

УДК 539.3

## О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К СТРУКТУРНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЯМ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев*

Предложено аналитическое выражение для функции чувствительности алюминиевых сплавов к структурным превращениям, связанным при сверхпластичности с механизмом динамической рекристаллизации. Показана взаимосвязь этого выражения с эволюционными уравнениями модели, описывающими закономерности деформации сплавов в широких температурно-скоростных диапазонах, включая сверхпластичность.

*Ключевые слова:* структурные превращения; алюминиевые сплавы; динамическая рекристаллизация.

---

## ABOUT SENSITIVITY TO STRUCTURAL TRANSFORMATIONS AT DEFORMATION OF ALUMINUM ALLOYS

*D.A. Kitaeva, Ya.I. Rudaev*

Analytical expression for function sensitivity of aluminum alloys to the structural transformations connected at superplasticity with the mechanism of dynamic recrystallization is offered. The interrelation of this expression with the evolutionary equations of the model describing regularities deformation of alloys in the wide temperature and high-rate ranges, including superplasticity is shown.

*Key words:* structural transformations; aluminum alloys; dynamic recrystallization.

Сверхпластичность будем определять [1] как особое состояние поликристаллического материала, пластически деформируемого при низком уровне напряжений с сохранением в продеформированном металле исходной ультрамелкозернистой структуры (структурная сверхпластичность) или её формированием в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность).

Первые опыты [2, 3], в результате которых были получены аномальные удлинения при растяжении, проводились на сплавах с подготовленной ультрамелкозернистой структурой (1...2 мкм). Позднее было обнаружено, что существуют классы металлических композиций, которым в определенных температурно-скоростных условиях свойственно появление аномально больших деформаций при растяжении, причем структура указанных композиций предварительно не измельчалась. К ним относятся многие промышленные металлы и сплавы, проявление сверхпластических свойств которых обусловлено структурными превращениями различной природы. Более того, хорошо известна гипотеза, согласно которой физической природе сверхпластичности отвечает суперпозиция де-

формации и одного или нескольких превращений [4, 5]. Сказанным подчеркивается, что формирование мелкозернистой структуры, и, как следствие, размытость её по температуре и скорости деформации фазовых переходов, в процессе которых структура измельчается, создаются условия для реализации характерного для сверхпластичности механизма зернограничного проскальзывания.

Остановимся на результатах исследования эффекта сверхпластичности в промышленных алюминиевых сплавах.

При проведении опытов на растяжение и сжатие ограничивались деформированием стандартных образцов, причем формулировка задачи эксперимента заимствована в [6] и основана на исследовании состояния деформируемого сплава с учетом изменения температур и скоростей деформаций в виде

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

где  $\sigma$  – действительное напряжение;  $\theta$  – температура;  $\dot{\epsilon}$  – логарифмическая деформация;  $\bar{\epsilon}$  – скорость логарифмической деформации.

На рисунке 1 для сплавов Д18Т и АМг5 приведены изотермы, характеризующие зависимость напряжения пластического течения от скорости

деформации при некоторой постоянной степени деформации  $\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon) = 0,427$ , где  $\varepsilon$  – относительная деформация растяжения. При этом компоненты напряжений  $\sigma$  предполагаются поделенными на эталонное напряжение  $\sigma_0 = 10$  МПа, а скорость деформации – на  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$  [7].

Графики на рисунке 1 показывают, что для алюминиевых сплавов можно выделить класс изотерм, на которых имеет место неоднозначная зависимость напряжения от скорости деформации с появлением точек бифуркации. Ниспадающие ветви полученных диаграмм принимаются соответствующими проявлению сверхпластических свойств. Характерные признаки сверхпластичности – низкий уровень напряжений, высокая деформационная способность (~ до 250 %) при растяжении – отмечаются в упомянутых диапазонах.

Сверхпластичность алюминиевых сплавов объясняется развитием эффекта динамической рекристаллизации [8, 9], наблюдаемой при нагреве и деформации. В процессе динамической рекристаллизации происходит переход от исходной деформированной структуры к крупнозернистой рекристаллизованной. Структурные же изменения заключаются в формировании в переходных режимах равноосной мелкозернистой структуры (1...10 мкм). Следует отметить, что динамическая рекристаллизация при растяжении установлена в [7], а подробное обсуждение полученных результатов осуществлено в [1].

Обобщая сказанное с учетом эффектов, возникающих на границах зерен, можно утверждать, что сверхпластичность может быть интерпретирована как явление, происходящее в условиях неравновесной возбужденной мелкозернистой динамической структуры с возникновением аморфного состояния границ зерен, стимулирующего зернограничное проскальзывание. Макропроявление структурной неравновесности заключается в возникновении неоднозначности напряжения по отношению к скорости деформации и, естественно, в появлении особых точек, соответствующих границам устойчивости.

Для математического описания полученных (рисунок 1) опытных данных предложена модель, представляющая собой уравнение состояния в форме минимума потенциала катастрофы сборки вида [9]

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

где

$$q = \frac{\sigma}{\sigma^*} - 1; \quad \eta = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}^*} - 1; \quad \xi = \frac{\theta - \theta_c^m}{\theta_c^v - \theta_c^m}, \quad (3)$$

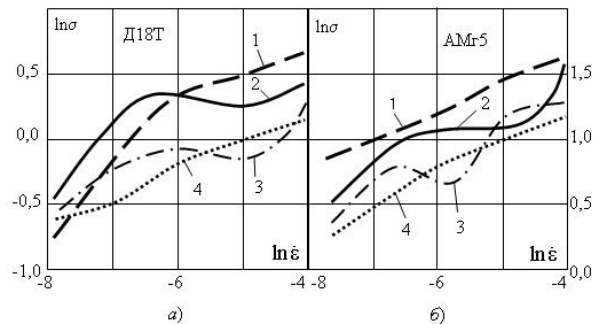


Рисунок 1 – Зависимости напряжений течения от скорости деформаций для ряда характерных температур (°): а – для сплава Д18Т 1 – 793К, 2 – 813К, 3 – 833, 4 – 853К; б – для сплава АМг5 1 – 713К, 2 – 733К, 3 – 773 К, 4 – 753К

причем  $\xi$  – приведенная температура;  $\theta_c^m, \theta_c^v$  – соответственно нижняя и верхняя критические температуры, ограничивающие термический диапазон сверхпластичности;  $\sigma^* = \sigma^*(\xi), \dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}^*(\xi)$  – внутренние параметры состояния, зависящие от температуры,  $\beta = \beta(\xi)$  – управляющий параметр ( $\beta < 0$  при сверхпластичности).

Уравнение состояния (2), (3) дополнено уравнениями, отслеживающими эволюцию упомянутых параметров, которые имеют вид

$$\frac{d\beta}{dt} = \dot{\varepsilon} f(\beta); \quad \frac{d \ln \sigma^*}{dt} = A_0 \exp n(\beta - \beta_0) \frac{d\beta}{dt};$$

$$\frac{d \ln \dot{\varepsilon}^*}{dt} = B_0 \exp k(\beta - \beta_0) \frac{d\beta}{dt}. \quad (4)$$

Здесь  $f(\beta)$  – функция чувствительности материала к структурным превращениям;  $\beta_0$  – значение параметра управления, соответствующее середине термического и скоростного диапазонов структурного перехода;  $A_0, B_0, n, k$  – постоянные, определяемые из сопоставления теоретических и опытных данных.

Остановимся на выборе функции чувствительности деформируемого сплава к структурным превращениям  $f(\beta)$ .

В принципе функция  $f(\beta)$  должна быть связана с внешним силовым и кинематическим воздействием на деформируемый в условиях высоких гомологических температур материал. В качестве варианта функции  $f(\beta)$ , способной проследить кинетику процесса высокотемпературного деформирования, может быть предложено следующее выражение

$$f(\beta) = q_0 (1 - \beta)^{-\alpha} \frac{\xi - 1/2}{1 + m^2 (\xi - 1/2)^2}, \quad (5)$$

где  $q_0, \alpha, m$  – постоянные, учитывающие влияние силовых и скоростных факторов.

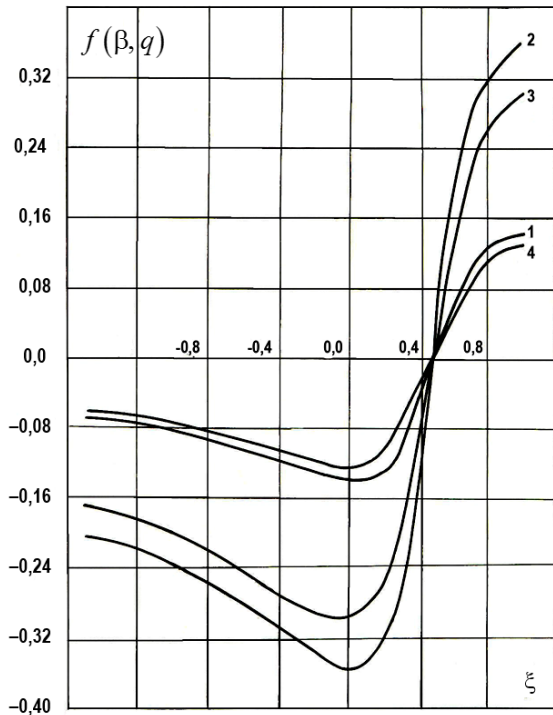


Рисунок 2 – Функция чувствительности сплавов к структурным превращениям: 1 – АМг5; 2 – Д18Т; 3 – 1561 (АМг61) деформированный; 4 – 1561 (АМг61) литой

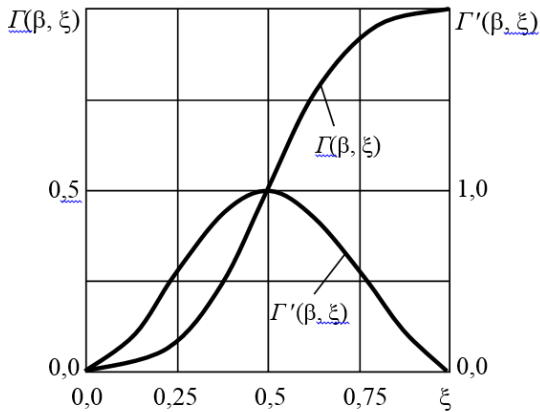


Рисунок 3 – Зависимость степени  $\Gamma(\beta, \xi)$  и скорости  $\Gamma'(\beta, \xi)$  фазового перехода от температуры

В условиях перехода материала в сверхпластическое состояние функция  $b(x)$  должна обращаться в ноль, т.е.  $\beta_{\xi=0} = 0$ . Кроме этого, естественно, для скорости изменения функции чувствительности следует обеспечить выполнение условия  $f'_{\xi=0} = 0$ . Удовлетворение перечисленных условий приводит к равенству

$$\frac{m^2}{4} = \frac{\alpha q_0}{4} + 1. \quad (6)$$

Вводя теперь обозначение

$$\mu = \frac{m^2}{4} = \frac{\alpha q_0}{4} + 1, \quad (7)$$

получим наглядное физическое представление для функции чувствительности алюминиевых сплавов к структурным превращениям (5) в форме

$$f(\beta) = \frac{\alpha}{4} \cdot \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \left[ \Gamma(\xi) - \frac{1}{2} \right]. \quad (8)$$

Здесь

$$\Gamma(\xi) = (1 - \beta)^{-\alpha} \cdot \frac{1 + \mu}{2} \cdot \frac{2\xi - 1}{1 + \mu(2\xi - 1)^2} + \frac{1}{2}. \quad (9)$$

Представление функции чувствительности материала к структурным превращениям в виде (8), (9) позволяет выделить при  $b < 0$  ( $\xi \in (0,1)$ ) степень полноты фазового перехода  $\Gamma(x)$ , причем, очевидно, что в термическом диапазоне сверхпластичности имеем

$$\Gamma(0) = 0; \Gamma(1) = 1. \quad (10)$$

Подстановка (8), (9) в первое уравнение (3) с последующим интегрированием дает

$$(1 - \beta)^{1+\alpha} = 1 - \frac{1 + \alpha}{2\alpha} \cdot \frac{\mu - 1}{\mu} \ln \frac{1 + \mu(2\xi - 1)^2}{1 + \mu}. \quad (11)$$

Выражением (11) устанавливается непосредственная зависимость материальной функции  $b$  от температуры и материальных констант.

На основании (9) несложно определить скорость развития структурного перехода по температуре, которая равна

$$\Gamma'(\xi) = \frac{(1 + \mu)(1 - \beta)^{-\alpha}}{[1 + \mu(2\xi - 1)^2]^2} \times$$

$$\times [1 - \mu(2\xi - 1)^2 + (1 - \beta)^{-1-\alpha} (\mu - 1)(2\xi - 1)^2]. \quad (12)$$

Отметим, что на термических границах сверхпластичности имеем  $\Gamma'(0) = \Gamma'(1) = 0$ . В середине указанного диапазона сверхпластичности ( $\xi = 1/2$ ,  $\beta = \beta_0$ ) функция (12) принимает максимум

$$\max \Gamma' = \Gamma'(1/2) = (1 + \mu)(1 - \beta_0)^{-\alpha}, \quad (13)$$

причем для  $b = b_0$  из равенства (11) получено

$$(1 - \beta_0)^{-\alpha} = 1 - \frac{1 + \alpha}{2\alpha} \cdot \frac{\mu - 1}{\mu} \cdot \ln \frac{1}{1 + \mu}. \quad (14)$$

На рисунке 2 приведены графики зависимости функции  $f(\beta) \sim \xi$  для некоторых алюминиевых сплавов, причем для сплава АМг5 принято  $\alpha = 0,54$ ;  $\mu = 1,08$ ; для сплава Д18Т –  $\alpha = 0,5$ ;  $\mu = 1,2$ ; для сплава 1561 (деформированный) –  $\alpha = 0,6$ ;  $\mu = 1,2$ ; для сплава 1561 (литой) –  $\alpha = 0,65$ ;  $\mu = 1,07$ .

Кривые 1, 2, 3 на рисунке 2, построенные для деформированных сплавов, демонстрируют существенное влияние размера исходного зерна на количественные меры функции чувствительности

материала к структурным превращениям. Например, в сплаве АМг5 размер зерна имел значение ~ 45 мкм, в сплаве Д18Т ~ 130 мкм [1].

На рисунке 3 приведены графики зависимости степени и скорости развития структурного превращения от температуры, не выходящей, естественно, за термический диапазон сверхпластичности. Заметим, что численные данные при этом для исследованных сплавов практически совпадают.

Отметим, что в качестве функции чувствительности материала к структурным превращениям могут быть предложены другие аналитические выражения, не совпадающие с (8), (9), в том числе кусочные функции.

#### **Литература**

1. Рудской А.И. Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов / А.И. Рудской, Я.И. Рудаев. СПб.: Наука, 2009. 217 с.
2. Pearson C.B. The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead – tin and bismuth–tin / C.B. Pearson // J. Inst. Metals. 1934. Vol. 54. P. 111–123.
3. Бочвар А.А. Явление сверхпластичности в сплавах цинка с алюминием / А.А. Бочвар, З.А. Сви-дерская // Изв. АН СССР, ОТН. 1945. № 9. С. 821–824.
4. Пресняков А.А. Сверхпластичность металлических материалов / А.А. Пресняков, Р.К. Аубакирова. Алма-Ата: Наука, 1982. 232 с.
5. Пресняков А.А. О природе сверхпластического течения / А.А. Пресняков // Тез. докл. III Всесоюз. научно-технич. конф. “Сверхпластичность металлов”. Ч. I. Тула, 1986. С. 4–5.
6. Макклиток Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклиток, А. Аргон. М.: Мир, 1970. 443 с.
7. Пазылов Ш.Т. Особенности деформации алюминиевых сплавов в состоянии рекристаллизационной сверхпластичности / Ш.Т. Пазылов, В.А. Паняев // Прочность материалов и конструкций энергетического оборудования. Фрунзе: ФПИ. 1987. С. 87–98.
8. Гуляев А.П. Сверхпластичность стали / А.П. Гуляев. М.: Металлургия, 1982. 56 с.
9. Вайнблат Ю.М., Шаршагин Н.А. Динамическая рекристаллизация алюминиевых сплавов / Ю.М. Вайнблат, Н.А. Шаршагин // Цветные металлы. 1984. № 2. С. 67–70.
10. Китаева Д.А. Синергетические представления в механике динамической сверхпластичности / Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев // НТВ СПбГПУ. 2013. № 4–1 (183). С. 274–283.