

# АНАЛИЗ К ПРИРАЩЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Аманбаева Г.М.<sup>1</sup>, Абдыбалиева К.<sup>2</sup> Email: Amanbaeva662@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Аманбаева Гулнара Муктаровна – кандидат физико-математических наук, доцент,  
кафедра естественнонаучных дисциплин,  
Международная высшая школа медицины;

<sup>2</sup>Абдыбалиева Канышай – кандидат педагогических наук, доцент,  
кафедра физики, математики, информатики и компьютерных технологий,  
Кыргызская государственная медицинская академия им. И.К. Ахунбаева,  
г. Бишкек, Кыргызская Республика

**Аннотация:** динамическая сверхпластичность алюминиевых сплавов рассматривается с позиций теории неравновесных фазовых переходов. Сформулировано условие непрерывности функции удельной теплоемкости в термомеханических режимах сверхпластичности. Определена функция приращения удельной теплоемкости, которая в термических режимах сверхпластичности достигается упорядочением структуры, и связь эффектом размытого неравновесного фазового перехода с динамической рекристаллизацией. В рамках разработанных определяющих соотношений проанализирована эволюция открытой неравновесной системы, моделирующей процесс температурно-скоростной деформации материалов, с привлечением термодинамической функции отклика. Показано соответствие пика сверхпластичности максимуму удельной теплоемкости.

**Ключевые слова:** динамическая сверхпластичность, самоорганизация, скорость деформации, параметр порядка, размытый фазовый переход, удельная теплоемкость, зернограничное проскальзывание.

## ANALYSIS TO THE INCREASE OF SPECIFIC HEAT CAPACITY AT DYNAMIC SUPERPLASTICITY

Amanbaeva G.M.<sup>1</sup>, Abdybalieva K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Amanbaeva Gulnara Muktarovna – Candidate physical-mathematical sciences, Assistant Professor,  
DEPARTMENT OF NATURAL SCIENCES,  
INTERNATIONAL SCHOOL OF MEDICINE;

<sup>2</sup>Abdybalieva Kanyshai – Candidate of pedagogical sciences, Assistant Professor,  
DEPARTMENT OF PHYSICS, MATHEMATICS, INFORMATICS AND COMPUTER TECHNOLOGIES,  
KYRGYZ STATE MEDICAL ACADEMY NAMED I.K. AKHUNBAEV,  
BISHKEK, REPUBLIC OF KYRGYZSTAN

**Abstract:** the dynamic superplasticity of aluminum alloys is considered from positions of the nonequilibrium phase transition theory. The continuity condition for the specific heat function in thermomechanical superplasticity regimes is formulated. The function of the specific heat increment is determined, which in thermal superplasticity regimes is achieved by ordering the structure and coupling the effect of the nonequilibrium on dim phase transition with dynamic recrystallization. The evolution of open and nonequilibrium system, which the temperature-rate process of materials simulated, within the framework of worked out defining relations is analysed with attraction thermodynamic response function. Correspondence of superplasticity peak with maximum specific heat is shown.

**Keywords:** dynamic superplasticity, self-organization, strain rate, parameter of the order, the dim phase transition, specific heat capacity, grain boundary slippage.

УДК 593.3; 548.4

При динамической сверхпластичности, как известно, формирование мелкого зерна происходит в процесс нагрева и деформации [1]. Последнее, естественно, связано с сильнейшей структурной перестройкой в условиях, при которых имеют место аллотропическое превращения различной природы. В частности, для алюминиевых сплавов таким переходом является динамическая рекристаллизация [2].

Таким образом, при анализе на макроуровне эффектов, характеризующих динамическую сверхпластичность, полезным инструментом может оказаться использование представлений о неравновесных фазовых переходах.

Использование квазистационарного подхода к исследованию динамических процессов приводит к тому, что развитие любой сложной системы можно рассматривать как смену одного устойчивого состояния другим с кратким периодом переходного процесса между ними. Это позволяет, в соответствии с принципом локального равновесия [3], характеризовать состояние незамкнутой неравновесной системы локальными термодинамическими потенциалами, которые зависят от времени через термодинамические

параметры, причем для всех них выполняются уравнения классической термодинамики. В иносказательной форме последнее утверждение не противоречит положениям рациональной механики сплошных сред [4].

К настоящему времени методология анализа нелинейных динамических систем оформилась в новое научное направление, называемое синергетикой. Следуя [5], будем считать, что синергетика изучает процессы самоорганизации, развития, устойчивости и распада структур различного происхождения.

Самоорганизация, вообще говоря, может быть вызвана различными способами [6]. Но в конкретных случаях одновременного нагрева и статического нагружения металлических материалов можно считать, что реализуется медленное однородное изменение воздействия окружающей среды, при котором сложная система в некоторых критических точках переходит в новые состояния, отличающиеся более высоким порядком и структурой. Согласно [6], такой способ относится к самоорганизации через изменение управляющих параметров. Процесс самоорганизации осуществляется как последовательность неравновесных фазовых переходов.

Теперь становится очевидным, что гипотеза о физической природе сверхпластичности, сформулированная в [7], имеет синергетическую природу. В соответствии с указанной гипотезой, сверхпластичность есть суперпозиция деформации и одного или нескольких превращений. В таком случае естественно предположить существование критических температурных точек перехода материала в сверхпластическое состояние. Наложение деформаций приводит к появлению вблизи критических точек ограниченной области температур, соответствующих процессу перехода из одного структурно устойчивого состояния к другому.

В [1] сформулирована модель, описывающая поведение промышленных алюминиевых сплавов как в условиях сверхпластичности, так и в пограничных областях термопластичности и высокотемпературной ползучести.

Установлено в [1], что динамическая сверхпластичность реализуется в условиях неравновесного фазового перехода (динамической рекристаллизации), размытого по температурам и скоростям деформации. Естественным представляется оценить установленные зависимости с точки зрения определения представляющих интерес физических величин и получения дополнительной информации. Поэтому логичным можно считать изучения аналогий между фазовыми переходами, происходящими в условиях теплового равновесия и далеких от теплового равновесия. В связи с этим проследим за поведением функций отклика, которые сравнительно легко определяются при известном аналитическом выражении плотности термодинамического потенциала - удельной теплоемкости.

Теплоемкость является [9] существенной характеристикой при исследовании структурных фазовых превращений в сплавах.

Удельную теплоемкость будем определять по известной [9] формуле,

$$\Delta C = -\theta \left( \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \right), \quad (1)$$

где  $F$  , - свободная энергия;  $\theta$  - абсолютная температура.

Полагаем далее, что плотность потенциала можно [9] через свободную энергию выразить как  $\Phi = F/k\theta$  , где  $k$  - постоянная Больцмана.

Для приращения удельной теплоемкости получено [8] выражение

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

Здесь

$$a_0(\xi) = (\xi + \nu)^2 \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} \right)^2; \quad (3)$$

$$a_1(\xi) = -2(\xi + \nu) \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} + (\xi + \nu)^2 \left[ \beta \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} + 2\beta^2 \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} \right)^2 + \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} \right)^2 - \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d \xi^2} \right]; \quad (4)$$

$$a_2(\xi) = -(\xi + \nu) \left[ \frac{d\beta}{d\xi} + 2\beta \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} \right] - (\xi + \nu)^2 \left[ -\beta \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} + \frac{1}{2} \frac{d^2 \beta}{d \xi^2} - 2\beta^2 \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} \right)^2 + \beta \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d \xi^2} + \frac{d\beta}{d\xi} \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} \right]; \quad (5)$$

$$a_3(\xi) = (\xi + \nu)^2 4m_0 \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d \xi} \right)^2 \quad (6)$$

$$a_4(\xi) = -2(\xi + \nu)m_0 \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} + (\xi + \nu)^2 4m_0 \beta \left( \frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} \right)^2 - (\xi + \nu)^2 m_0 \frac{d^2 \ln \sigma^*}{d\xi^2} \quad (7)$$

причем  $\beta$  есть решение уравнения

$$(1 - \beta)^{-\alpha} = 1 - \frac{1 + \alpha}{2\alpha} \frac{\mu - 1}{\mu} \ln \frac{1 + \mu(2\xi - 1)^2}{1 + \mu}; \quad (8)$$

а  $\nu = \theta_c^H / \Delta\theta_c$ , где  $\Delta\theta_c = \theta_c^s - \theta_c^H$  - температурный диапазон сверхпластичности;  $\xi = \frac{\theta - \theta_c^H}{\theta_c^s - \theta_c^H}$  - нормированная температура;  $\theta$  - абсолютная температура;  $\theta_c^H, \theta_c^s$  - нижняя и

верхняя границы термического диапазона сверхпластичности;  $\alpha, \mu$  - постоянные материала;  $\sigma^*, \dot{\epsilon}^*$  - внутренние альтернативные параметры состояния;

$$\frac{d \ln \sigma^*}{d\xi} = A_0 \exp(\beta - s) \frac{d\beta}{d\xi}; \quad (9)$$

$$\frac{d \ln \dot{\epsilon}^*}{d\xi} = A_0 \exp(\beta - s) \beta \frac{d\beta}{d\xi}. \quad (10)$$

Здесь величина  $s = 0$ , поскольку вычисления производятся только для диапазона сверхпластичности;  $A_0$  - постоянная материала.

Конкретные вычисления выполнены для алюминиевого сплава АМг5 в исходном деформированном состоянии. Параметры материала заимствованы из [1]:  $\alpha = 0,54$ ;  $\mu = 1,08$ ;  $A = -0,8434$ . Укажем также, что  $\theta_c^s = 783K$ ;  $\theta_c^H = 743K$ .

Графики, представленные на рис. 1...5, сведены к единому масштабу и показаны на рис. 6. Очевидно, что слагаемые  $a_0(\xi)$ ;  $a_3(\xi)\eta^3$ ;  $a_4(\xi)\eta^4$  можно принять несущественными, практически не влияющими на величину удельной теплоемкости [10]. В связи со сказанным уравнение (2) можно записать в форме

$$\frac{\Delta C_1(\xi)}{k} = a_1(\xi)\eta + a_2(\xi)\eta^2. \quad (11)$$

На рис. 7 приведены графики изменения приращения удельной теплоемкости в зависимости от приведенной температуры, построенный на основании соотношений (2), (11) в условиях сверхпластичности ( $\xi \in ]1,0[$ ). Параметры материала взяты для сплава АМг5 в деформированном состоянии.

Как видно из графика, приращение удельной теплоемкости переходит через максимум в середине температурного интервала сверхпластичности. Качественная картина поведения функции  $\Delta C/k \sim \xi$  и  $\Delta C_1/k \sim \xi$  не изменится и для других исследованных материалов [10], постоянные параметры которых приведены в [1]. Следовательно, полученный результат находится в соответствии с данными экспериментов, изложенных в [11].

Оценка погрешности вычисления удельной теплоемкости для некоторых сплавов приведены в табл. и относятся к середине температурного диапазона сверхпластичности ( $\xi = 0,5$ ).

Таблица 1. Оценка погрешности вычисления удельной теплоемкости сверхпластических промышленных алюминиевых сплавов

Марка сплава	АМг5	Д18Т	1561	АК6
$\delta, \%$	4,202	19,237	10,735	7,9181

Из табл. видно, что наибольшая сравнительная погрешность вычисленных по формулам (2) и (11) значений удельной теплоемкости приходится на сплав Д18Т. Здесь следует обратить внимание на интересную «особенность» в поведении сплава Д18Т при температуре  $\xi = 0,5$ , обусловленную

следующим. Известно, что существенный вклад в сверхпластическое течение вносит эффект проскальзывания по границам зерен, сопровождаемый процессами внутризеренной деформации, необходимыми для сохранения сплошности материала и предотвращающими значительную накапливаемость повреждений. У сплава Д18Т в процессе нагрева и деформации измельчение зерна (от 30...300 до 2...5 мкм) происходит более резко по сравнению с остальными исследованными материалами [12]. Середина температурного диапазона  $\xi = 0.5$ , в свою очередь, отвечает формированию наиболее оптимальной структуры, где отмеченное расхождение наиболее влияет на результат.

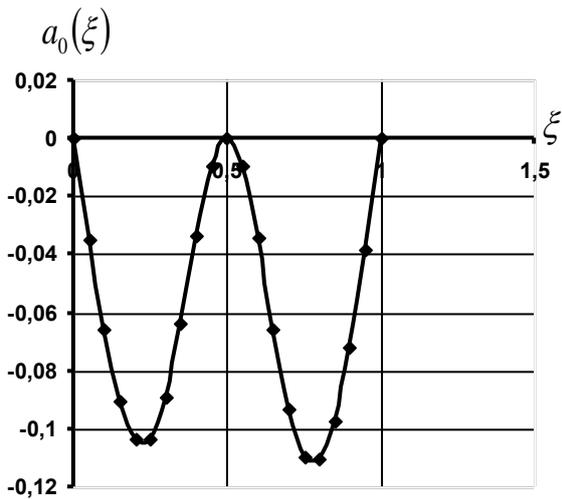


Рис. 1. График зависимости слагаемых  $a_0(\xi)$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

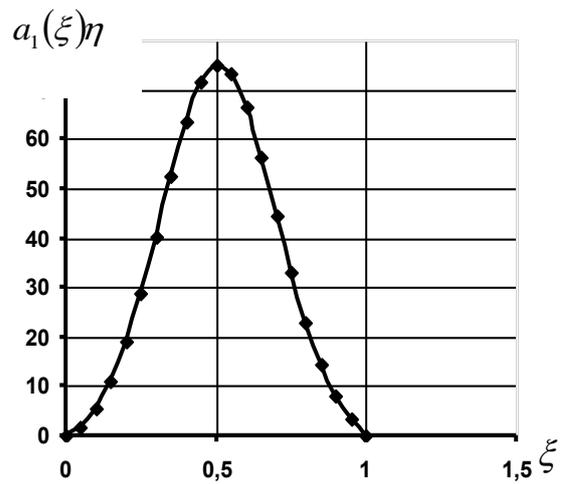


Рис. 2. График зависимости слагаемых  $a_1(\xi)\eta$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

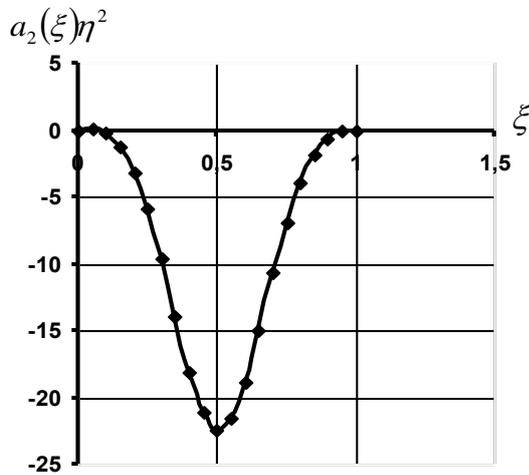


Рис. 3. График зависимости слагаемых  $a_2(\xi)\eta^2$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

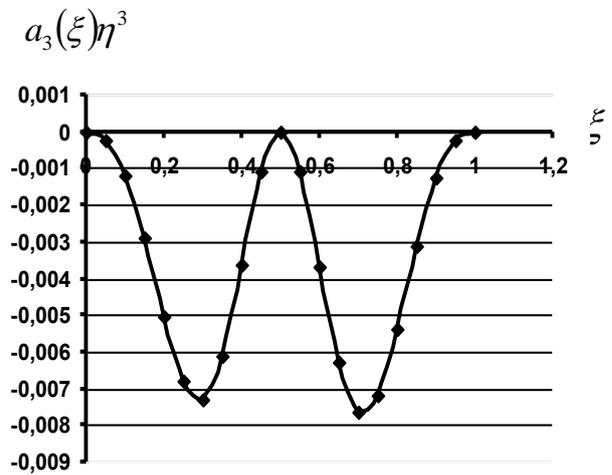


Рис. 4. График зависимости слагаемых  $a_3(\xi)\eta^3$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

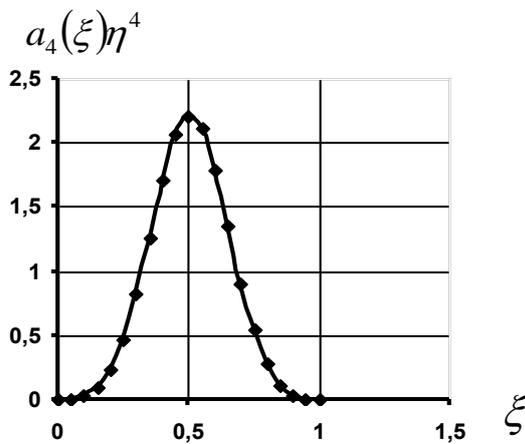


Рис. 5. График зависимости слагаемых  $a_4(\xi)\eta^4$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

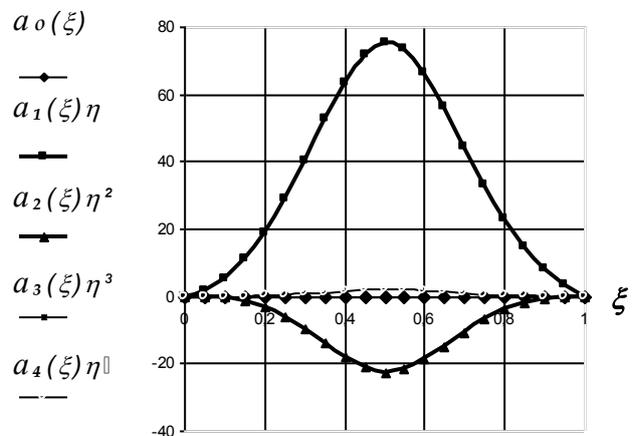


Рис. 6. Графики зависимостей слагаемых  $a_0(\xi)$ ,  $a_1(\xi)\eta$ ,  $a_2(\xi)\eta^2$ ,  $a_3(\xi)\eta^3$ ,  $a_4(\xi)\eta^4$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

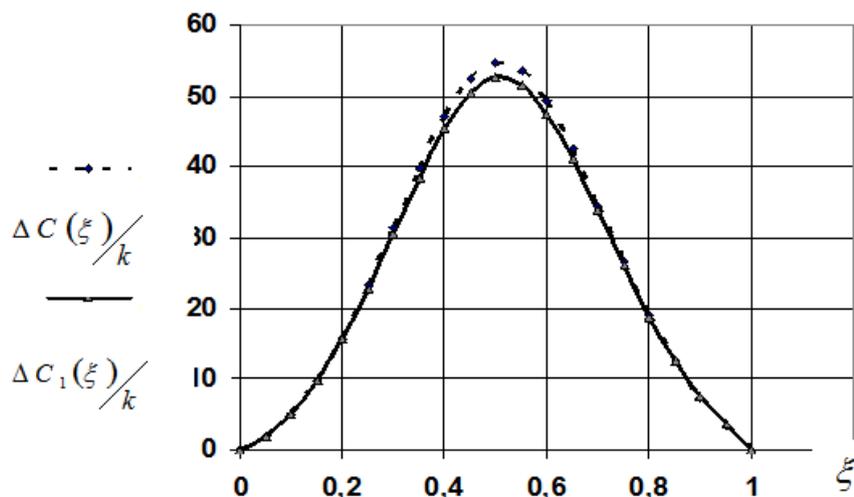


Рис. 7. Функция приращения удельной теплоемкости в температурном интервале сверхпластичности при растяжении сплава АМz5

#### Список литературы / References

1. Рудаев Я.И. Введение в механику динамической сверхпластичности. – Бишкек. Изд-во КРСУ, 2003. – 134 С.
2. Вайнблат Ю.М., Шаршагин Н.А. Динамическая рекристаллизация алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1984. № 2. С. 67-70.
3. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991. 376 С.
4. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. М.: Мир, 1975. 592 С.
5. Механические свойства металлов и сплавов с позиций синергетики /В.С. Иванова, Г.В. Встовский // Итоги науки и техники, материаловедение и термическая обработка. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 24. С. 43-98.
6. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 423 с.
7. Пресняков А.А. О природе сверхпластического течения // Тез. докл. III Всесоюзн. научн.-технич. конф. “Сверхпластичность металлов”. Ч. I. Тула, 1986. С. 4–5.
8. Аманбаева Г.М. О макрокинетике динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов // Вестник КРСУ, 2007. Т. 7. № 4. С. 120–126.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1976. 564 С.
10. Аманбаева Г.М. Макрокинетика сверхпластичности промышленных алюминиевых сплавов. Автореф. дисс.: к. ф.-м. наук. Бишкек, 2008. 8 с.
11. Кувишинов Г.А., Новиков И.И. Об оптимальной температуре сверхпластичности // Теплофизика конденсированных сред. М.: Наука, 1985. С. 41-43.
12. Золотаревский Ю.С., Паняев В.А., Рудаев Я.И. и др. Сверхпластичность некоторых алюминиевых сплавов // Судостроительная промышленность. Серия материаловедение, 1989. Вып. 12. С. 41-48.