Юрий Николаевич

УДК 669.018.4:620.178.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ
НАГРУЖЕНИЯХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК

Специальность 01.02.06 - "Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры"

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

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Соболев Н.Д.,
кандидат технических наук,
доцент Икрин В.А.

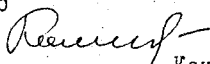
Ведущая организация – Институт проблем прочности АН УССР.

Защита состоится 19 декабря 1983 г. на заседании
специализированного совета Д.053.13.01 Челябинского по-
литехнического института им. Ленинского комсомола по ад-
ресу: 454044, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челяб-
инского политехнического института им. Ленинского комсомола

Автореферат разослан "24 октября" 1983 г.

Учёный секретарь специализированного
совета кандидат технических наук,
доцент



Кононов К.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема повышения рабочих параметров современных высокотемпературных энергетических установок не может быть решена без адекватных методов оценки их работоспособности. В большинстве случаев конструктивные элементы, испытывающие неупругие деформации, работают в условиях нестационарных тепловых и механических воздействий. Это делает актуальной задачу исследования и математического описания деформационного поведения материалов при неупругом циклическом нагружении в условиях повышенных температур, когда заметную роль может играть ползучесть. До настоящего времени остаются мало исследованными эффекты изотропного (циклического) изменения свойств материалов при различной форме цикла, взаимовлияние процессов кратковременного неупругого деформирования и ползучести и другие особенности деформационного поведения материалов при циклическом нагружении. При расчётных оценках прочности и долговечности часто основываются на независимости двух процессов необратимой деформации, что может приводить к ошибкам, в особенности для конструкций, работающих в условиях частого чередования переходных и стационарных режимов.

В связи с изложенным важной проблемой является исследование поведения применяемых жаропрочных сталей и сплавов при различных, в том числе сложных программах знакопеременного циклического деформирования (без выдержек и с выдержками в циклах), характерных для условий эксплуатации газотурбинных и атомных энергетических установок, авиационной и ракетной техники.

Целью работы является экспериментальное изучение изотропного упрочнения и разупрочнения, деформационной анизотропии и взаимного влияния кратковременной неупругой и длительной (вязкой) деформаций в условиях знакопеременного циклического деформирования применительно к группе широко используемых в современных энергетических установках хромоникелевых жаропрочных сплавов, использование полученных экспериментальных данных для уточнённой расчётной оценки несущей способности некоторых элементов энергетического оборудования.

В работе решаются следующие задачи.

1. Создание средств испытаний, позволяющих в автоматическом режиме осуществлять разнообразные программы неупругого циклического нагружения как без выдержек, так и с этапами ползучести или релаксации в цикле.

2. Разработка методик экспериментального изучения деформацион-

ного поведения хромоникелевых сплавов при циклическом нагружении в условиях ползучести.

3. Исследование диаграмм циклического деформирования при различных амплитудах деформации в зависимости от предшествовавшей истории их изменения, скоростей нагружения, температур и длительности этапов выдержек в цикле (для двенадцати марок жаропрочных сталей и сплавов, применяемых в энергомашиностроении).

4. Исследование закономерностей ползучести в условиях неупругого знакопеременного деформирования.

5. Применение полученных данных о деформационном поведении материала при неупругом циклическом нагружении для уточнённой расчётной оценки несущей способности диска маневренной газовой турбины и перфорированной части опоры теплообменника ядерного реактора ВМ-600.

Научная новизна. I. Создана программная установка для малоцикловых испытаний при кручении, отличающаяся от существующих более широкими функциональными возможностями (мягкое и жёсткое нагружение с этапами ползучести или релаксации как в одном, так и в обоих полциклах, другие программы) и повышенной точностью поддержания параметров цикла в процессе испытаний.

2. Разработаны методики экспериментального изучения диаграмм циклического деформирования и кривых ползучести (релаксации) материала при его стабильном состоянии в условиях циклического кручения с использованием минимального количества образцов.

3. Для группы стабилизирующихся хромоникелевых сплавов установлена зависимость диаграмм циклического деформирования от размаха деформации в предшествовавших циклах и выявлено "разупрочняющее" влияние выдержек на последующие диаграммы деформирования.

4. Экспериментально установлено центральное подобие стабилизированных диаграмм деформирования исследуемых материалов, полученных при различных размахах деформации, скоростях деформирования, а также следующих за этапом выдержки.

5. Обнаружены эффекты изменения скорости ползучести в связи с эффектами циклического упрочнения и разупрочнения.

6. На основе экспериментальной проверки подтверждена возможность количественного описания кривых ползучести при знакопеременном деформировании с использованием разработанного на кафедре сопротивления материалов ЧИИ варианта структурной модели реономной среды. Конкретизирована методика ускоренной идентификации модели.

7. Предложена и обоснована схематизация диаграмм циклического

деформирования без выдержек и с выдержками в цикле с целью получения деформационных характеристик, используемых для расчёта условий знакопеременного течения в неизотермическом рабочем цикле на основе теории приспособляемости.

Практическая значимость. Получены характеристики неупругого циклического деформирования группы жаропрочных сталей и сплавов на никелевой основе (X18N9, X18N9T, I2X18N10T, X16N11M3, X23N18, 4X12N8G8MФБ, XH35BT, XH51B1TЮKФР, XH70BMФТЮ, XH70BMЮT, XH73MБТЮ, XH60MЮBT) при температурах 20-900°C, необходимые для оценки работоспособности лопаток и дисков ГТД и внутрикорпусных элементов ядерных энергетических установок. Полученные экспериментальные данные использованы для уточнённой оценки несущей способности дисков ГТД и внутрикорпусных элементов энергетического ядерного реактора БН-600.

Разработанные установка и методика изучения диаграмм циклического деформирования и кривых ползучести могут быть использованы при исследовании малоциклового прочностии в условиях нормальных, повышенных и высоких температур различных сталей и сплавов.

Данная диссертационная работа входит в план НИР кафедры сопротивления материалов, динамики и прочностии машин ЧПИ. Её результаты использованы при выполнении заданий Координационного плана НИР АН СССР по проблеме "Механика твёрдого тела" (п. I.Ю.2.5), программы Госстандарта № 450-I.09.82 (проблемы I.09.06.0I НИР, I.09.06.34 МР), целевой комплексной программы О.Ц.002 (этап I4, задание 09, подпрограммы О.0I.0IЦ).

Результаты диссертационной работы внедрены в НПО "Пролетарский завод" г. Ленинград и КТБ г. Горький со значительным экономическим эффектом, подтверждённым приложенными актами внедрения.

Апробация работы. Материалы работы докладывались на У Всесоюзном совещании по вопросам статической и динамической прочностии материалов и конструктивных элементов (г. Киев, 1967г.), на X-XIV Научных совещаниях по тепловым напряжениям в элементах конструкций (г. Канев, 1969, 1970, 1972, 1974, 1977гг.), на Всесоюзном симпозиуме по малоциклового усталостии при повышенных температурах (г. Челябинск, 1974г.), на Всесоюзных совещаниях по прочностии двигателей (г. Куйбышев, 1976, 1977гг.), на IY Международной конференции по измерению и расчёту напряжений (г. Будапешт, 197г.), на Всесоюзном симпозиуме "Ползучесть в конструкциях" (г. Днепропетровск, 1982г.), на научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1968-1983гг.).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 18 научных статей.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы (130 наименований) и приложения. Она изложена на 152 страницах основного текста и содержит 9 таблиц, 86 рисунков.

ПРОГРАММНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ВДЕРЖКАМИ

Разработанная программная установка предназначена для испытаний тонкостенных трубчатых образцов при циклическом знакопеременном кручении в условиях повышенных температур (постоянных и переменных). Установка включает следующие основные системы: нагрева и автоматического поддержания заданного температурного режима образца (до 1000°C); автоматического управления нагружением по заданной программе; измерения и регистрации параметров циклического деформирования.

Нагрев образца производится пропусканием тока. Усовершенствованный терморегулятор, в котором использован семисторный преобразователь для автоматического управления током нагрева, обеспечивает поддержание заданной постоянной температуры образца или закона её изменения (синхронно с изменением усилия или деформации). Ошибка в поддержании температуры в контрольном участке образца определяется классом используемого регистрирующего прибора.

Автоматическое нагружение образца и регулирование практически постоянной скорости деформирования осуществляется малоинерционным двигателем постоянного тока через реверсивный редуктор, управляемый разработанным блоком автоматики на логических элементах И-НЕ и Д-триггерах. Для замера деформации на базе 10 мм в средней части образца применён неохлаждаемый контактный деформометр. Замер усилия производится валом-динамометром с помощью тензорезисторов. Для регистрации диаграмм деформирования используется двухкоординатный самописец типа ПДП4-002 (класс 0,25); а для синхронной записи изменения усилия и деформации во времени - автоматические мосты переменного тока типа КСМ4 (класс 0,25).

Использование управляемого реверсивного редуктора позволяет производить знакопеременное нагружение образца без реверса двигателя и дискретно (путём периодического выключения электромагнитных муфт) с высокой точностью (ошибка не более $\pm 0,5\%$) поддерживать

заданное постоянное напряжение или деформацию на базе измерения. Основные типы циклов, которые можно реализовать на установке, приведены на рис. I. Выдержка в цикле (рис. I в, г, д) может быть ограничена как достижением заданной деформации ползучести, так и по времени t . В режиме релаксации ограничение только по времени (рис. I ж, з). Возможности установки не исчерпываются указанными вариантами циклов, они могут быть значительно расширены при переходе на полуавтоматическое управление.

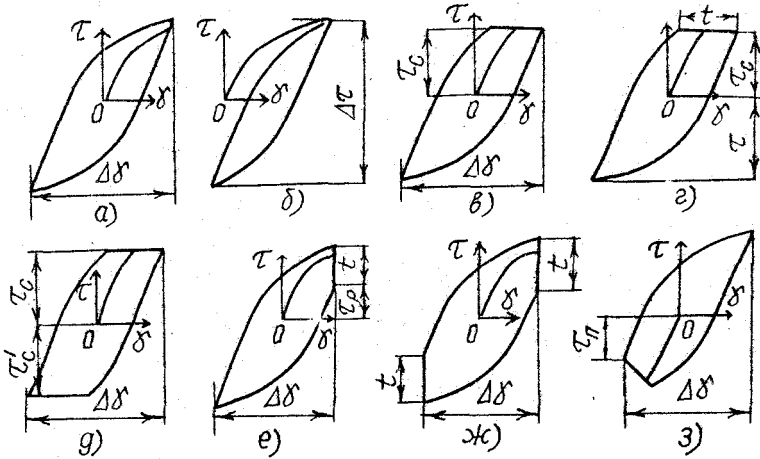


Рис. I. Основные программы неупругого циклического нагружения
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ НЕУПРУГОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Вопросам экспериментального исследования неупругого циклического знакопеременного деформирования при нормальных и повышенных температурах посвящены работы С. В. Серенсена, Р. М. Шнейдеровича, А. П. Гусенкова, Н. Н. Махутова, В. Т. Трощенко, Г. Г. Медекшаса, Ю. В. Милосердина, А. Д. Трухния, Д. Морроу, Р. Лэндграфа, Н. Янсейла, Е. Кремпла, М. Кавамото и др.

Исследования проводились на сталях аустенитного класса X18N9, X18N9T, 12X18N10T, X23N18, X16N11M3, XH35BT (ЭИ612), 4X12N8Г8МБФ (ЭИ481) и сплавах на никелевой основе XH51ВМТЮКФР (ЭП220), XH70ВМФТЮ (ЭИ826), XH70ВМЮТ (ЭИ765), XH60МЮВТ (ЭП539), XH73МБТЮ (ЭИ698) в диапазоне 20 - 900°C. Как показали опыты, большинство указанных материалов при рассматриваемых амплитудах деформаций ($2 \neq 15$ деформациям предела пропорциональности) и скоростях нагружения (в диапазоне $\dot{\epsilon} = 0,01-$

- 15,0%/мин) в соответствующих температурных интервалах являются циклически стабилизирующимися после стадии изотропного упрочнения или разупрочнения (начально разупрочняющимся является сплав ЭИ765 при температурах 700-800°C и деформациях $\Delta\delta \leq 1,8\%$). Стали ЭИ612 и ЭИ481 при температурах 650 и 700°C, соответственно, являются непрерывно разупрочняющимися. Обычно стабильное состояние составляет значительную часть общей долговечности образца и поэтому представляет основной интерес при изучении деформационных характеристик.

Для получения стабилизированных диаграмм циклического деформирования при различных размахах деформации $\Delta\delta$ в диапазоне температур 20-900°C уточнена методика Р.Лэндграфа и Д.Морроу, применяемая обычно для получения зависимостей между амплитудами напряжений и деформаций в состоянии стабилизации при нормальной температуре. Испытания при фиксированной температуре проводили на одном образце при ступенчатом возрастании значения $\Delta\delta$ после стабилизации диаграммы на каждой ступени. Аналогичная методика была разработана для получения стабилизированных диаграмм деформирования и кривых ползучести при циклическом нагружении с выдержками при варьируемых параметрах цикла. Испытания с этапами ползучести в цикле проводились также на одном образце с возрастающей ступенями (после стабилизации) деформацией $\Delta\delta$. Внутри ступени и между ступенями осуществлялось деформирование без выдержек с плавно уменьшающейся амплитудой деформации для снятия деформационной анизотропии, возникшей в результате предшествующего деформирования. Применение данной методики позволяет более отчетливо выявить основные закономерности поведения материалов (уменьшается разброс результатов), а также снизить затраты материала и времени.

При повышенных температурах стабилизированные диаграммы деформирования, полученные при различных размахах $\Delta\delta$, могут существенно отличаться друг от друга (до 70% по напряжениям). Это иллюстрирует рис.2 на примерах диаграмм стали Х18Н9 и сплава ЭИ826 ($\bar{S} = S/\tau_{пц}^{(0)}$, $\bar{\epsilon} = \epsilon/\delta_{пц}^{(0)}$, S, ϵ - изменение напряжения и деформации в подцикле с момента разгрузки; $\tau_{пц}^{(0)}$, $\delta_{пц}^{(0)}$ - предел пропорциональности и соответствующая ему деформация при начальном нагружении), полученные при жестком нагружении. Отметим, что при данном значении $\Delta\delta$ стабилизированные диаграммы не зависят от коэффициента асимметрии цикла.

Отличие диаграмм $\bar{S} \sim \bar{\epsilon}$ в зависимости от размаха связано с взаимодействием процессов упрочнения, в связи с неупругим деформированием, и разупрочнения, определяемого длительностью процесса

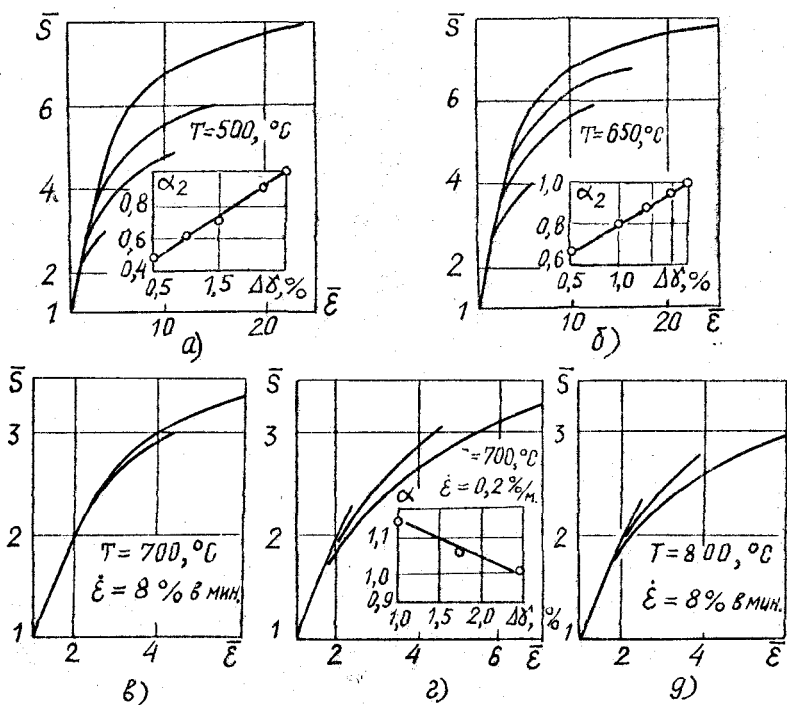


Рис.2. Кривые циклического деформирования стали X18N9 (а, б) и сплава Zh826 (в, г, д)

деформирования. Стабильная диаграмма при фиксированном размахе может рассматриваться как результат динамического равновесия между этими процессами: при изменении размаха оно устанавливается на новом уровне. У разных сплавов, в зависимости от температуры и скорости $\dot{\epsilon}$, с ростом $\Delta\delta$ может превалировать упрочнение (рис.2а, б) или разупрочнение (рис.2г, д). При определённых значениях температуры и скорости $\dot{\epsilon}$ диаграммы могут быть близки к обобщённой кривой (рис.2в).

Анализ показал, что стабильные диаграммы циклического деформирования конкретного сплава, полученные при различных размахах и скоростях деформирования, практически центрально подобны. Коэффициент центрального подобия α удобно определять по отношению к диаграмме деформирования $\bar{S} = \bar{F}(\bar{\epsilon})$ при некотором базовом размахе $\Delta\delta_B$ и базовой скорости $\dot{\epsilon}_B$ (например, наибольшие из исследовавшихся значений $\Delta\delta$ и $\dot{\epsilon}$). Тогда при произвольных $\Delta\delta$ и $\dot{\epsilon}$

$$\bar{S} = \alpha \bar{F}(\bar{\epsilon}/\alpha). \quad (1)$$

Коэффициент подобия может быть представлен в виде $\alpha(\Delta\delta, \dot{\epsilon}) = \alpha_1(\dot{\epsilon})\alpha_2(\Delta\delta)$. Как показали эксперименты, функции $\alpha_2(\Delta\delta)$ и $\alpha_1(\dot{\epsilon})$ близки к линейным относительно аргументов $\Delta\delta$ (или $\lg\Delta\delta$) и $\lg\dot{\epsilon}$ (рис. 2):

$$\alpha_2(\Delta\delta) = 1 - \beta\delta(\Delta\delta), \quad \delta(\Delta\delta) = \Delta\delta_5 - \Delta\delta, \quad (2)$$

$$\alpha_2(\lg\Delta\delta) = 1 - \beta_L\delta(\lg\Delta\delta), \quad \delta(\lg\Delta\delta) = \lg\Delta\delta_5 - \lg\Delta\delta, \quad (2a)$$

$$\alpha_1(\dot{\epsilon}) = 1 - c\delta(\lg\dot{\epsilon}), \quad \delta(\lg\dot{\epsilon}) = \lg\dot{\epsilon}_5 - \lg\dot{\epsilon}. \quad (3)$$

Если стабилизация осуществлялась при убывающем (ступенями) размахе $\Delta\delta$, диаграммы существенно отличаются от описываемых выражениями (1)–(3) (рис. 3). В этом случае функция (2) должна допол-

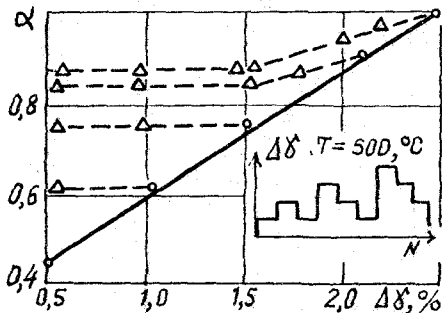


Рис. 3. Зависимость α от истории изменения размаха $\Delta\delta$ (X18N9)

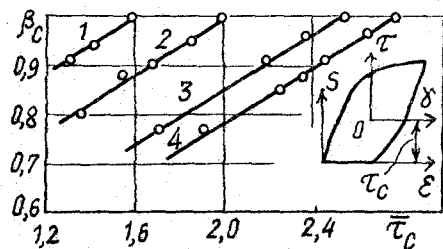


Рис. 4. Зависимость β_c для стали X18N9 (650°C) от уровня τ_c и размаха $\Delta\delta$: 1- $\Delta\delta=0,3\%$; 2- $\Delta\delta=0,5\%$; 3- $\Delta\delta=1,0\%$; 4- $\Delta\delta=1,5\%$

нительно содержать значение максимального размаха $\Delta\delta_m$ за всю предысторию нагружения. Характерным является наличие порогового значения $\Delta\delta_{кр} = 1,5\%$, ниже которого диаграммы с разными $\Delta\delta$, но одинаковым значением $\Delta\delta_m$ в предыстории ложатся на единую диаграмму. Соответствующее обобщение функции $\alpha_2(\Delta\delta)$ имеет вид

$$\alpha_2(\Delta\delta) = 1 - \beta(\Delta\delta_5 - \Delta\delta_m) - \beta_1\{\Delta\delta_m - \Delta\delta_{кр}\} + \beta_2\{\Delta\delta - \Delta\delta_{кр}\}, \quad (4)$$

где фигурные скобки означают функцию $\{x\} = x \cdot H(x)$, ($H(x)$ - функция Хевисайда). Предыстория деформирования, естественно, несущественна в тех случаях, когда кривые деформирования при различных размахах $\Delta\delta$ образуют обобщенную диаграмму ($\beta = \beta_1 = 0$). При повышенных температурах (когда разупрочнение происходит наиболее интенсивно) для ряда сталей типа (X18N9, X23N18, X16NiM3) предыстория безразлична и при отсутствии обобщенной диаграммы ($\beta = \beta_1, \Delta\delta_{кр} = 0$). Установлено также, что функция (3) не зависит от предыстории изменения скорости деформирования.

При испытаниях с выдержками в цикле (ползучесть, релаксация, либо промежуточный процесс - рис. Iв, е, з) диаграммы быстрого деформирования до и после выдержки заметно отличаются друг от друга. Если первые могут быть описаны выражениями (I)-(4), вторые оказываются "разупрочнёнными" ровно настолько, чтобы цикл оказался замкнутым. Например, чем ниже уровень $\bar{\tau}_c = \tau_c / \tau_{пц}^{(0)}$ и больше деформация ползучести, тем сильнее разупрочнение (рис. 4). Как оказалось, диаграммы $\bar{S} \sim \bar{\epsilon}$ в полуцикле после выдержки можно также считать центрально подобными диаграммам без выдержки (I) (при соответствующих значениях $\Delta\delta$, $\dot{\epsilon}$). Коэффициент подобия β практически линейно зависит от значения τ_B , ($\tau_B = \tau_c$, $\tau_B = \tau_p$, $\tau_B = \tau_n$)

$$\beta = 1 - d_B \delta(\tau_B), \quad \delta(\tau_B) = \Delta\tau/2 - \tau_B. \quad (5)$$

Значения константы d_B могут быть одинаковыми в циклах различных типов, либо иметь различные значения для испытаний с ползучестью (d_c), релаксацией (d_p) и при промежуточном процессе (d_n). Константы d_c, d_p, d_n не зависят от размаха $\Delta\delta$ и от скорости $\dot{\epsilon}$.

Таким образом, достаточно иметь базовую диаграмму \bar{F} и значения констант b, c, d (последние приводятся в работе для исследуемых сталей и сплавов), чтобы получить диаграмму циклического деформирования при различных параметрах цикла

$$\bar{S} = \alpha \bar{F}(\bar{\epsilon}/\alpha), \quad \alpha = (1 + b\delta(\Delta\delta))(1 - c\delta(\dot{\epsilon}))(1 - d\delta(\tau_B)). \quad (6)$$

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ В УСЛОВИЯХ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Исследованию ползучести при переменных по знаку напряжениях (однократных и циклических) уделяется внимание в работах В.С. Наместникова, Л.Б. Гецова, Р.Н. Сизовой, Р.М. Шнейдеровича, А.П. Гусенкова, С.Т. Милейко, Г.Ф. Лепина, Е. Кремпла, Е. Вильсона и др. Большинство исследований относится к испытаниям по "прямоугольному" симметричному циклу (с одинаковыми значениями напряжений и временами выдержек в полуциклах растяжения и сжатия). В данной работе исследована кратковременная ползучесть циклически стабильного сплава ЭП220, упрочняющегося (ЭИ826, ЭИ698, XI8H9, XI6H1M3), разупрочняющегося с последующей стабилизацией (ЭИ765) и разупрочняющихся (ЭИ612, ЭИ481) сплавов по программам, приведённым на рис. I в, г, д и по "прямоугольному" симметричному циклу. Уровень напряжений $\tau_c = const$ в опытах составлял $(0,8 + 1,2) \cdot \tau_{пц}^{(0)}$. Получены кривые ползучести в последовательных полуциклах в процессе нагружения для каждой из программ. Их анализ показывает, что в каждом полуцикле ползучесть

начинается с неустановившейся стадии, причём, у сплавов ЭП220, ЭИ826, ЭИ698, ЭИ765, ЭИ612, ЭИ481 наблюдается существенное возрастание средней скорости ползучести на этой стадии от цикла к циклу (в 30-150 раз, по сравнению со скоростью в исходном нагружении) при постепенной стабилизации. Для разупрочняющихся сталей ЭИ612, ЭИ481 с стабилизации скорости не происходит. Характерная эволюция при "односторонней" и "двусторонней" ползучести иллюстрируется рис.5. Цифры возле кривых отвечают номеру полуцикла k . У сталей Х18Н9,

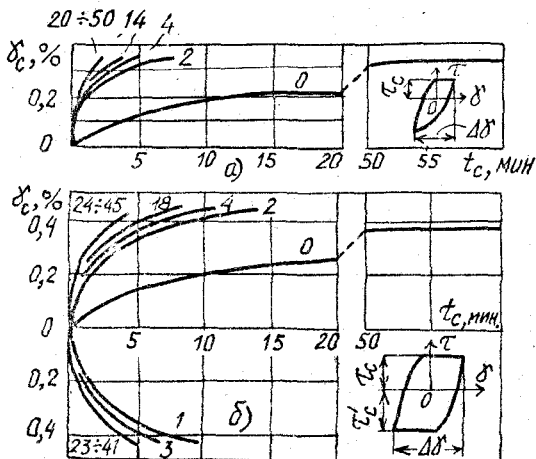


Рис.5. Кривые ползучести сплава ЭП220 (900°C) при $\tau_c = 137\text{МПа}$ в условиях знакопеременного циклического деформирования

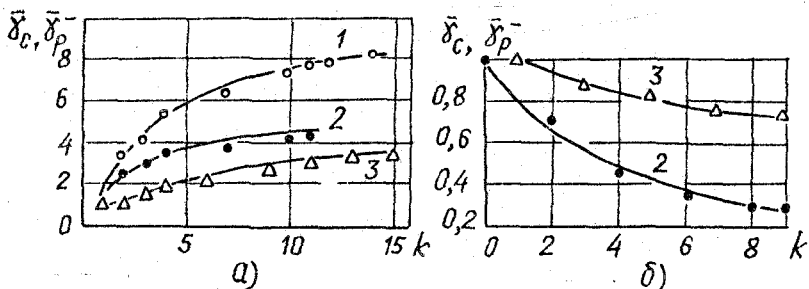


Рис.6. Деформация ползучести в последовательных полуциклах к первой (кривая 1) и пятой (кривая 2) минутам: а - ЭИ612 (650°C), $\tau_c = 230\text{МПа}$; б - Х18Н9 (650°C), $\tau_c = 62,5\text{МПа}$

Х16Н11М3 наблюдается, наоборот, уменьшение скорости ползучести в первых полциклах. Установлено, что процесс ползучести связан с характером и интенсивностью поциклового изменения пластической деформации в полцикле, имеющей знак, противоположный деформации ползучести $\delta_p^{-(k)}$. С увеличением этой деформации от цикла к циклу (рис. 6а, кривая 3, $\delta_p^{-(k)} = \delta_p^{-(k)} / \delta_p^{(0)}$) наблюдается увеличение деформации $\delta_c^{(k)} = \delta_c^{(k)} / \delta_c^{(0)}$ в последовательных полциклах нагружения по программе, приведённой на рис. 1в (кривые 1, 2). При уменьшении $\delta_p^{-(k)}$ (рис. 6б, кривая 3) возможно некоторое замедление ползучести; при практически неизменной деформации кривые ползучести в последовательных полциклах быстро стабилизируются.

С другой стороны, предварительные пластические деформации (не более 1%), одинаковые по знаку с деформацией ползучести, вызывают замедление процессов ползучести и релаксации.

Показано, что предыстория циклического деформирования может существенно изменять скорость установившейся ползучести $\dot{\delta}_{c \min}$, которую полагают зависящей только от напряжения и температуры. Для этого в стабильном, а для разупрочняющихся сталей ЭИ612, ЭИ481 в некотором произвольном, полциклах была увеличена продолжительность этапа ползучести до выхода на участок кривой, характеризующейся примерным постоянством скорости $\dot{\delta}_{c \min}^{(k)}$. В результате для стабильного и незначительно упрочняющихся перед стабилизацией сплавов ЭИ826, ЭИ698 скорость $\dot{\delta}_{c \min}^{(k)}$ оказалась равной скорости в исходном нагружении $\dot{\delta}_{c \min}^{(0)}$; у разупрочняющихся и разупрочняющихся перед стабилизацией материалов скорость $\dot{\delta}_{c \min}^{(k)}$ существенно выше скорости $\dot{\delta}_{c \min}^{(0)}$ (примерно в 2 + 7 раз). У интенсивно упрочняющихся перед стабилизацией сталей Х18Н9, Х16Н11М3, Х23Н18 циклическое упрочнение приводит к уменьшению скорости в 3-5 раз. Изменение скорости установившейся ползучести зависит от интенсивности процессов упрочнения (разупрочнения) при циклическом нагружении.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЮ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ С ЭТАПАМИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Для описания сложных процессов взаимовлияния пластической и вязкой деформаций наиболее удобен вариант структурной модели стабильной среды, разработанной на кафедре сопротивления материалов ЧПИ. Поведение элементарного объёма материала имитируется работой N одинаково деформируемых ($\epsilon = \epsilon_k, k=1,2,\dots,N$) подэлементов (П.Э.),

каждый из которых наделён свойством идеальной ползучести

$$\dot{\rho}_k = \Phi(\sigma_k / z_k, T_k). \quad (7)$$

Коэффициент подобия z_k есть постоянная идентифицирующая конкретный П.Э. Напряжения, неупругая деформация элементарного объёма определяются осреднением по П.Э. ($\sigma = \langle \sigma_k \rangle$, $\rho = \langle \rho_k \rangle$). С помощью разработанной методики испытаний были найдены определяющие функции модели аустенитной стали X18H9T, сплава ЭП220 и произведена проверка адекватности модели при ряде программ повторно-переменного деформирования с выдержками при температурах 650, 700°C (X18H9T) и 900°C (ЭП220). Расчёты кинетики деформирования тонкостенного трубчатого образца производили с помощью специальной вычислительной программы (Фортран IV ДОС ЕС ЭВМ). В качестве примера на рис.7 приведены опытные и расчётные (штриховые линии) кривые ползучести сплава ЭП220 на уровнях $\tau_{c1} = 148,8$ МПа и $\tau_{c2} = 90$ МПа после деформирования с размахом $\Delta\delta = 1\%$, а на рис.8 - кривые ползучести стали X18H9T при $\tau_c = 75$ МПа, $\Delta\delta = 1,5\%$. Как показали исследования, для рассмотренных сплавов и программ нагружения максимальное отклонение расчётных кривых ползучести от опытных не превышает 20% по деформациям.

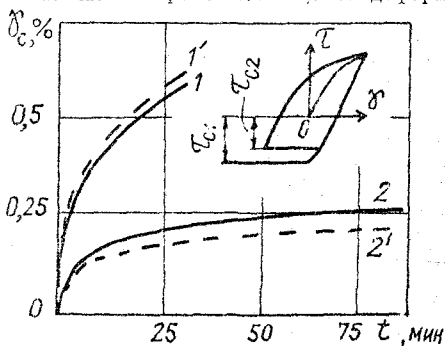


Рис.7. Кривые ползучести сплава ЭП220(900°C)

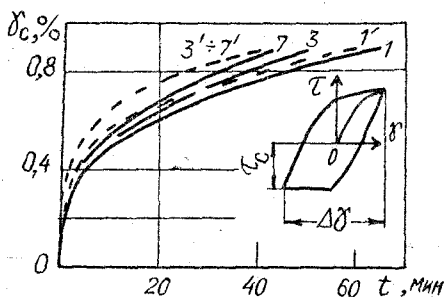


Рис.8. Кривые циклической ползучести стали X18H9T(650°C)

Данный вариант модели предназначен для описания поведения циклически стабильного материала. Существует другой, более сложный вариант, который отражает эффекты циклической нестабильности. И в этом случае соответствие достаточно удовлетворительное, хотя, например, эффекты истории изменения размаха $\Delta\delta$ и этот вариант не отражает.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАСЧЁТАХ НА ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТЬ

При оценке работоспособности конструкций в условиях неупругого циклического деформирования эффективными (особенно на первых стадиях проектирования) являются методы расчёта, базирующиеся на теории приспособляемости идеального упругопластического тела. Основные принципы и методы данной теории достаточно полно изложены в работах В.Койтера, Д.А.Гохфельда, О.Ф.Чернявского. Целью анализа условий приспособляемости является непосредственное (без поцикловое исследование кинетики деформирования) определение нагрузок и температур, отвечающих одному из предельных состояний конструкции - возникновение знакопеременного пластического течения (ЗПТ) или прогрессирующего накопления деформации. В данной работе методика расчёта на приспособляемость получила дальнейшее развитие, в частности, в связи с более точным и полным учётом реальных циклических деформационных свойств материалов. Предложен и обоснован способ схематизации стабилизированных диаграмм циклического изотермического и неизотермического деформирования без выдержек и с этапами ползучести различной длительности в цикле (при заданном допуске на ширину петли гистерезиса). Схематизация диаграмм неупругого деформирования базируется на использовании экспериментальных данных, полученных непосредственно при циклических (а не однократных, как это делалось ранее) нагружениях.

С использованием предложенной методики определения предела текучести аппроксимированных диаграмм выполнен уточнённый анализ несущей способности диска транспортной газовой турбины, изготовленной из сплава ЗИ765. Рабочий цикл диска включал быстрый разгон до максимальных оборотов, прогрев до температуры 800°C , стационарный режим длительностью 60 мин, снижение температуры и останов турбины. Расчёты показали, что несущая способность диска лимитируется условиями ЗПТ на дне замковой впадины, которое должно определяться с учётом ускорения ползучести материала диска в условиях знакопеременного циклического деформирования. При этом ошибка, связанная с использованием характеристик начального нагружения, идёт не в запас прочности.

Выполнен также проверочный расчёт (по условиям ЗПТ) перфорированной части опоры теплообменника атомного реактора БН-600, представляющей цилиндрическую оболочку из стали Х18Н9 диаметром

2200 мм и толщиной 30 мм, перфорированную отверстиями диаметром 105 мм по правильной треугольной сетке. Внешнее воздействие на перфорированную часть опоры состоит в изменениях температуры в связи с колебаниями уровня теплоносителя. Расчёт показал, что коэффициент запаса, рассчитанный с учётом изотропного упрочнения стали Х18Н9, в два раза выше коэффициента, установленного при использовании диаграммы начального нагружения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана программная установка для испытаний тонкостенных трубчатых образцов при циклическом знакопеременном кручении в условиях повышенных температур (постоянных и переменных), отличающаяся от существующих более широкими функциональными возможностями и повышенной точностью поддержания параметров цикла нагружения и заданной программы изменения температуры образца (до 1000°C). Установка позволяет осуществлять разнообразные программы нагружения: жёсткие и мягкие циклы с заданной степенью асимметрии по напряжениям или деформации, циклическое нагружение с включением в один или оба полуцикла этапов выдержек (ползучесть, релаксация, либо промежуточные между ними процессы).

2. Развита методика ускоренного получения серии стабилизированных диаграмм деформирования и кривых ползучести при циклических испытаниях с изменяющимися параметрами цикла, основанная на использовании одного образца.

3. Для большой группы жаропрочных хромоникелевых сталей и сплавов (Х18Н9, Х18Н9Т, Г2Х18Н10Т, Х23Н18, Х16Н11М3, ХН35ВТ, 4Х12Н8Г8МБФ, ХН51ВМТЮКФР, ХН70ВМФТЮ, ХН60МЮВТ, ХН70ВМЮТ, ХН73М6ТЮ) в диапазоне их рабочих температур (от 20 до 900°C) при жёстком нагружении исследованы диаграммы циклического деформирования при различных значениях амплитуды деформации (в диапазоне 2÷15 деформаций предела пропорциональности при начальном нагружении) и историях её изменения в процессе испытаний, а также в зависимости от скорости деформирования (в диапазоне 0,05÷15%/мин) и наличия этапов выдержек в цикле.

4. Установлено, что диаграммы циклического деформирования существенно зависят от размаха пластической деформации цикла.

5. Выявлено, что для значительно упрочняющихся перед стабилизацией аустенитных сталей (типа Х18Н9, Х23Н18, Х16Н11М3) при температурах ниже 600°C кривые деформирования зависят от истории изме-

нения размаха. Так, ступенчатое понижение размаха приводит к упрочнению материала, по сравнению с его состоянием при тех же размахах в условиях их последовательного увеличения до некоторого максимального значения. Особенностью нагружения является наличие порогового значения размаха (примерно 1,5%); ниже которого диаграммы с разными размахами составляют единую диаграмму.

6. Обнаружено "разупрочняющее" влияние выдержки в цикле на диаграмму в следующем за выдержкой полуцикле; оно зависит от уровня напряжения и длительности выдержки.

7. Установлено, что для исследуемых материалов диаграммы циклического деформирования, полученные при различных размахах деформации, скоростях деформирования и после этапов выдержек, обладают свойством центрального подобия. Предложены зависимости, позволяющие описывать диаграммы при различных условиях нагружения.

8. Исследованы особенности процесса ползучести в условиях знакопеременного циклического деформирования на стабильном (ХН51ВМТЮКФР), стабилизирующихся (Х18Н9, Х18Н9Т, Х16Н11М3, ХН70ВМФТЮ, ХН70ВМЮТ, ХН73МБТЮ) и разупрочняющихся (4Х12Н8Г8МФБ, ХН35ВТ) материалах.

9. Обнаружено, что при циклическом нагружении с выдержками ползучесть в каждом полуцикле включает первую фазу, причём, при испытании некоторых материалов наблюдается существенное увеличение средней скорости ползучести от цикла к циклу (в 30-150 раз, по сравнению с исходным нагружением) с последующей её стабилизацией. У разупрочняющихся сталей стабилизации скорости не наблюдается. Средняя скорость интенсивно упрочняющихся перед стабилизацией сталей Х18Н9, Х16Н11М3, Х23Н18) в первых циклах, наоборот, уменьшается. В данных условиях процесс ползучести связан с поцикловым изменением пластической деформации, по знаку противоположной деформации ползучести: с увеличением этой деформации от цикла к циклу наблюдается увеличение скорости ползучести, при её уменьшении - снижение скорости, а при практически постоянной деформации скорость ползучести по числу циклов быстро стабилизируется.

10. Установлено, что у стабильных и стабилизирующихся после незначительного упрочнения материалов (типа ХН70ВМФТЮ, ХН73МБТЮ, Х18Н9Т) скорость установившейся ползучести не зависит от истории циклического нагружения; с другой стороны, поведение интенсивно упрочняющихся сталей характеризуется уменьшением скорости установившейся ползучести, а разупрочняющихся - её увеличением.

11. Конкретизирована методика проведения экспериментов для

идентификации варианта структурной модели, разработанного на кафедре сопротивления материалов ЧПИ; определены параметры модели стали Х18Н9Т и сплава ХНБ1ВМТЮЖФР. На этих материалах выполнена проверка адекватности модели. Установлено, что модель описывает изменение скорости ползучести при пластических перегрузках того же знака, что и деформация ползучести, при переходе с большего уровня напряжений на меньший и, наоборот, при реверсе нагрузки. Достаточно удовлетворительно предсказываются кривые ползучести в стабильном цикле. Максимальное отклонение расчётных кривых от опытных не превышает 20% (по деформациям).

12. Предложена и обоснована схематизация диаграмм изотермического и неизотермического циклического деформирования без выдержек и с этапами ползучести в цикле с целью использования в задачах теории приспособляемости (определение условий знакопеременного пластического течения).

13. Произведён расчёт несущей способности диска маневренной ГТД. Он показал, что несущая способность диска лимитируется условиями знакопеременного течения, существенно зависящими от эффекта ускорения ползучести материала в условиях циклического деформирования. Ошибка, связанная с используемыми обычно характеристиками начального деформирования, идёт не в запас прочности.

14. Выполнен проверочный расчёт перфорированной части опоры теплообменника атомного реактора БН-600 на знакопеременное течение, показавший, что коэффициент запаса, найденный с учётом изотропного упрочнения материала (стали Х18Н9), в два раза превышает значение, отвечающее характеристикам начального деформирования.

15. Результаты проведённых исследований внедрены на предприятиях НПО "Пролетарский завод", г. Ленинград, КТБ, г. Горький; они включены в проект отраслевых (для судовых ГТД) методических указаний по анализу приспособляемости дисков.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. О взаимодействии пластической и вязкой деформаций при циклическом нагружении. - В кн.: Термопрочность материалов и конструктивных элементов, Киев: Наукова думка, 1969, №5. - с. 158-162 (соавторы: Гохфельд Д.А., Иванов И.А.).

2. Взаимное влияние пластических и вязких деформаций при циклических нагружениях. - В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций, Киев: Наукова думка, 1970, №10. - с. 159-165 (соавторы: Гохфельд Д.А., Кононов К.М.).

3. Автоматизированная установка для изучения деформационных и прочностных характеристик конструкционных материалов при циклическом нагружении, включающем этапы ползучести. - В кн.: Вопросы прочности и динамики конструкций, Челябинск, 1971, №2. - с.5-12 (соавторы: Гохфельд Д.А. и др.).

4. Экспериментальная проверка возможности использования структурной модели среды для описания переменного нагружения конструкционного материала при повышенной температуре. - В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций, Киев: Наукова думка, 1971, №II. - с.140-143 (соавторы: Кононов К.М., Садаков О.С.).

5. *Some features of metals under cyclic deformation at high temperatures and the possibilities of their mathematical interpretation. Comprehensive abstracts of 4-th Conference on Dimensioning and Strength Calculations. Budapest: 1971. - p. 37,*

(соавторы: Гохфельд Д.А., Кононов К.М., Садаков О.С.).

6. Исследование неупругого циклического деформирования при повышенных температурах в условиях ползучести. - В кн.: Тепловые напряжения в элементах конструкций, Киев: Наукова думка, 1974, вып.14. - с.22-24 (соавторы: Гохфельд Д.А., Кононов К.М.).

7. Ползучесть жаропрочных сплавов на никелевой основе при циклическом упругопластическом нагружении. - В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума по малоцикловоу усталости при высоких температурах, Челябинск, 1974, вып.4. - с.56-64 (соавторы: Гецов Л.Б., Кононов К.М., Лапухина Н.С.).

8. Исследование ползучести жаропрочной стали ЭИ612 и жаропрочного сплава ЭП220 при знакопеременном циклическом деформировании. - В кн.: Вопросы прочности в машиностроении, Челябинск, 1974, №151. - с.132-144 (соавторы: Гохфельд Д.А., Кононов К.М.).

9. К описанию взаимного влияния процессов быстрого пластического деформирования и ползучести при циклическом нагружении. - В кн.: Вопросы прочности в машиностроении, Челябинск, 1974, № 151. - с.101-105 (соавторы: Гохберг В.Э., Кульчихин Е.Т.).

10. Исследование некоторых особенностей взаимного влияния пластической деформации и ползучести стали Х18Н9Т. - Машиноведение, 1975, №2. - с.59-61 (соавторы: Кононов К.М., Кульчихин Е.Т., Садаков О.С.).

11. Влияние пластической деформации на сопротивление циклической ползучести жаропрочного сплава. - Энергомашиностроение, 1976, №9. - с.18-21 (соавторы: Гецов Л.Б., Кононов К.М.).

12. К определению циклического предела упругости. - Заводская

лаборатория, 1976, №11. -с.1400-1403 (соавторы: Гецов Л.Б., Кононов К.М.).

13. Особенности кривых циклического упругопластического деформирования при повышенных температурах. -В кн.: XIУ научное собрание по тепловым напряжениям в элементах конструкций, Тезисы докладов, Киев:Наукова думка, 1977. -с.30 (соавтор Кононов К.М.).

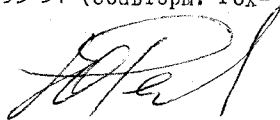
14. Исследование кривых циклического деформирования при повышенных температурах. -В кн.:Динамика и прочность конструкций, Челябинск, 1977, №201.-с.58-63 (соавторы: Горский С.В., Кононов К.М., Колпаков В.П.).

15. Определение реологической функции конструкционных сплавов по кривой неустановившейся ползучести. -В кн.: Динамика и прочность конструкций, Челябинск, 1977, №201. -с.48-53 (соавторы: Кульчихин Е.Т., Садаков О.С.).

16. Особенности циклического деформирования жаропрочных материалов при повышенных температурах. -Проблемы прочности, 1978, № 7. -с.43-46 (соавторы: Гецов Л.Б., Кононов К.М., Горский С.В.).

17. Неупругое циклическое деформирование аустенитной стали Х18Н9 при повышенных температурах. -В кн.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагружениях, Челябинск, 1979, № 236. -с.87-92.

18. О влиянии кратковременного неупругого деформирования на процессе ползучести хромоникелевых сплавов при циклическом нагружении. -В кн.: Всесоюзный симпозиум "Ползучесть в конструкциях", Тезисы докладов, Днепропетровск, 1982. -с.53-54 (соавторы: Гоффельд Д.А., Кононов К.М.).



Ребяков Юрий Николаевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ
НАГРУЖЕНИЯХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК

Специальность 01.02.06 - "Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры"

Подписано в печать 15/Х - 83 г. ФБ 03600. Формат 60x90 1/16. Печ. л.
1,25. Уч. - изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 422/1094.

УМП ЧПИ. 454044, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.