

2008-18
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ Д 01.07.351

На правах рукописи
УДК 539.372;539.374

Алдашов Мухтарбек Кадырбекович

**ДИНАМИЧЕСКАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 01.02.04 – механика деформируемого
твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек 2008

Работа выполнена в Ошском технологическом университете


| | |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель | кандидат физико-математических наук, доцент Кунеев В.И. |
| Официальные оппоненты: | доктор физико-математических наук, профессор Рычков Б.А. кандидат физико-математических наук, доцент Джаналиев Н.Р. |
| Ведущая организация | Институт физики НАН Кыргызской Республики |

Защита состоится 15.02 2008 года в 16.00 часов на заседании Межвузовского диссертационного совета Д 01.07.351 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук при Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова и Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Манаса, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в Кыргызской государственном техническом университете им. И. Раззакова.

Автореферат разослан «10» 01 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. физ.-мат. наук, доцент КГТУ

 Ж.Ж. Доталиева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Сверхпластичность неорганических материалов вызывает большой интерес исследователей в области физики твердого тела, материаловедения, механики и обработки давлением.

Внешняя сторона эффекта сверхпластичности проявляется в форме аномального квазиоднородного удлинения (до нескольких сотен и даже тысяч процентов) при малых значениях напряжений пластического течения. Изучение физической сущности подобной аномалии показало, что в отличие от обычной пластической деформации становится, наряду с известными формами массопереноса, превалирующим механизм зернограничного проскальзывания. Реализации указанного механизма способствует формирование ультрамелкозернистой структуры на предварительном этапе (структурная или микроструктурная сверхпластичность) или в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность). Наибольшее количество исследований посвящено микроструктурной сверхпластичности. В то же время известно, что многие промышленные металлические материалы в состоянии поставки проявляют сверхпластические свойства при грамотном подборе температурно-скоростных условий.

Динамической сверхпластичности промышленных сталей предшествует иерархия структурных состояний материала. Совершенно неисследованной, на наш взгляд, при этом является проблема реакции механического поведения материала на сильные структурные флуктуации, обусловленные изменяющимися термомеханическими условиями. Это, в частности, означает, что динамическая сверхпластичность не может изучаться вне связи с предшествующими состояниями.

Вызывает сожаление отсутствие систематических исследований сверхпластичности промышленных сталей методами механики деформируемого твердого тела. Задача изучения закономерностей деформации в широких температурно-скоростных диапазонах, включая формулировку особенностей проявления эффекта, пока не решена. При таком подходе, требующем основательных опытных данных, сверхпластичность может быть рассмотрена как некоторое состояние материалов, термомеханические режимы которых достаточно надежно установлены. При этом исчезнет необходимость оценивать макропроявления сверхпластичности с помощью представлений типа коэффициента скоростной чувствительности.

Определяющие уравнения, необходимые для постановки и решения технологических задач теории пластичности с использованием

сверхпластичности, могут иметь чисто феноменологическую природу или отражать физические процессы, сопутствующие возникновению и реализации эффекта. Указанные уравнения должны быть пригодны для математического описания не только сверхпластичности, но и пограничных областей. Последнее важно для решения технологических задач, поскольку здесь, как правило, очаг деформации не всегда удается полностью перевести в сверхпластическое состояние.

Сказанное определяет актуальность и важность экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых изложены в настоящей диссертации.

Цель и задачи исследования – экспериментальное изучение закономерностей деформации группы промышленных сталей в широких температурно-скоростных диапазонах. Определение термомеханических режимов сверхпластичности и формулировка определяющих соотношений, пригодных для аналитического описания эффекта это явление с целью создания на базе сверхпластической деформации прогрессивных технологических процессов обработки металлов давлением.

Для достижения данной цели ставятся следующие задачи исследования:

1. Экспериментальное изучение закономерностей высокотемпературной деформации сталей 40, 40X, У8, 12ХН3А, 0,5КП в широких температурно-скоростных диапазонах, включая интервалы сверхпластичности.

2. Установление особенностей проявления сверхпластичности, формулировка условий и экспериментальное определение термомеханических условий перехода указанных сталей в сверхпластическое состояние.

3. Формулировка определяющих соотношений, связывающих напряжение, температуру и скорости деформации, пригодных для аналитического описания деформационного поведения сталей в условиях сверхпластичности, а также пограничных областей термопластичности и высокотемпературной ползучести.

4. Аналитическая апробация применения сформулированных соотношений для решения технологической задачи обработки давлением в условиях сверхпластичности.

Научная новизна работы

1. Сформулирована задача и проведено экспериментальное изучение закономерностей деформационного поведения группы промышленных сталей (40; 40X; У8; 12ХН3А; 05,КП), в результате которого получены принципиально новые опытные данные по характеру проявления сверхпластических свойств. Показано, что диапазонам сверхпла-

стичности соответствует неустойчивость напряжения по отношению к скорости деформации. Сверхпластичность при этом объясняется происходящим при нагреве и деформации структурным фазовым переходом – полиморфным превращением.

2. Записаны аналитические условия перехода материала в сверхпластическое состояние и разработана методика определения термомеханических режимов проявления эффекта исследованными сталями.

3. Установлено соответствие между сверхпластичностью промышленных сталей и макрокинетикой неравновесных размытых фазовых переходов. Показана взаимосвязь полученных экспериментальных данных, теории полиморфных превращений и метода аналитического описания – построения модели на базе теории скольжения (Батдорф-Будянский, М.Я. Леонов).

4. Разработана упрощенная феноменологическая модель сверхпластического поведения материала, используя которую можно решать неизоэнтальпические краевые задачи механики деформируемого твердого тела технологического характера.

5. На основании принятых представлений о сверхпластичности промышленных сталей сформулирована и аналитически решена задача по осадке диска в условиях сверхпластичности.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась корректностью постановки задачи эксперимента, методов математического описания, сопоставлением теоретических и опытных данных.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая ценность работы заключается в совокупности полученных теоретико-экспериментальных результатов и решении технологической задачи осадки диска в условиях сверхпластичности:

- разработка системы измерений и регистрации необратимых процессов в условиях деформации металла при растяжении;
- разработка методики экспериментального изучения промышленных сталей при низкоскоростном и температурном деформировании;
- разработка аналитических зависимостей, с использованием которых решена технологическая задача осадки диска в условиях сверхпластичности.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- задача изучения явления сверхпластичности сталей в состоянии поставки методами механики деформируемого твердого тела;
- результаты экспериментального исследования промышленных сталей (40; 40X; У8; 12ХН3А; 05КП) при растяжении в широких температурно-скоростных интервалах, показывающие, что сверхпластичности

соответствуют термомеханические диапазоны скоростного разрушения;

– модель, основанная на концепции скольжения, устанавливающая связь между напряжением, температурой, степенью и скоростью деформации, причем появление неоднозначности напряжения по отношению к скорости деформации и «особых» точек, соответствующих границам устойчивости фаз, свойственно многомерным фазовым переходам и позволило объяснить сверхпластичность происходящими при нагреве и деформации полиморфными превращениями;

– методы определения термомеханических режимов реализации эффекта сверхпластичности;

– привлечение идей теории неравновесных фазовых переходов для объяснения физической природы сверхпластичности промышленных сталей, основанное на рассмотрении эффекта как особого (структурно неустойчивого) состояния в иерархии состояний в изменяющихся температурных и скоростных условиях деформации;

– разработка упрощенной феноменологической модели сверхпластического поведения материала, пригодной для решения краевых задач механики деформируемого твердого тела, включая диапазоны сверхпластичности;

– пример использования сформулированных определяющих соотношений для постановки и аналитического решения технологической задачи осадки диска в условиях сверхпластичности.

Апробация результатов диссертации

Основные научные положения докладывались на следующих Всероссийских, Международных, Республиканских конференциях и семинарах: 4-й Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Москва, 15–17 февраля 2005); V Международной научно-технической конференции «Авиакосмические технологии» (Воронеж, 22–24 сентября 2004); International conference on electronics and computer in Kyrgyzstan (ИКЕССО'2004) (Bishkek, 2 April, 2004); V региональной научно-технической конференции «Современные проблемы науки, техники и образования» (Жалалабад, 2006).

Работа выполнена по плановой научно-исследовательской тематике Ошского технологического университета и Кыргызско-Российского Славянского университета.

Публикация результатов

По материалам диссертационной работы опубликовано 9 работ, в которых отражены основные результаты, изложенные в диссертации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов по работе, списка цитированной литературы. Диссертация содержит 135 страниц основного текста, 54 рисунка, 15 таблиц. Список цитированной литературы включает 89 наименований.

Научный руководитель работы – кандидат физико-математических наук, доцент В.И. Кунеев.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор Я.И. Рудаев.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретическому и экспериментальному исследованию сверхпластического деформирования металлов посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей: О.А. Кайбышева, И.И. Новикова, А.П. Гуляева, А.А. Преснякова, О.М. Смирнова, Я.М. Охрименко, А.А. Бочвара, Е.Н. Чумаченко, А.С. Тихонова, О.В. Соснина, Я.И. Рудаева, А.Е. Гвоздева, В. Бекофена, В. Вейса, Е. Андервуда, О. Шерби, М.В. Грабского, Е. Харта, А. Мукерджи, Р. Джифкинса.

Во введении обосновывается важность и целесообразность исследования эффекта сверхпластичности материалов, структура которых специально не готовится.

Проанализировано современное состояние вопроса на основе обзора существующей литературы, обосновывается важность и целесообразность исследования эффекта сверхпластичности сталей.

Сформулирована актуальность темы, указана цель работы, охарактеризованы основные результаты, их научная и практическая ценность и раскрыта структура диссертации.

Первая глава посвящена постановке задачи эксперимента по изучению закономерностей высокотемпературной деформации промышленных сталей и описанию методики обработки опытных данных.

Математические модели деформируемых тел формулируются с привлечением базовых механических экспериментов, осуществляемых при однородных напряженно-деформированных состояниях. В техническом отношении для получения информации о поведении материалов при больших необратимых деформациях проще всего реализовать опыты на простое растяжение и сжатие. В этих опытах можно измерить силы и перемещения и, естественно, вычислить напряжения и деформации. Поддержание скорости деформирования в эксперименте и измерение температуры также достаточно просто технически осуществимо.

Представим детерминированные количественные зависимости для оценки процесса накопления необратимых деформаций с учетом изменения температур и скоростей деформаций (раздел 1.1) в виде

$$\sigma = \sigma(\theta, \dot{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}), \quad (1)$$

где σ – действительное напряжение; θ – абсолютная температура; $\bar{\varepsilon}$ – логарифмическая деформация; $\dot{\varepsilon}$ – скорость логарифмической деформации.

Зависимость (1) строится путем замены переменных в функциях отклика, полученных по данным зафиксированных реализаций в опытах,

$$F = F(\theta, V, \Delta l), \quad (2)$$

причем F – величина нагрузки на образец; V – скорость деформирования (скорость перемещения захватов испытательной машины); Δl – абсолютная деформация образца.

Между переменными, входящими в (1), (2), имеется следующая связь:

– действительное напряжение

$$\sigma = \frac{F(l_0 + \Delta l)}{A_0 l_0}, \quad (3)$$

– логарифмическая деформация

$$\bar{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}; \quad (4)$$

– скорость деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = \frac{V}{l_0 + \Delta l}.$$

Здесь A_0, l_0 – начальные площадь поперечного сечения и длина рабочей части образца; ε – относительная деформация образца.

Таким образом, в принципе решение экспериментальной задачи сводится к исследованию состояния материала, представляемого зависимостью напряжения пластического течения от температуры, степени и скорости деформации.

В разделе 1.2 описывается техника эксперимента. Для проведения опытов на растяжение использована испытательная машина на высокотемпературную ползучесть ZST 2/3, оборудованная коробкой скоростей, позволяющей осуществить ступенчатое регулирование скорости перемещения нижнего захвата машины от $2 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ м·с⁻¹. Машина ZST 2/3 оснащена необходимым набором регистрирующей аппаратуры.

В разделе 1.3 исследуются закономерности термоскоростной деформации сталей. Известно, что наиболее ярко в количественном отношении сверхпластичность при растяжении проявляется в материалах с ультрамелким зерном. Однако в сфере производства широко используются материалы с обычной структурой ($d \geq 20$ мкм), где условия возникновения эффекта мало изучены. Несмотря на то, что механизмы сверхпластической деформации исследованы достаточно подробно, связь между напряжениями и кинематическими переменными при сверхпластическом течении однозначно не установлена. Поэтому перспективы технологического использования сверхпластичности требуют анализа эффекта как в рамках физики твердого тела, так и с точки зрения механики деформируемых тел.

Испытаниям подвергались отожженные образцы с обычной структурой, рабочей длиной $l = 30$ мм и диаметром рабочей части $d = 6$ мм.

Экспериментальные исследования закономерностей деформации при растяжении в широких диапазонах температур и скоростей проводились для сталей 40; 40X; У8; 12ХН3А; 0,5КП.

Целью опытов являлось, в частности, определение оптимальных диапазонов температур $\theta_{\text{опт}}$, напряжений $\sigma_{\text{опт}}$, и средних скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{\text{опт}}$, при которых получены наибольшие удлинения δ (%).

Выбор диапазонов температур и скоростей деформирования диктовался предполагаемыми термомеханическими режимами проявления сверхпластических свойств, представленных в табл. 1.

Таблица 1

| $N, n/n$ | Марка стали | $A_{c_1}(\theta, K)$ | $A_{c_3}(\theta, K)$ |
|----------|-------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 40 | 998 | 1063 |
| 2 | 40X | 1008 | 1053 |
| 3 | У8 | 1003 | 1043 |
| 4 | 12ХН3А | 983 | 1093 |
| 5 | 0,5КП | 993 | 1163 |

Здесь $A_{c_1}(\theta, K)$ – температура начала фазовых превращений; $A_{c_3}(\theta, K)$ – температура конца фазовых превращений.

Температурно-скоростным опытам предшествовали статические испытания на растяжение образцов исследуемых сталей с целью установления основных прочностных и деформационных параметров, характера деформации в условиях нормальной температуры. Указанные ис-

пытания проведены на универсальной машине гидравлического типа ZD-40.

Данные механических испытаний образцов сталей в нормальных условиях представлены в табл. 2.

Таблица 2

| $N, n/n$ | Марка стали | $\sigma_{0,2}, \text{МПа}$ | $\sigma_s, \text{МПа}$ | $\delta, \%$ |
|----------|-------------|----------------------------|------------------------|--------------|
| 1 | 40 | 340 | 580 | 19 |
| 2 | 40Х | 800 | 1000 | 11 |
| 3 | У8 | 420 | 610 | 14 |
| 4 | 12ХНЗА | 700 | 950 | 11 |
| 5 | 0,5КП | 190 | 400 | 20 |

Здесь $\sigma_s, \sigma_{0,2}$ – пределы текучести; σ_s – предел прочности; δ – относительная деформация.

По экспериментальным данным построены графики влияния температуры на удлинение $\delta(\%)$ (рис. 1) и зависимости растягивающих напряжений σ от температуры θ при скоростях деформации $(2,5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-3}) \text{ с}^{-1}$ (рис. 2).

В результате опытов установлено, что в исследованных сталях 40, 40Х, У8, 12ХНЗА, 0,5КП существуют скоростные диапазоны, в которых изотермы «напряжение–скорость деформации» отклоняются от монотонного характера с появлением точек бифуркации. Ниспадающие ветви указанных диаграмм принимаются соответствующими проявлению сверхпластических свойств (рис. 3, кривая 2). Характерные признаки сверхпластичности – низкий уровень напряжений и высокая деформационная способность при растяжении – отмечаются в упомянутых диапазонах.

Обратимся теперь к кривым «предельная деформация – температура» ($\delta - \theta \text{ К}$) (рис. 1) и «напряжение – температура» ($\sigma - \theta \text{ К}$) (рис. 2). Наибольшие значения удлинения (рис. 1) достигаются в интервале температур $\alpha \rightarrow \gamma$ перехода. При $\theta \in (Ac_1, Ac_3)$ (рис. 2) напряжение течения убывает с ростом температуры по закону, близкому к экспоненциальному. При $\theta \in (Ac_1, Ac_3)$ на экспериментальных зависимостях наблюдаются отклонения от экспонент.

В образцах, нагретых до температур $923 \text{ К} < \theta < Ac_1$, (за пределами) наибольшие удлинения соответствуют скоростям деформации от $\dot{\epsilon} = 2,01 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ до $\dot{\epsilon} = 6,7 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, однако достигаемые удлинения значительно уступают по величине деформациям образцов в $\alpha \rightarrow \gamma$ области.

При циклически изменяющейся температуре относительно Ac_1 непрерывное удлинение образцов приводит к их разрушению в условиях охлаждения ($\gamma \rightarrow \alpha$ перехода). Максимальные удлинения при этом в условиях $\alpha \rightarrow \gamma$ переходе получены в интервале скоростей $\dot{\epsilon} = (1,2 \cdot 10^{-4} \dots 7,3 \cdot 10^{-4}) \text{ с}^{-1}$.

Теперь сверхпластичность промышленных сталей объясняется происходящим при нагреве и деформации полиморфным превращением. В процессе последнего исходная деформированная или литая структура превращается в равноосную, мелкозернистую. Иными словами, находит подтверждение гипотеза А.А. Преснякова о физической природе сверхпластичности, как о суперпозиции деформации и одного или нескольких структурных превращений.

Температурные диапазоны сверхпластичности не превышают $(20 \dots 30) \text{ К}$. Для всех исследованных сталей при температурах, непосредственно следующих за интервалами сверхпластичности, наступает резкое снижение показателей пластичности, быстрое охрупчивание и разрушение.

Во второй главе, следуя концепции скольжения Батдорфа-Будянского, (раздел 2.1) сопротивление сдвигу S_{NL} в произвольной плоскости N и направлении L , введенное академиком М.Я. Леоновым, представляется в форме

$$S_{NL} = S(J, \tau_i) [1 + R_{NL}(\varphi_{NL})]; \quad (5)$$

где $S(J, \tau_i)$ – характеристическая функция; J – функция скоростей интенсивности касательных напряжений τ_i и температуры; функция $R_{NL}(\varphi_{NL})$ задается в виде

$$R_{NL}(\varphi_{NL}) = r_1 \varphi_{NL} + r_2 \int_{\omega_1}^{\omega_2} \varphi_{NL} \cos(\omega_0 - \omega) d\omega + r_3 \gamma_{NL}. \quad (6)$$

Здесь φ_{NL} – интенсивность скольжения принята зависящей от величины касательного напряжения и деформации сдвига, которые определяются через составляющие тензора напряжений σ_{ij} и деформаций γ_{ij} , заданных в фиксированной системе координат (x, y, z) в виде

$$\tau_{NL} = \sum_{i,j} \sigma_{ij} l_i n_j, \quad \gamma_{NL} = \sum_{i,j} \gamma_{ij} (l_i n_j + n_i l_j) \quad (i, j = x, y, z); \quad (7)$$

причем индексы обозначают оси, относительно которых берут данную величину; n, l – направляющие косинусы; r_1, r_2, r_3 – постоянные материала; ω_1, ω_2 – границы веера скольжений в плоскости N ; γ_{NL} – пластическая деформация сдвига в данный момент нагружения.

Общая деформация находится в результате суммирования всех сдвигов

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} d\Omega \int_{\omega_1}^{\omega_2} (l_x n_y + l_y n_x) \varphi_{NL} d\omega \quad (x, y, z), \quad (8)$$

где $d\Omega$ – элементарный телесный угол, внутри которого реализуется скольжение и определяемый по формуле.

В разделе 2.2 рассматриваются возможности описания процессов сверхпластического течения в рамках концепции скольжения. Для осевой составляющей пластической деформации имеем выражение

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{15r} D(\theta_1), \quad (9)$$

где

$$D(\theta_1) = \left(\frac{1 - \cos 2\theta_1}{\cos 2\theta_1} \right)^{1/2} (4 - 3 \cos \theta_1 - \cos^2 2\theta_1), \quad (10)$$

угол θ_1 определяет симметричные границы веера скольжений, r – параметр материалы.

Выражения (9), (10) пригодны для описания закономерностей высокотемпературного деформирования промышленных металлических материалов в широком скоростном режиме.

Для динамической сверхпластичности характерно формирование ультрамелкозернистой структуры как результата структурных фазовых переходов. Накопление необратимых деформаций осуществляется, главным образом, за счет проскальзывания по границам зерен. Поэтому можно считать, что сверхпластическая область скольжений занимает весь объем элемента, т.е. полагаем

$$\theta_1 = \pm \frac{\pi}{4}. \quad (11)$$

Компонента осевой сверхпластической деформации, исходя из (9), (11), определяется следующим образом

$$\varepsilon = \frac{12}{r} \frac{\sigma}{S(J, \tau)}. \quad (12)$$

Характеристическая функция J , вообще говоря, может иметь различные аналитические представления, включая температуры и скорость деформации.

Для сверхпластической деформации связь напряжений σ и скоростей деформации $\dot{\varepsilon}$ при «динамической» сверхпластичности, предстанет в виде

$$q = m_0 \eta^3 + \bar{\beta}(\xi) \eta. \quad (13)$$

Здесь $m_0 = \text{const}$, $\bar{\beta} = \bar{\beta}(\xi)$ – функция температуры.

$$q = \frac{\sigma}{\sigma^*} - 1; \quad \eta = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon^*} - 1; \quad \xi = \frac{\theta - \theta_c^H}{\theta_c^{\theta} - \theta_c^H}, \quad (14)$$

где σ^* , ε^* – напряжения и скорости деформации, соответствующие точками перегиба кривых $\sigma - \dot{\varepsilon}$ (рис. 3), $\theta_c^H, \theta_c^{\theta}$ – температуры, ограничивающие диапазоны сверхпластичности.

В разделе 2.3 приводится упрощенная модель, устанавливающая связь между напряжением, температурой и кинематическими переменными в форме

$$\sigma = c (\varepsilon_0 + \varepsilon)^{\frac{n}{1 + \delta(\theta - \theta_0)}} \cdot \dot{\varepsilon}^m e^{\frac{A}{K[\theta + \delta(\theta - \theta_0)]}}. \quad (15)$$

Здесь ε_0 – постоянная материала, указывающая на то, что пластическая деформация может начинаться только после превышения некоторого критического напряжения; θ – абсолютная температура; θ_0 – температура фазовых или каких-либо других аллотропических превращений $\delta(\theta)$ – дельта-функция Дирака, задаваемая так:

$$\delta(\theta - \theta_0) \begin{cases} 0 & \text{при } \theta \neq \theta_0; \\ \infty & \text{при } \theta = \theta_0; \end{cases} \quad (16)$$

c, m, n, K, A – константы материала.

Сопоставление теоретических (модель скольжения) и опытных данных при растяжении стали 40X (раздел 2.4) приведено на рис. 4 в координатах $q - \eta$. На рис. 4 кривая 1 построена при $\theta = 1053\text{K}$; $m_0 = 0,333$; $\bar{\beta} = 0,1727$; кривая 2 – при $\theta = 1098\text{K}$; $m_0 = 0,333$; $\bar{\beta} = -0,0335$. Из рис. 4 видно удовлетворительное соответствие теоретических данных экспериментальным.

В третьей главе решена задача определения силового режима горячей осадки кругового цилиндра в неизотермических условиях деформирования с переходом материала в сверхпластическое состояние.

В качестве определяющих соотношений применяются уравнения технической теории ползучести – теории упрочнения. Зависимость меж-

ду интенсивностями напряжения σ_u , деформаций ε_u и скоростями деформации $\dot{\varepsilon}_u$, предлагается в виде

$$\sigma_u = c \left(\varepsilon_0 + \int d\varepsilon_u \right)^{\frac{n}{1+\delta(\theta-\theta_0)}} \cdot \dot{\varepsilon}_u e^{K[\theta+\delta(\theta-\theta_0)]}, \quad (17)$$

где $\int d\varepsilon_u$ – параметр упрочнения Удквиста.

К уравнению состояния добавим:

– уравнения равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{2\chi\bar{q}}{h}, \quad P = 2\pi \int_0^R \bar{q}r dr; \quad (18)$$

– при граничном условии

$$\sigma_r|_{r=R} = 0; \quad (19)$$

– геометрическое соотношение

$$\dot{\varepsilon}_u = \dot{\varepsilon}_z = -\frac{v}{h}; \quad (20)$$

– закон возрастания температуры

$$\theta = \theta_* + \beta t. \quad (21)$$

Здесь σ_r – радиальное напряжение, \bar{q} – контактное давление, χ – экспериментальный коэффициент пропорциональности между силами трения и максимальным касательным напряжением, v – скорость перемещения верхней плиты пресса относительно нижней, r , h – текущие радиус и толщина диска; θ_* – начальная температура; t – время, β – коэффициент пропорциональности.

Совместное рассмотрение системы уравнений (17...21) позволяют записать формулы для определения сжимающей силы, график изменения которой в зависимости от уменьшения толщины диска приведен на рис. 5.

При этом кривая 1 отвечает процессу осадки с постоянной скоростью деформации, а кривая 2 – процессу осадки с постоянной скоростью перемещения.

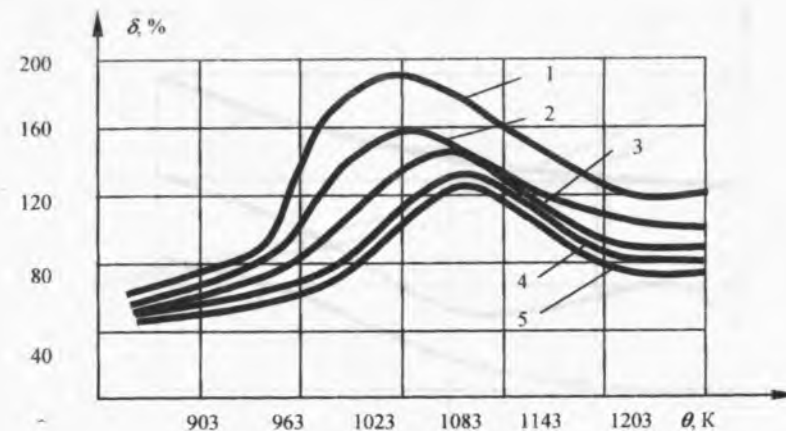


Рис. 1. Кривые: 1 – для стали 0,5 КП; 2 – для стали 12ХН3А; 3 – для стали У8; 4 – для стали 40; 5 – для стали 40Х.

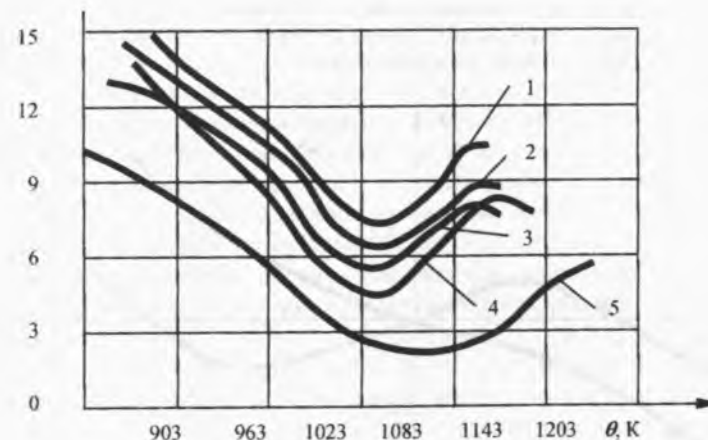


Рис. 2. Зависимость напряжений от температуры θ при растяжении и скоростях деформации $\varepsilon_{\text{отт}} = (2,5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-3}) \text{ с}^{-1}$: 1 – для стали 40; 2 – для стали 40Х; 3 – для стали У8; 4 – для стали 12ХН3А; 5 – для стали 0,5 КП.

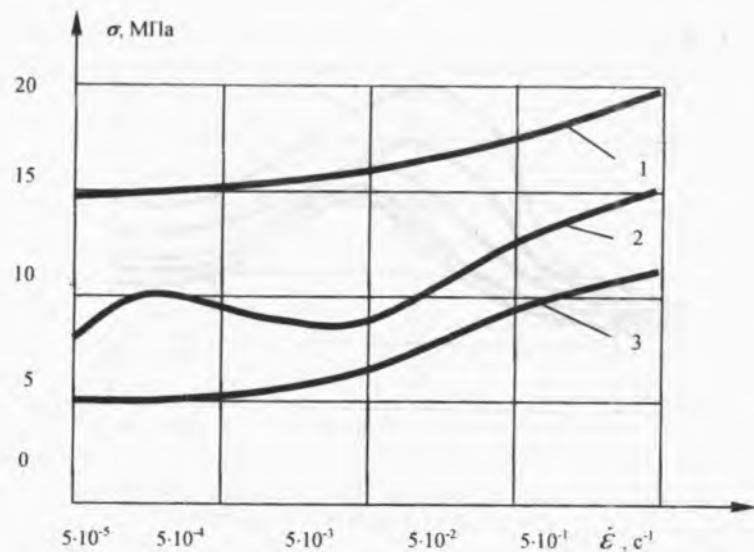


Рис. 3. Зависимости напряжения от скорости деформации при растяжении для стали 40X: 1 – при $\theta = 953$ К; 2 – при $\theta = 1053$ К; 3 – при $\theta = 1098$ К.

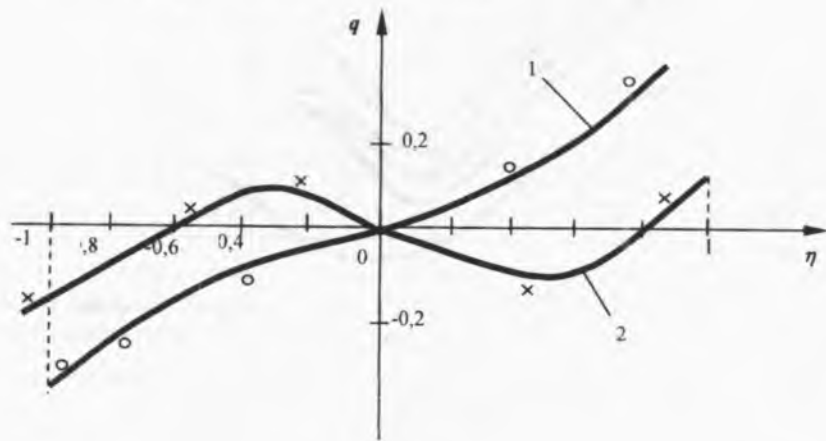


Рис. 4. Сравнение теоретических и опытных данных для стали 40X.

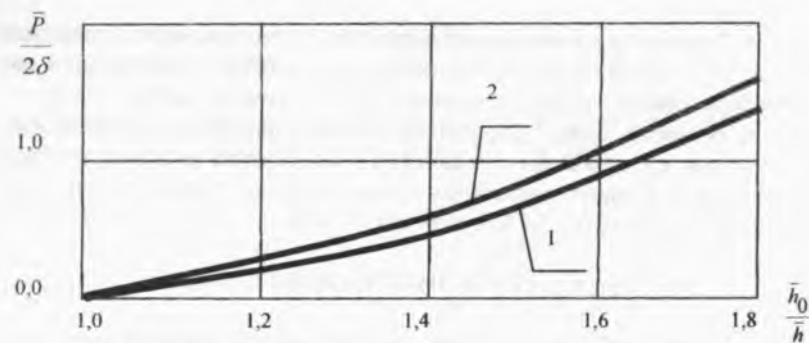


Рис. 5. Изменение осевой силы в зависимости от толщины диска ($\epsilon_0 = 0$; $n = 0,2$; $A/h_0 = 10$; $m = 0,3$; $\chi = 0,3$).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Сформулирована задача экспериментального изучения закономерностей деформирования промышленных сталей 40; 40X; У8; 12ХН3А; 05,КП в широких температурно-скоростных диапазонах, включая интервалы сверхпластичности.

2. Подтверждена принципиальная возможность перевода при нагреве и деформации промышленных материалов, структура которых специально не готовится, в сверхпластическое состояние. Главный экспериментальный результат состоит в обнаружении в исследованных сталях при растяжении скоростных диапазонов, в которых изотермы «напряжение – скорость деформации» отклоняются от монотонного характера с появлением точек бифуркации. Характерные признаки сверхпластичности (низкий уровень напряжений, высокая деформационная способность при растяжении) соответствуют ниспадающим ветвям диаграмм «напряжение – скорость деформации».

3. Рассмотрена задача определения термомеханических условий осуществления сверхпластичности промышленных материалов. Решение указанной задачи основано на исследовании функции четырех переменных (напряжения, температуры, скорости и степени деформации).

Предложены аналитические условия, которым должно удовлетворять напряжение при переходе указанных сталей в сверхпластическое состояние.

4. Для установления конкретных режимов реализации сверхпластичности разработана на основе концепции скольжения М.Я. Леонова модель, описывающая связь между напряжением, температурой, скоростью и степенью деформации.

5. Разработана упрощенная феноменологическая модель сверхпластического поведения материала, используя которую можно решить разнообразные краевые задачи механики деформируемого твердого тела.

6. В рамках теории упругопластических процессов малой кривизны с учетом предложенного уравнения состояния математически сформулирована и решена неизотермическая технологическая задача с использованием сверхпластичности осадки диска.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. *Кунеев В.И., Алдашов М.К.* Связь между напряжениями и скоростями деформации при сверхпластичности сталей // Прикладные задачи механики. Математическое моделирование. Аэрогидродинамика и теплообмен: Труды пятой Международной конференции. – Воронеж, 2004. – Ч. II. – С. 21–26.
2. *Алдашов М.К., Кунеев В.И.* Экспериментальное и теоретическое исследование динамической сверхпластичности сталей // International conference on electronics and computer in Kyrgyzstan. – Bishkek, 2004. – P. 154–157.
3. *Алдашов М.К., Кунеев В.И.* Осадка диска в условиях сверхпластичности // Актуальные проблемы механики и машиностроения: Материалы международной научной конференции. – Алматы, 2005. – С. 83–89.
4. *Алдашов М.К.* Динамическая сверхпластичность, основанная на теории скольжения // Прочность и разрушение материалов и конструкций: Материалы 4-й международной конференции. – Москва, 2005. – Т. 2. – С. 36–40.
5. *Алдашов М.К.* Влияние температурно-скоростных условий деформации на сверхпластичность сталей // Современные проблемы науки, техники и образования: Материалы 5-й региональной научно-теоретической конференции. – Жалалабат, 2006. – С. 34–37.
6. *Алдашов М.К.* Об условиях реализации эффекта сверхпластичности стали 40Х // Вестник КГУСТА. – Бишкек, 2006. – № 4. – С. 150–154.
7. *Алдашов М.К., Кунеев В.И.* Исследование неизотермической, сверхпластической деформации промышленных сталей // Известия вузов. – Бишкек, 2006. – № 3–4. – С. 20–23.
8. *Алдашов М.К.* Моделирование неизотермической осадки диска в условиях сверхпластичности // Поиск, серия механика. – Алматы, 2006. – №6. – С. 248–304.
9. *Алдашов М.К., Айтибаева А.* Исследование деформирования стали 12ХНЗА в условиях высокотемпературной ползучести // Международный научный журнал КУУ. Наука, образование, техника. – Ош, 2007. – № 1. – С. 93–95.

РЕЗЮМЕ

Алдашов Мухтарбек Кадырбекович

на тему: ДИНАМИЧЕСКАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Ключевые слова: сверхпластическая деформация, динамическая сверхпластичность, напряжение, деформация, скорость деформации, концепция скольжения, сопротивление сдвигу, полиморфные превращения, зернограничное проскальзывание, фазовые превращения.

Диссертационная работа посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям деформирования промышленных сталей в широком диапазоне температур, включая интервалы фазовых превращений. При динамической сверхпластичности скольжения интенсифицируются за счет формирования в процессе нагрева и деформации ультрамелкозернистой структуры.

Следуя концепции скольжения Батдорфа-Будянского и академика НАН М.Я. Леонова, сопротивление сдвигу, приравняваемое максимальному касательному напряжению, позволяет выявить в элементарном объеме области, в которых имеет место пластическая деформация. Сформулированная математическая модель устанавливает в явном виде зависимости напряжений пластического течения от температуры, степени и скорости деформации. Эти зависимости позволяют описывать закономерности высокотемпературной деформации сталей, включая диапазоны полиморфных превращений. В рамках упрощенной феноменологической модели решена задача осадки диска в условиях сверхпластичности.

The RESUME
Aldashov Muchtarbek Kadyrbekovich

DYNAMIC SUPERPLASTICITY CONSTRUCTIONAL STEELS

Present his thesis for a candidate of physics-mathematical sciences on speciality "Mechanical deformation of solid body" – 01.02.04

Keywords: superplastic deformation, dynamic superplasticity, stress, deformation, strain rates, the concept of sliding, resistance to shift, polymorphic transformations, grained boundary sliding, phase transformations.

Dissertational work is devoted to experimental and theoretical researches of deformation industrial steels in a wide range of temperatures, including intervals of phase transformations. At dynamic superplasticity of sliding are intensified due to formation during heating and deformation of ultrafine-grained structure.

Following the concept of sliding Batdorf-Budyansky and academician NAS M.Ja. Leonov resistance to the shift, equated maximal tangential to a pressure, allows to reveal in elementary volume of area in which plastic deformation takes place. The formulated mathematical model establishes in an obvious kind of dependence of stress of plastic current from temperature, a degree and strain rates. These are dependences allow to describe high-temperature deformations steels, including, connected with ranges of polymorphic transformations. Within the limits of the simplified phenomenological model the problem deposits of a disk in conditions of superplasticity is solved.

РЕЗЮМЕ
Алдашов Мухтарбек Кадырбекович

Темасы: КОНСТРУКЦИЯЛЫК БОЛОТТОРДУН
ДИНАМИКАЛЫК ЖОГОРКУ ИЙИЛЧЕКТУУЛУГУ

01.02.04 Катуу заттын механикалык форма озгоруусу адистиги боюнча физика-математикалык илимдеринин кандидаттык даражасын алуу учун жазылган диссертация.

Негизги создор: Деформациялык жогорку ийилчектуулук, динамикалык жогорку ийилчектуулук, деформация, деформациянын ылдамдыгы, сурулуу концепциясы, жылышуу каршылыгы, полиморфтук алмашуу, болукчолор аралык алмашуу, фазалык алмашуу.

Диссертациялык иш фаза алмашуу интервалын камтыган, кенири температуралык диапазондо онор жай болотторун деформациялоо боюнча эксперименталдык жана териялык изилдоолорго арналган. Динамикалык жогорку ийилчектик абалдагы деформациянын негизги механизми болгон сурулуу процеси, материалды ысытуу жана деформациялоонун бириккен аракетинде, аларда эн майда болукчолук структура пайда болуусунун эсебинен интенцификацияланат.

Батдорфа-Будянскийдин сурулуу концепциясына ылайык, максималдык жаныма чыналууга барабар болгон, УИА академиги М.Я. Леонов тарабынан киргизилген жылышуу каршылыгы аркылуу элементардык коломдо ийилчектик деформация орун алган областын аныктоого болот. Тузулгон математикалык модель ийилчектик деформация чыналуусун температурадан, деформация денгээлинен жана ылдамдыгынан болгон так коз карандылыгын аныктайт. Бул коз карандылык модели аркылуу болоттордун полиморфтук алмашуу диапазондору кирген жогорку температурадагы деформациясын суротоого болот. Жонокойлотулгон феноменогиялык моделди колдонуп дискти жогорку ийичектин шартында кысуу маселеси каралган.