

## УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

АМАНБАЕВА Г.М.

КГТУ. им. И. Рazzакова.

[izvestiya@ktu.aknet.kg](mailto:izvestiya@ktu.aknet.kg)

*Динамическая сверхпластичность алюминиевых сплавов рассматривается с позиций теории неравновесных фазовых переходов. В рамках разработанных определяющих соотношений проанализирована эволюция открытой неравновесной системы, моделирующей процесс температурно-скоростной деформации материалов, с привлечением термодинамических функций отклика. Показано соответствие пика сверхпластичности максимуму удельной теплоемкости.*

*The dynamic superplasticity of aluminum alloys is considered from positions of the nonequilibrium phase transition theory. The evolution of an 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.*

При динамической сверхпластичности, как известно, формирование мелкого зерна происходит в процессе 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  $\Delta \theta_c = \theta_c^G - \theta_c^H$  – температурный диапазон сверхпластичности;

$\xi = \frac{\theta - \theta_c^H}{\theta_c^G - \theta_c^H}$  – нормированная температура;  $\theta$  – абсолютная температура;  $\theta_c^H, \theta_c^G$  – нижняя и верхняя границы термического диапазона сверхпластичности;  $\alpha, \mu$  – постоянные материала;  $\sigma^*, \dot{\epsilon}^*$  – внутренние альтернативные параметры состояния;

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

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

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  $\theta_c^e = 783K$ ;  $\theta_c^u = 743K$ .

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 параметров 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. 1 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. 1 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 соплошности материала и предотвращающими значительную

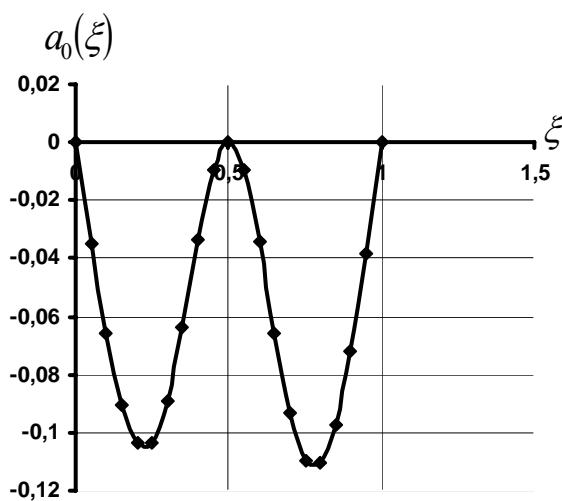


Рис. 1. График зависимости слагаемых  $a_0(\xi)$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5

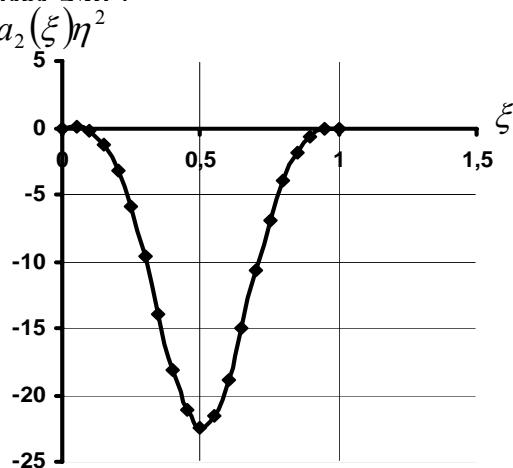


Рис. 3. График зависимости слагаемых  $a_2(\xi)\eta^2$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

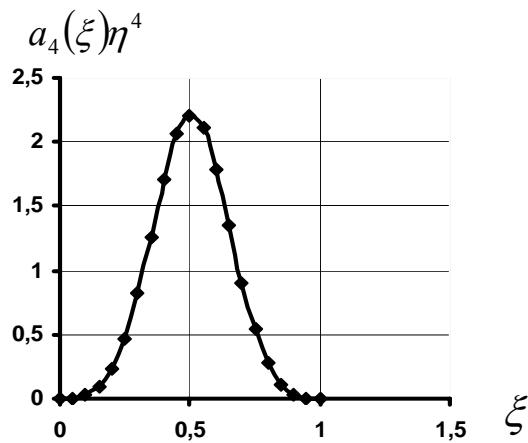


Рис. 5. График зависимости слагаемых  $a_4(\xi)\eta^4$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

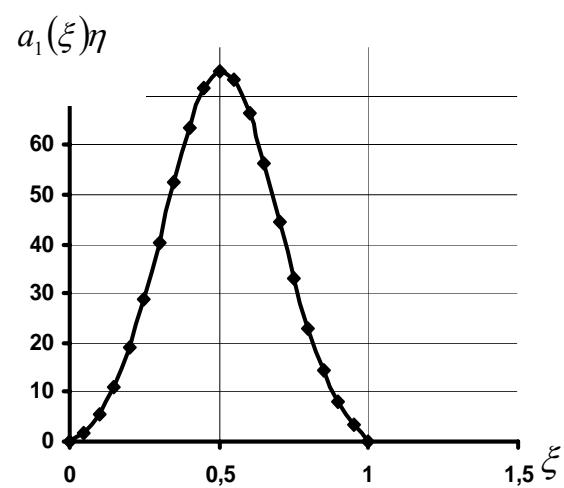


Рис. 2. График зависимости слагаемых  $a_1(\xi)\eta$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

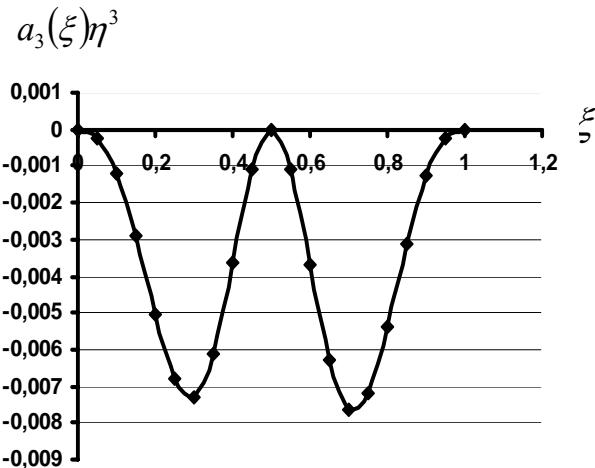


Рис. 4. График зависимости слагаемых  $a_3(\xi)\eta^3$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

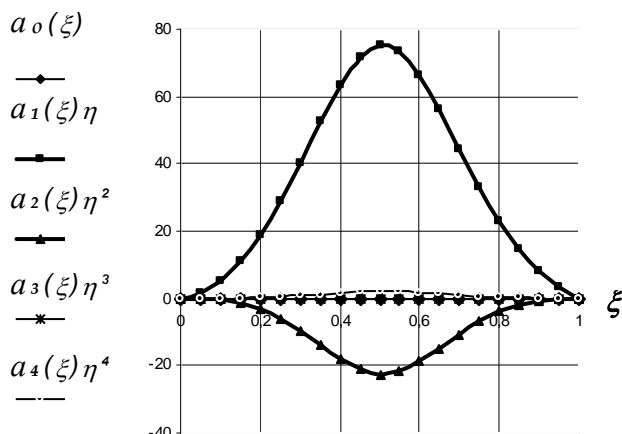


Рис. 6. Графики зависимостей слагаемых  $a_0(\xi)$ ,  $a_1(\xi)\eta$ ,  $a_2(\xi)\eta^2$ ,  $a_3(\xi)\eta^3$ ,  $a_4(\xi)\eta^4$  от нормированной температуры  $\xi$  из диапазона сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

накопляемость 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.

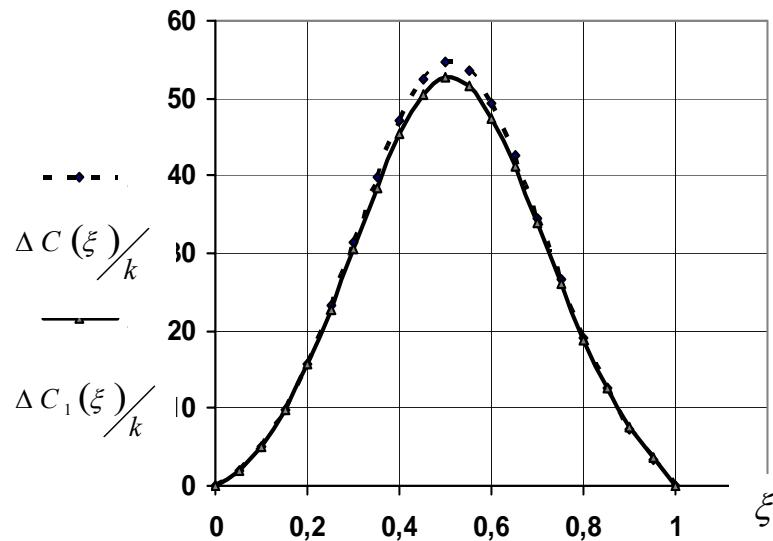


Рис. 7. Функция приращения удельной теплоемкости в температурном интервале сверхпластичности при растяжении сплава АМг5.

### **Литература**

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. Трусаделл К. Первоначальный курс рациональный 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.: ВИНТИИ, 1990. – т.24. – С. 43-98.
6. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985.– 423С.
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. Кувшинов 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.