

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ Д 01.07.351

*На правах рукописи*  
УДК 539.372;539.374

**Аманбаева Гулнара Муктаровна**

**МАКРОКИНЕТИКА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Бишкек – 2008

Работа выполнена в Кыргызско-Российском Славянском университете  
на кафедре «Механика»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических  
наук, профессор **Рудаев Я.И.**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических  
наук, профессор **Салиев А.Б.**

доктор физико-математических наук,  
профессор **Каныгина О.Н.**

**Ведущая организация:** Институт физики НАН  
Кыргызской Республики

Защита состоится 27.03. 2008 года в 13.00. часов на заседа-  
нии Межвузовского диссертационного совета Д 01.07.351 по защите  
диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук при  
Кыргызском государственном техническом университете им. И. Разза-  
кова 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 «22» 02 2008 г.

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

Ж.Ж. Доталиева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

Динамическая сверхпластичность в отличие от микрозеренной (структурной) реализуется в металлах и сплавах без специальной подго-  
товки ультрамелкого зерна. Более того, в определенных температурно –  
скоростных режимах исходная структура (литая или деформированная)  
измельчением зерна переводится в готовую к сверхпластичности и осу-  
ществляется сам эффект. Следовательно, при нагреве и деформации  
происходит структурный фазовый переход. Для промышленных алюми-  
ниевых сплавов таким необратимым переходом является динамическая  
рекристаллизация, в процессе которой исходное зерно раздробляется, а  
структура становится равноосной ультрамелкозернистой с дальнейшим  
переходом к крупнозернистой рекристаллизованной. Модель, сформу-  
лированная с позиций механики деформируемого твердого тела, адекват-  
но отражает накопленные экспериментальные данные и описывает  
закономерности высокотемпературной деформации не только при  
сверхпластичности, но и в пограничных областях термопластичности и  
высокотемпературной ползучести.

Естественно оценить модель с точки зрения определения пред-  
ставляющих реальный интерес физических величин, которые можно  
определить при известном аналитическом выражении плотности тер-  
модинамического потенциала. Исследование реакции неравновесной  
системы на поведение термодинамических функций отклика – удельной  
теплоемкости и энтропии – позволяет установить особенности развития  
необратимых размытых фазовых переходов, наблюдаемых в условиях  
динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов. Для модели-  
рования макрокинетики с оценкой вкладов различных форм массопере-  
носа в процесс накопления необратимых деформаций становится необ-  
ходимым привлечение методов неравновесной механики. Сказанное оп-  
ределяет актуальность исследований, результаты которых изложены в  
настоящей диссертации

### Связь темы диссертации с научными программами.

Работа выполнялась в рамках проекта Министерства образования  
Кыргызской Республики ОФГН-035 “Разработка и опытное опробование  
высокоэффективных технологических процессов обработки давлением в  
режимах сверхпластичности” и Программы “Механика динамической  
сверхпластичности”, разрабатываемой в Кыргызско-Российском Сла-  
вянском университете.

**Целью работы** является разработка модели, описывающей макрокинетику сверхпластической деформации динамического типа с привлечением неравновесной статистической механики.

#### **Научная новизна**

1. Сформулировано условие непрерывности функции удельной теплоемкости в термомеханических режимах сверхпластичности.

2. Определен вид функции приращения удельной теплоемкости, пикообразным характером которой в термических режимах сверхпластичности достигается связь эффекта с размытым неравновесным фазовым переходом – динамической рекристаллизацией.

3. Достигнуто соответствие минимума производства энтропии при сверхпластичности формированию упорядоченной ультрамелкозернистой структуры.

4. Предложена на базе стационарного варианта уравнения Фоккера – Планка макрокинетическая модель, пригодная для описания в термических диапазонах сверхпластичности суперпозиции систематического трения и диффузионных процессов, причем в качестве функции распределения вероятности принято приращение удельной теплоемкости.

5. Получено с привлечением макрокинетической модели явное выражение для функции, характеризующей механизм проскальзывания по границам зерен (коэффициент “дрейфа”), превалирующего при сверхпластичности.

6. Предложено вне скоростного диапазона сверхпластичности ответственность за процесс накопления необратимых деформаций возложить на коэффициент диффузии.

#### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов обеспечена корректным использованием модельных представлений, привлекаемых для описания закономерностей сверхпластического течения, в совокупности с методами неравновесной статистической механики.

**Практическая значимость полученных результатов** определяется тем, что с позиций неравновесной статистической механики можно исследовать в условиях, далеких от термодинамического равновесия, процесс формирования при сверхпластичности упорядоченной ультрамелкозернистой структуры. Полученные результаты могут быть использованы при постановке и решении задач объемного формоизменения на базе управляемой сверхпластической деформации.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

– привлечение модели, пригодной для описания закономерностей высокотемпературной деформации промышленных алюминиевых сплавов в широких скоростных диапазонах, включая сверхпластичность, к

оценке вкладов различных форм массопереноса в процесс накопления необратимых деформаций;

– обоснование непрерывности функции удельной теплоемкости;

– вероятностная оценка параметра порядка;

– определение функций приращений удельной теплоемкости и энтропии;

– формулировка макрокинетической модели;

– оценка механизмов деформации в широком диапазоне скоростей в термических условиях сверхпластичности.

#### **Личный вклад соискателя:**

– проведено сопоставление подходов к описанию фазовых переходов в равновесных и неравновесных системах;

– осуществлена вероятностная оценка параметра порядка;

– определены термодинамические функции отклика – удельная теплоемкость и энтропия;

– конкретизирована с использованием приращения функции удельной теплоемкости макрокинетическая модель для описания механизмов деформации;

– проинтегрированы дифференциальные уравнения, вытекающие из модели, в результате решения которых установлен вид функций, ответственных за реализацию механизмов зернограницного проскальзывания и диффузионные процессы.

#### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научной конференции “Прочность и разрушение материалов и конструкций” (г. Оренбург, 15 – 17 февраль 2005 г.); Международной научной конференции “Актуальные проблемы механики и машиностроения” (г. Алматы, 17–19 июнь 2005 г.); XXXIV Международной летней школе “Advanced Problems in Mechanics” (APM-2006) (г. Санкт-Петербург (Репино), 25 июня – 1 июля 2006 г.); Международной научно-технической конференции “Инновации в образовании, науке и технике” (г. Бишкек, 22-24 июнь 2006г.); на семинарах кафедры механики Кыргызско-Российского Славянского университета (г. Бишкек).

#### **Публикации**

Результаты работы опубликованы в девяти научных статьях и тезисах.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем 139 страницы, включая 39 рисунков и 2 таблицы. Библиографический список включает 74 наименование.

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., профессору Я.И. Рудаеву за ценные консультации и постоянное внимание к настоящей работе.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введение** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные направления исследований, приводится структура и краткое содержание работы.

**Первый раздел** посвящен проблеме фазовых переходов и ее связи с реализацией процесса динамической сверхпластичности.

*В главе 1.1* вводятся основные термодинамические представления, привлекаемые для описания фазовых переходов. В качестве термодинамических переменных выступают такие макроскопические величины как объем, давление, энтропия, температура. Функциями этих независимых переменных являются термодинамические потенциалы – полная энергия, свободная энергия Гельмгольца, тепловая функция (энтальпия), свободная энергия Гиббса (термодинамический потенциал). Термодинамические соотношения, связывающие дифференциалы термодинамических потенциалов, представляющие собой записи баланса энергии в разных переменных и существуют только для равновесного случая. Такой подход приводит к понятиям фазового перехода I и II рода, которые в соответствие экспериментальным данным рассматриваются только как некоторые предельные идеализированные случаи. Поэтому более общими считаются представления о размытых фазовых переходах.

Экспериментальным подтверждением сказанного можно считать пикообразный характер поведения в диапазонах фазовых переходов термодинамических функций отклика – удельной теплоемкости и объемной сжимаемости (вторых производных термодинамического потенциала).

*В главе 1.2* сформулированы основные принципы феноменологической теории фазовых переходов II рода Л. Д. Ландау, в основе которой лежит идея о спонтанном нарушении симметрии при фазовом переходе. Метод Л.Д.Ландау для анализа конкретных фазовых переходов в системах и является основой интерпретации опытных данных о поведении физических характеристик вблизи фазового перехода. Оговоримся, что теория Ландау естественным образом укладывается в рамки элементарной теории катастроф. При этом для описания состояния системы вводится параметр порядка  $\eta$ , характеризующий новые физические

свойство, появляющееся в системе в результате фазового перехода из исходной фазы.

Представление о фазовых переходах привлекаются для характеристики сверхпластичности промышленных алюминиевых сплавов (глава 1.3). Сверхпластичность внешне проявляется в форме аномального квазиоднородного удлинения при малых значениях напряжений пластического течения. Изучением эффекта методами механики деформируемого твердого тела занимается несколько научных школ – О.М. Смирнов, Е.Н. Чумаченко, М.А. Цепин (МИСиС, МИЭМ), О.В. Соснин, Б.В. Горев (институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск), В.Л. Данилов, К.И. Романов (МГТУ им. Н.Э. Баумана), П.В. Трусов (ПермГТУ), Я.И. Рудаев, Ш.Т. Пазылов (КРСУ, Бишкек) и др.

Начиная с классической работы К. Пирсона, сверхпластическую деформацию связывают с превалированием механизма зернограничного проскальзывания со сменой соседей зерен над другими формами массопереноса. Реализация такого механизма облегчается формированием ультрамелкозернистой структуры на предварительном этапе (микрзернистая сверхпластичность) или в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность). Сверхпластичность промышленных алюминиевых сплавов объясняется происходящим при нагреве и деформации структурным фазовым переходом – динамической рекристаллизацией. Совершаемые при этом структурные изменения заключаются в возникновении равноосной ультрамелкозернистой структуры с очень мелким зерном, примерно совпадающим по размерам с субзернами. Так создается структурная ситуация, способствующая реализации механизма зернограничного проскальзывания и, естественно, проявления сверхпластических свойств. Указанная ситуация является промежуточным структурным состоянием между исходным деформированным и крупнозернистым рекристаллизованным. Следовательно, наличие нагрева и деформации в определенном сочетании при неизменном химическом составе изменяет структурное состояние материалов. По существу в меняющихся термических и кинематических условиях в алюминиевых сплавах может наблюдаться иерархия необратимых структурных состояний – деформированное, переходное к мелкозернистому, мелкозернистое, переходное к крупнозернистому рекристаллизованному, рекристаллизованное.

Таким образом, при анализе на макроуровне эффектов, характеризующих динамическую сверхпластичность, полезным оказывается привлечение представлений о неравновесных фазовых переходах (синергетике).

Во втором разделе изложена математическая модель, пригодная для описания деформационного поведения промышленных алюминиевых сплавов в широких температурно-скоростных диапазонах, включая интервалы сверхпластичности (Рудаев Я. И.).

В главе 2.1 сформулированы основные предпосылки модели, а в главе 2.2 записаны аналитические условия, которым должно удовлетворять уравнение состояния при переходе в режимы сверхпластичности.

В главе 2.3 в рамках синергетического подхода из условия качественной адекватности экспериментальным данным выбрана энергетическая функция состояния в форме потенциала катастрофы сборки, которая имеет вид

$$\Phi(\eta, \beta, q) = \frac{1}{4} m_0 \eta^4 + \frac{1}{2} \beta (\xi) \eta^2 - q \eta \quad (1)$$

Здесь  $q = \frac{\sigma}{\sigma^*} - 1$  – нормированное напряжение;  $\eta = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}^*} - 1$  – параметр порядка;  $\sigma$  – действительное напряжение;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации;  $\xi = \frac{\theta - \theta_c''}{\theta_c'' - \theta_c''}$  – нормированная температура;  $\theta$  – абсолютная температура;  $\theta_c''$ ,  $\theta_c''$  – соответственно нижняя и верхняя критические температуры, ограничивающие диапазон сверхпластичности;

$\sigma^* = \sigma^*(\theta)$ ,  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^*(\theta)$  – альтернативные внутренние параметры состояния, ответственные за термическую историю;  $\beta(\xi)$  – управляющий параметр;  $m_0$  – постоянная материала.

Уравнение состояния получено минимизацией (1) по параметру порядка

$$q = m_0 \eta^3 + \beta(\xi) \eta. \quad (2)$$

Зависимость (2) дополнена эволюционными уравнениями для управляющего параметра

$$\frac{d\beta}{dt} = \dot{\xi} f(\beta, q), \quad (3)$$

и внутренних параметров состояния

$$\frac{d \ln \sigma^*}{dt} = A_0 \beta \frac{d\beta}{dt} \exp(\beta - s). \quad (4)$$

$$\frac{d \ln \dot{\epsilon}^*}{dt} = A_0 \beta \frac{d\beta}{dt} \exp(\beta - s). \quad (5)$$

причем  $\dot{\xi} = d\xi/dt$  – скорость возрастания нормированной температуры,  $A_0 \sim const$ , функция  $f(\beta, q)$  названа функцией чувствительности среды к структурным превращениям.

В качестве варианта функции  $f(\beta, q)$  для алюминиевых сплавов предложено выражение

$$f(\beta, q) = \frac{4\mu - 1}{\alpha\mu + 1} \left[ \Gamma(\xi) - \frac{1}{2} \right]. \quad (6)$$

Здесь  $\Gamma(\xi)$  степень полноты фазового перехода

$$\Gamma(\xi) = (1 - \beta)^{-\alpha} \cdot \frac{1 + \mu}{2} \cdot \frac{2\xi - 1}{1 + \mu(2\xi - 1)^2} + \frac{1}{2}, \quad (7)$$

$\alpha, \mu$  – постоянные материала.

В третьем разделе осуществлено аналитическое исследование функций энтропии и удельной теплоемкости, которое позволяет рассматривать процесс сверхпластической деформации с позиций самоорганизации диссипативных структур возрастающей сложности в неравновесных открытых системах.

В главе 3.1 обращено внимание на некоторые особенности теории фазовых переходов Ландау. Показано, что в точке фазового перехода удельная теплоемкость и другие физические величины имеют особенности, описываемые критическими показателями. Теория, естественно, не отвечает экспериментальным данным. Расхожее мнение об этом заключается в неадекватном учете флуктуаций.

Учет флуктуаций для равновесных систем можно производить с привлечением аппарата ренормализационной группы Вильсона (глава 3.2).

Идея ренормализационной группы и  $\epsilon$ -разложения дает возможность более аккуратно рассмотреть проблему фазового перехода, это чем принято в теории Ландау. В этой связи теорию Ландау можно рассматривать как первый шаг в описании явлений в критической точке, а идеи Вильсона – следующим.

В главе 3.3 предлагается рассматривать динамическую сверхпластичность как размытый фазовый переход. При этом в самой модели (1), (2) априорно введено условие непрерывности. И, действительно, удельная теплоемкость не может быть разрывной функцией из физических соображений.

Наложение внешней силы приводит к расширению области фазового перехода и последний становится многостадийным и размытым; вместо дискретной температурной точки появляется некоторый термический интервал, в котором происходит фазовый переход, т.е. в процессе сверхпластической деформации материал претерпевает фазовое превращение.

В главе 3.4 осуществлена вероятностная оценка параметра порядка.

При этом акцентируется внимание на реакции неравновесной системы на поведение, аналогичное разрывам теплоемкости, следующем из теории фазовых переходов второго рода.

Среднеквадратичное отклонение параметра порядка (характеризующего кинематику сверхпластической деформации) определится из выражения

$$\frac{1}{2} \langle \eta^2 \rangle = -\frac{\partial}{\partial \beta} \ln \int \exp(-\Phi) d\eta, \quad (8)$$

Для вычисления интеграла (8) полагаем, что подинтегральная функция имеет максимум при любом значении параметра порядка, принадлежащего диапазону сверхпластичности. Считаем, что при этом взято одно значение  $\eta = \bar{\eta}$ .

Вводим разложение для минимального значения  $\Phi$ , ограничиваясь только квадратичными членами,

$$\Phi = \Phi(\bar{\eta}) + \frac{1}{2} \Phi''(\bar{\eta})(\eta - \bar{\eta})^2. \quad (9)$$

Подставляем (9) в интеграл (8) и для среднеквадратичного отклонения параметра порядка будем иметь

$$\langle \eta^2 \rangle = \bar{\eta}^2 + \frac{1}{3m_0 \bar{\eta}^2 + \beta}. \quad (10)$$

Полученный результат означает, что диапазон параметра порядка по температурам в условиях сверхпластичности ограничен значениями  $\eta = \bar{\eta}$  и равняется

$$\bar{\eta} = \pm (\beta / 3m_0)^{1/2}. \quad (11)$$

Зависимость (10) соответствует модельным представлениям (1), ..., (7), причем разрывы отвечают точкам бифуркации, при переходе через которые свойства среды кардинально меняются.

Явные выражения для удельной теплоемкости и плотности энтропии записаны с привлечением зависимостей (1), ..., (7) и приняты для анализа эволюции открытой неравновесной системы, которой моделируется процесс температурно-скоростной деформации, включая диапазоны сверхпластичности (главы 3.5, 3.6).

При определении удельной теплоемкости в рамках соотношений (1), ..., (7) учтена зависимость параметра порядка как от кинематических переменных, так и от температуры. Кроме того, в процедуру описания закономерностей входит непрерывность управляющего параметра  $\beta$  и внутренних параметров состояния  $\sigma^*$ ,  $\varepsilon^*$ . Иными словами, для функций отклика априорно, как указывалось выше, заложена непрерывность.

Удельную теплоемкость определяют по формулам

$$\Delta C = -\theta \left( \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right), \quad F = k\theta\Phi, \quad (12)$$

где  $\Delta C$  – приращение удельной теплоемкости,  $F$  – свободная энергия Гельмгольца,  $\Phi$  – потенциал катастрофы сборки (1),  $k$  – постоянная Больцмана.

Теперь имеем

$$\frac{\Delta C(\xi)}{k} = a_0(\xi) + a_1(\xi)\eta + a_2(\xi)\eta^2 + a_3(\xi)\eta^3 + a_4(\xi)\eta^4. \quad (13)$$

Здесь

$$a_0(\xi) = (\xi + \nu)^2 \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2; \quad (14)$$

$$a_1(\xi) = -2(\xi + \nu) \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + (\xi + \nu)^2 \left[ \beta \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + 2\beta^2 \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 + \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 - \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d\xi^2} \right]; \quad (15)$$

$$a_2(\xi) = -(\xi + \nu) \left[ \frac{d\beta}{d\xi} + 2\beta \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right] - (\xi + \nu)^2 \left[ -\beta \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + \frac{1}{2} \frac{d^2 \beta}{d\xi^2} - 2\beta^2 \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 + \beta \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d\xi^2} + \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right]; \quad (16)$$

$$a_3(\xi) = (\xi + \nu)^2 4m_0 \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 \quad (17)$$

$$a_4(\xi) = -2(\xi + \nu) m_0 \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + (\xi + \nu)^2 4m_0 \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 - (\xi + \nu)^2 m_0 \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d\xi^2} \quad (18)$$

причем  $\beta$  есть решение уравнения

$$(1 - \beta)^{-\alpha} = 1 - \frac{1 + \alpha}{2\alpha} \frac{\mu - 1}{\mu} \ln \frac{1 + \mu(2\xi - 1)^2}{1 + \mu}; \quad (19)$$

$\nu = \theta_c'' / \Delta\theta_c$ , где  $\Delta\theta = \theta_c'' - \theta_c'$  — температурный диапазон сверхпластичности.

С учетом малости слагаемые  $a_0(\xi)$ ;  $a_3(\xi)\eta^3$ ;  $a_4(\xi)\eta^4$  можно принять несущественными, практически не влияющими на величину удельной теплоемкости (рис.1). В связи со сказанным выражение (13) можно переписать так

$$\frac{\Delta C_1(\xi)}{k} = a_1(\xi)\eta + a_2(\xi)\eta^2. \quad (20)$$

Из рис. 2 видно, что приращение удельной теплоемкости переходит через максимум в середине температурного интервала сверхпластичности. Конкретные расчеты выполнены для алюминиевого сплава АМг5. Качественная картина поведения функции  $\Delta C / k \sim \xi$  не изменится и для других изученных сплавов (АК4, Д18Т, АК6).

Исследование функции энтропии позволяет рассмотреть процесс деформации с позиций самоорганизации диссипативных структур в неравновесных открытых системах.

Плотность энтропии определяется зависимостью

$$S = -\partial F / \partial \theta. \quad (21)$$

Если учесть, как и выше, что свободная энергия Гельмгольца и плотность потенциала связаны соотношением  $\Phi = F/k\theta$  и при формулировке модели энергетическая функция состояния была принята в форме потенциала катастрофы сборки (1) с учетом влияния внешнего поля, то для производства энтропии получим

$$\frac{\Delta S}{k} = \frac{3}{4} m_0 \eta^3 + \frac{1}{2} \beta \eta^2 + (\xi + \nu) \left[ \frac{1}{2} \frac{d\beta}{d\xi} \eta^2 - \beta (3m_0 \eta^3 + 3m_0 \eta^4 + \beta \eta^2 + \beta \eta) \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right]. \quad (22)$$

На рис. 3 приведены графики зависимости приращения производства энтропии от скорости деформации ( $\Delta S / k \sim \eta$ ) в условиях сверхпластичности при температурах  $\xi = 0, 0.1, \dots, 0.5$  (рис. 3 а) и  $\xi = 0.5, \dots, 1$  (рис. 3 б). Общим для этих температур является тенденция стремления к нулю производства энтропии в среднем значении скоростного интервала сверхпластичности ( $\eta = 0$ ).

Анализ удельной теплоемкости, приращение которой в режимах сверхпластичности носит пикообразный характер (рис. 2), подтверждается качественным соответствием известным dilatометрическим испытаниям. Минимизации энтропии отвечает образование упорядоченной равноосной ультрамелкозернистой структуры, позволяющей прогнозировать возникновение структурной ситуации, способствующей осуществлению механизма зернограничного проскальзывания. Иными словами, путем самоорганизации в условиях, далеких от термодинамического равновесия, реализуется процесс оптимального структурообразования, сопровождающийся выделением энтропии открытой системой.

**В четвертом разделе** на базе известного в неравновесной статистической механике уравнения Фоккера — Планка разработана макрокинетическая модель, позволяющая анализировать механизмы деформации.

В главе 4.1 кратко освещена общая теория стохастических процессов. Параметр порядка  $\eta$  рассматривается как случайная величина, а классификация случайных процессов позволяет в случаях непрерывного физического воздействия отслеживать на достаточно малых промежутках между последовательными событиями причинную связь.

Особое место в вероятностных процедурах занимают непрерывные марковские процессы, в которых закон распределения ординаты в любой будущей момент зависят только от значения ординаты в предыдущий момент. В теории марковских процессов (глава 4.2) основная роль отводится интегральному уравнению Чепмена – Колмогорова (Смолуховского).

Когда же случайный процесс не зависит от начального момента, а определяется только временным промежутком, получается дифференциальное уравнение в частных производных для вероятности перехода, называемое уравнением Фоккера – Планка (глава 4.3). Для нахождения распределений, однородных во времени, уравнение Фоккера – Планка принимает стационарную форму.

Учитывая характер поведения функции приращения удельной теплоемкости (рис. 2), будем иметь

$$\frac{d}{d\eta} [R(\eta)\Delta C(\eta)] - \frac{1}{2} \frac{d}{d\eta} [Q(\eta)\Delta C(\eta)] = 0. \quad (23)$$

Здесь на функцию  $R(\eta)$  возлагается ответственность за реализацию механизма зернограничного проскальзывания (коэффициент “дрейфа”), а  $Q(\eta)$  считается коэффициентом диффузии.

Понятно, что в термомеханических режимах сверхпластичности активизируется механизм зернограничного проскальзывания, который сравнительно с другими формами массопереноса вносит наибольший вклад в накопление необратимых деформаций. Поэтому диффузионные процессы можно принять замороженными, а коэффициент диффузии считать постоянным ( $Q(\eta) = Q_0$ ). С учетом сказанного уравнение (23) переписывается так

$$\frac{d}{d\eta} [R(\eta)\Delta C(\eta)] - \frac{1}{2} Q_0 \frac{d^2 \Delta C(\eta)}{d\eta^2} = 0. \quad (24)$$

Если учесть, что для функции  $\Delta C(\eta)$  имеем (20), то, используя (24), после несложных преобразований получаем линейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dR(\eta)}{d\eta} + \frac{2a\eta + b}{a\eta^2 + b\eta} R(\eta) = \frac{aQ_0}{a\eta^2 + b\eta}. \quad (25)$$

Здесь  $a = a_2(\xi)$ ,  $b = a_1(\xi)$ .

Решение уравнения (25) ищется при условии, утверждающем, что на границе сверхпластичности и метастабильной зоны имеем:

$$R(\eta) \Big|_{\eta = \pm \left(-\frac{\beta}{3m_0}\right)^{1/2}} = R_0. \quad (26)$$

Если учесть, что при переходе от метастабильного состояния к области структурной неустойчивости ( $\eta = \pm \left(-\beta/m_0\right)^{1/2}$ ) функция  $R(\eta)$ , отвечающая за эффект зернограничного проскальзывания, обращается в нуль, то интеграл уравнения (25) будет иметь следующий вид

$$R(\eta) = \begin{cases} \frac{R_0 \left[ a \left(-\beta/3m_0\right) - b \left(-\beta/3m_0\right)^{1/2} \right] + a Q_0 \left[ \eta + \left(-\beta/3m_0\right)^{1/2} \right]}{a\eta^2 + b\eta} & \text{где } \left(-\beta/3m_0\right)^{1/2} < \eta < 0; \\ \frac{R_0 \left[ a \left(-\beta/3m_0\right) + b \left(-\beta/3m_0\right)^{1/2} \right] + a Q_0 \left[ \eta - \left(-\beta/3m_0\right)^{1/2} \right]}{a\eta^2 + b\eta} & \text{где } 0 \leq \eta \leq -\left(-\beta/3m_0\right)^{1/2}. \end{cases} \quad (27)$$

Из рис. 4.а видно, что к середине скоростного диапазона сверхпластичности ( $\eta \rightarrow 0$ ) все механизмы деформации, кроме проскальзывания по границам зерен, становятся несущественным ( $R(0) \rightarrow \infty$ )

Вне кинематического диапазона сверхпластичности  $R(\eta) = 0$  и активизируются традиционные формы массопереноса.

Уравнение (23) при этом переписывается так

$$\frac{d^2}{d\eta^2} [Q(\eta)\Delta C(\eta)] = 0. \quad (28)$$

Принимая во внимание (20), уравнение (28) преобразуется в дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 Q(\eta)}{d\eta^2} + 2\phi_1(\eta) \frac{dQ(\eta)}{d\eta} + \phi_2(\eta) Q(\eta) = 0, \quad (29)$$

где  $\phi_1(\eta) = \frac{2a\eta + b}{a\eta^2 + b\eta}$ ;  $\phi_2(\eta) = \frac{2a}{a\eta^2 + b\eta}$ .

Уравнением (28) предполагается, что функция  $R(\eta)$  вне диапазона сверхпластичности  $\eta \notin [(-\beta/m_0)^{1/2}; (-\beta/m_0)^{1/2}]$  обращается в нуль. Полагая, что в метастабильном состоянии ( $\eta \in [\pm(-\beta/3m_0)^{1/2}; \pm(-\beta/m_0)^{1/2}]$ ) известные формы массопереноса сосуществуют с зернограничным проскальзыванием, то, следовательно, граничные условия можно записать так:

$$Q(\eta) \Big|_{\eta = \pm(-\beta/3m_0)^{1/2}} = Q_0; \quad \frac{dQ(\eta)}{d\eta} \Big|_{\eta = \pm(-\beta/3m_0)^{1/2}} = 0. \quad (30)$$

С учетом условий (30) для коэффициента диффузии получаем:

$$\frac{Q(\eta)}{Q_0} = \begin{cases} \frac{[-2a(-\beta/3m_0)^{1/2} - b] \eta - a(-\beta/3m_0)}{a\eta^2 + b\eta} & \text{где } \eta \leq -(-\beta/3m_0)^{1/2} \\ \frac{[2a(-\beta/3m_0)^{1/2} + b] \eta - a(-\beta/3m_0)}{a\eta^2 + b\eta} & \text{где } \eta \geq (-\beta/3m_0)^{1/2} \end{cases} \quad (31)$$

На рис. 4.б приведены графики, характеризующие развитие диффузионных процессов вне скоростного диапазона сверхпластичности и построенные соответственно для сплавов АМг5 при  $\xi = 0,25$  на основании формулы (31). Характер полученных зависимостей качественно не изменится и для других температур, принадлежащих сверхпластическому диапазону ( $\xi \in ]0, 1[$ ). Из графика видно, что при приближении к скоростному интервалу сверхпластичности влияние диффузионных процессов убывает, а коэффициент диффузии стремится к значению  $Q_0$ , соответствующему сверхпластичности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Макрокинетический анализ механизмов сверхпластической деформации осуществлен на основании модели, представляющей связь между напряжениями, температурой и кинематическими характеристиками, причем энергетическую функцию состояния предложено рассматривать в форме потенциала катастрофы сборки. Уравнение состояния получено минимизацией потенциала по параметру порядка и дополнено кинетическими уравнениями для управляющего параметра и внутренних параметров состояния. Полученные соотношения пригодны для количественного описания закономерностей деформирования алюминиевых сплавов при наличии явного выражения функции чувствительности среды к структурным превращениям.

2. Сверхпластичность представляется эффектом, реализуемым в термомеханических условиях развития неравновесного размытого фазового перехода. Показано, что для неравновесной системы функция отклика на сильные структурные флуктуации в форме удельной теплоемкости не претерпевает разрыва непрерывности. Непрерывностью функции удельной теплоемкости объясняется связь сверхпластичности с теорией размытых фазовых переходов.

3. Вероятностной оценкой параметра порядка подтвержден диапазон изменения скоростей деформации в термических условиях проявления эффекта сверхпластичности. Установлено, что в интервале сверхпластичности зависимость приращения удельной теплоемкости от температуры носит пикообразный характер. Максимуму удельной теплоемкости соответствует оптимальная температура сверхпластичности. Последнее не противоречит известным dilatометрическим испытаниям.

4. Анализ поведение функции приращения производства энтропии позволил рассмотреть процесс сверхпластичности с позиций самоорганизации диссипативных структур в неравновесных открытых системах.

5. Показано, что макрокинетика деформации описывается стационарной формой известного в неравновесной статистической механике уравнения Фоккера – Планка, в предположении, что процесс не выходит из термического диапазона сверхпластичности, и в качестве функции плотности распределения вероятности принято приращение удельной теплоемкости.

6. Приняв, что в скоростном диапазоне сверхпластичности преобладает сравнительно с диффузионным и дислокационным механизмом зернограничного проскальзывания ( $Q(\eta) = Q_0 = const$ ), установлен характер изменения коэффициента “дрейфа” – функции, ответственный за эффекты проскальзывания по границам зерен. Результат показывает, что этот механизм особенно активизируется к середине скоростного интервала сверхпластичности.

7. Считая вне скоростного диапазона сверхпластичности эффект проскальзывания по границам зерен нулевым ( $R(\eta) = 0$ ), показано, что диффузионная функция при этом обнаруживает тенденцию к снижению при приближении к интервалу скоростей сверхпластичности.

### ПУБЛИКАЦИИ

1. *Адигамов Н.С., Аманбаева Г.М.* К теории идеальной пластичности с учетом процессов старения // Материалы 4-й международной научной конференции “Прочность и разрушение материалов и конструкций”. – Оренбург, 2005. – №1. – С. 22 – 25.
2. *Аманбаева Г.М., Китаева Д.А.* О термокинетике при динамической сверхпластичности // Актуальные проблемы механики и машиностроения: Тр. Междунар. науч. конф. – Алматы: Изд-во “ЭВЕРО”, 2005. – Т. 1. – С. 89 – 93.
3. *Аманбаева Г.М., Китаева Д.А.* К анализу удельной теплоемкости при динамической сверхпластичности // Вестник ОшГУ. 2005. – №3. – С. 180 – 184.
4. *Аманбаева Г.А., Рудаев Я.И.* Термокинетика флуктуирующих параметров динамической сверхпластичности // Известия КГТУ им. И. Раззакова “Инновации в образовании, науке и технике”: Международная научно-техническая конференция. – Бишкек, 2006. – №9. Т. 2. – С. 235–240.
5. *Аманбаева Г.М.* Термокинетика флуктуирующих параметров динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов // Вестник ОшГУ. – 2006. – №4. – С.146 – 150.
6. *Amanbaeva G., Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I.* Thermokinetics fluctuating parameters of dynamic superplasticity // XXXIV – Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics». – St. Petersburg (Repino), 2006. – P. 17.

7. *Аманбаева Г.М., Китаева Д.А., Рудаев Я.И.* Термокинетический анализ параметров динамической сверхпластичности // Математическое моделирование систем и процессов (ПермГТУ), 2006. – №14. – С. 6–10.
8. *Аманбаева Г.М.* Энтروпийная оценка модели динамической сверхпластичности // Вестник КазНУ, серия механика. – №1. – Алматы, 2007. – С. 125–128.
9. *Аманбаева Г.М.* О макрокинетике динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов // ВЕСТНИК КРСУ. – Бишкек, 2007. – Т.7. – №4. – С. 120–126.

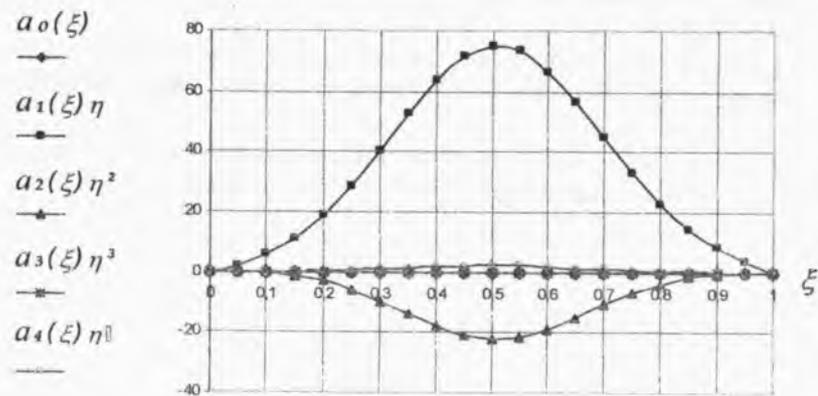


Рис. 1. Графики зависимостей слагаемых  $a_0(\xi)$ ,  $a_1(\xi)\eta$ ,  $a_2(\xi)\eta^2$ ,  $a_3(\xi)\eta^3$ ,  $a_4(\xi)\eta^4$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

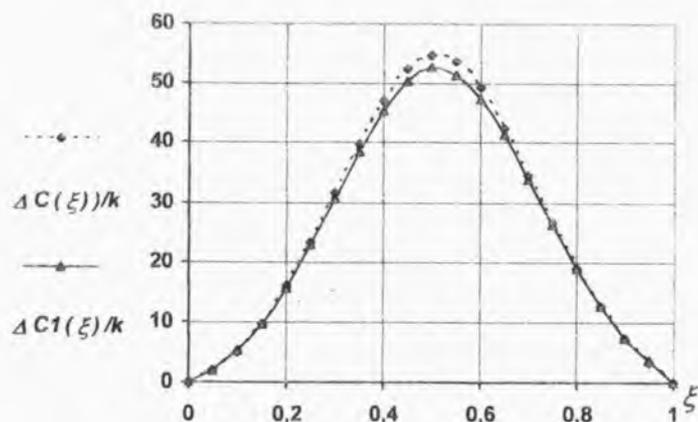
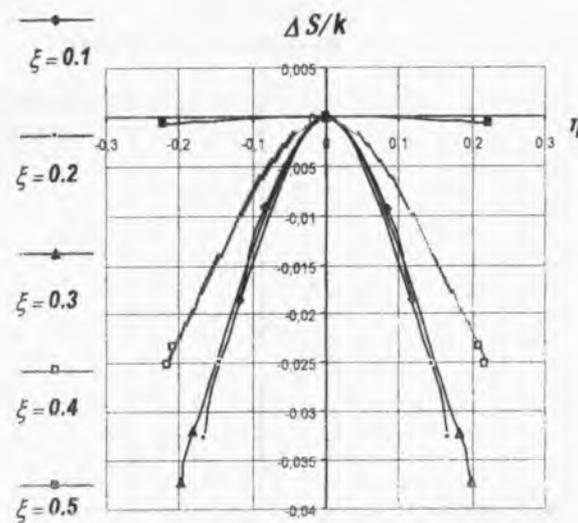
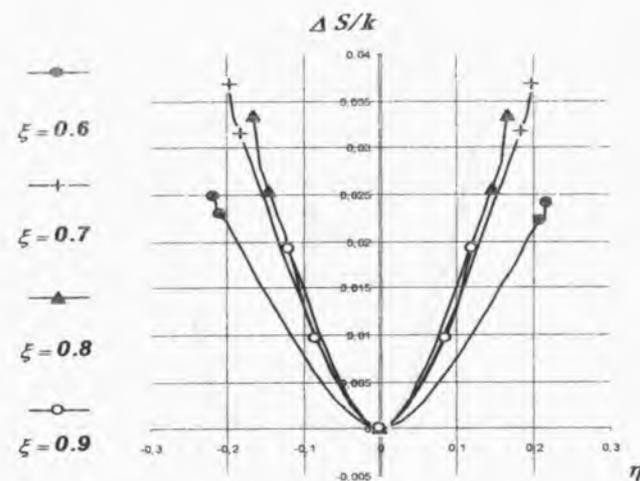


Рис. 2. Функция приращения удельной теплоемкости в температурном интервале сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость приращения производства энтропии от скорости деформации в условиях сверхпластичности при а)  $\xi = 0, 0.1, \dots, 0.5$  и б)  $\xi = 0.5, \dots, 1$ .

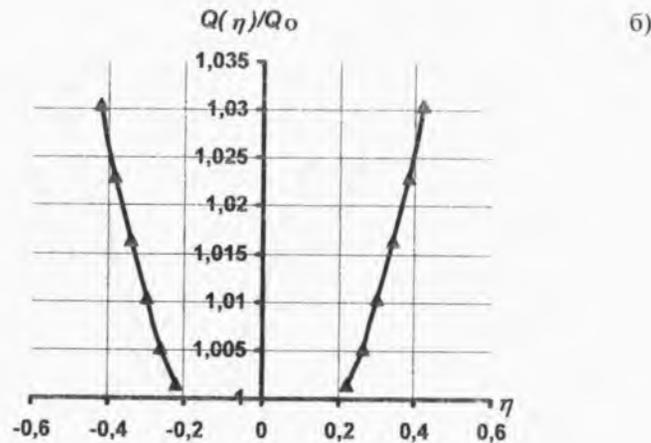
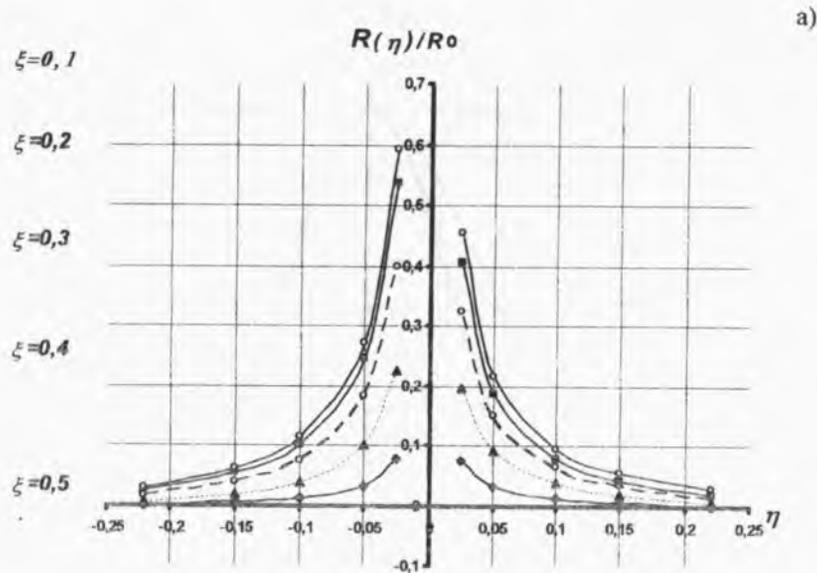


Рис. 4. Поведение функции а) коэффициент дрейфа  $R(\eta)/R_0$  и коэффициента диффузии б)  $Q(\eta)/Q_0$  в зависимости от параметра порядка  $\eta$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

РЕЗЮМЕ  
Аманбаева Гулнара Муктаровна

На тему: МАКРОКИНЕТИКА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

На соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04.—механика деформируемого твердого тела

**Ключевые слова:** динамическая сверхпластичность, нормированное напряжение, нормированная температура, скорость деформации, параметр порядка, размытый фазовый переход, удельная теплоемкость, энтропия, зернограничное проскальзывание, коэффициент "дрейфа", коэффициент диффузии, деформация.

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию, позволяющему продвинуться в осмыслении и понимании внутренних изменений, сопровождающих сверхпластическую деформацию динамического типа. Макрокинетический анализ механизмов сверхпластической деформации осуществлен на основании модели, представляющей связь между напряжениями, температурой и кинематическими характеристиками, причем энергетическую функцию состояния предложено рассматривать в форме потенциала катастрофы сборки. Основное внимание обращено на поведение термодинамических функций отклика — энтропии и удельной теплоемкости. При этом с позиции вероятностной оценки параметра порядка, который считается ответственным за изменение структурных состояний, получены явные выражения для приращений удельной теплоемкости и производства энтропии. Для анализа поведения функции приращения удельной теплоемкости привлечена стационарная форма известного в неравновесной статистической механике уравнения Фоккера — Планка. Сформулированная на этом основании макрокинетическая модель использована для оценки вклада различных механизмов в термических условиях сверхпластичности в процесс накопления необратимых деформаций.

## РЕЗЮМЕ

Аманбаева Гулнара Муктаровна

Тема: **ОНОР ЖАЙ АЛЮМИНИЙ КУЙМАЛАРЫНЫН ЖОГОРКУ ИЙКЕМДУУЛУГУНУН МАКРОКИНЕТИКАСЫ**

01.02.04. — деформациялануучу катуу нерселердин механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаттык даражасын алуу учун

**Негизги создор:** динамикалык жогорку ийкемдуулук, нормалдаштырылган чыналуу, нормалдаштырылган температура, деформациянын ылдамдыгы, иретуулуктун параметри, тунук эмес фазалык отуу, салыштырма жылуулук сыйымдуулук, энтропия, данчалар аралык жылышуу, "каторулуу" коэффициенттери, диффузия коэффициенти.

Диссертациялык жумуш динамикалык жогорку ийкемдуулук деформациясында коштолуучу деформациялануучу нерсенин ички тузулушунун озгоруусун теория жузундо тушундурууго арналган. Жогорку ийкемдуулуктун механизминин макрокинетикалык анализи чыналууну, температураны жана кинематикалык муноздомолорду байланыштырган моделдин негизинде алынды. Моделде абалдын энергетикалык функциясы катары чогултуунун "кокустук" потенциалы алынды. Негизги конул жылуулук сыйымдуулуктун жана энтропиянын озгоруусуно бурулган. Бул учун структуралык тузулушко жооптуу деп эсептелген иретуулук параметринин ыктымалдуулук баасынын позициясында салыштырма жылуулук сыйымдуулук жана энтропия учун туюнтма алынды. Салыштырма жылуулук сыйымдуулукту анализдоо учун тен салмаксыз статистикалык механикадагы Фоккера – Планканын тендемеси колдонулду. Булардын негизинде термикалык режимде жогорку ийкемдуулуктогу калыбына келбоочу деформация процессиндеги турдуу механизмдердин салымын баалоо учун макрокинетикалык модел иштелип чыккты.

## THE RESUME

Amanbaeva Gulnara Muktarovna

On a theme: **MACROKINETICA SUPERPLASTICITY OF INDUSTRIAL ALUMINIUM ALLOYS**

Present his thesis for a candidate of physical and mathematical sciences on speciality mechanical deformation of solid body – 01.02.04.

**Keywords:** dynamic superplasticity, stress, temperature, strain-rates, parameter of the order, the dim phase transition, a specific thermal capacity, entropy, grained-boundary sliding, coefficient of "drift", coefficient of diffusion, deformation.

Dissertational work is devoted to the theoretical research, allowing to promote in judgement and understanding of the internal changes accompanying superplastic deformation of dynamic type. The macrokinetic analysis of mechanisms of superplastic deformation is carried out on the basis of the model representing connection between stress, temperature and kinematic characteristics, and power function of a state is offered for considering in the form of potential of catastrophe cusp. The basic attention is turned on behaviour of thermodynamic functions of the response – entropy and a specific thermal capacity. Thus from a position of a likelihood estimation of parameter of the order which is considered responsible for change of structural conditions, obvious expressions for increments of a specific thermal capacity and entropy are received. For the analysis of behaviour of function of an increment of a specific thermal capacity the stationary form of the known equation in nonequilibrium statistical mechanics Focker – Planck is involved. The macrokinetic model formulated on this basis is used for an estimation of the contribution of various mechanisms in thermal conditions of superplasticity in process of accumulation of irreversible deformations.