

УДК 531-034.715

## ОБ ЭВОЛЮЦИИ ПАРАМЕТРА АНИЗОТРОПНОСТИ

*Ш.Т. Пазылов*

Рассматривается задача описания анизотропных эффектов при деформации алюминиевого сплава 1561. Сформулирована модель, отражающая эволюцию поведения параметра анизотропности в зависимости от меняющихся температурно-скоростных условий.

*Ключевые слова:* анизотропность; скорость деформирования; параметр анизотропности; сверхпластичность.

## ABOUT EVOLUTION OF THE PARAMETER ANISOTROPISM

*Sh. T. Pazylov*

It is considered the task of the description of anisotropic effects at deformation of an aluminum alloy 1561. The model reflecting evolution of behavior of parameter of anisotropic depending on the changing temperature and strain- rates conditions is formulated.

*Key words:* anisotropism; deformation speed; anisotropism parameter; superplasticity.

**Введение.** Анизотропия механических свойств металлов является следствием преимущественного ориентирования кристаллов в результате пластического деформирования в процессах обработки давлением.

Сведения по изучению анизотропии механических свойств металлов и влияние на нее различных факторов (технологических и структурных) обобщены в [1]. Очевидно, что анизотропия структурных и механических свойств, учет и целенаправленное использование таких свойств, начиная со стадии проектирования, способствует повышению надежности, долговечности деталей машин и элементов конструкций, а также эффективного применения конструкционных металлов. Вполне оправданным и одним из важных аспектов является стремление различными способами (термическим, химико-технологическим, термохими-

ческим) уменьшить анизотропию свойств материалов, применяемых в конструкциях [1].

**Постановка задачи эксперимента.** Остановимся на результатах исследования листового деформированного сплава 1561 толщиной  $1 \times 10^{-2}$  м, полученного многоступенчатой продольной прокаткой по стандартной технологии [2]. Заготовки круговых образцов для испытаний на растяжение нарезались в направлении прокатки. Химический состав сплава (%) – 5,88Mg; 1,03Mn; 0,16Zr; 0,12Si; 0,08Fe, остальное – алюминий. Растяжение образцов сплава осуществлялось в интервале температур 533–793К и скоростях деформирования ( $10^{-3}$  с $^{-1}$ ) –  $v_3 = 0,36$ ;  $v_4 = 0,143$ ;  $v_5 = 0,057$ ;  $v_6 = 0,023$ ;  $v_7 = 0,009$ .

Исследования по установлению закономерностей высокотемпературного деформирования с целью определения режимов сверхпластичности

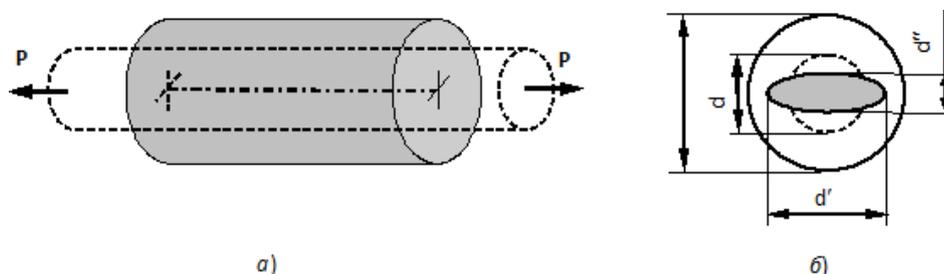


Рисунок 1 – Схема деформирования рабочей части растягиваемого образца (а), и изменение его поперечного сечения в процессе деформации (б)

показали, что круглые образцы, изготовленные из прокатанной по серийной технологии пластины, сечения которых после испытаний на растяжение приобретали эллипсообразный вид (рисунок 1 а и б). Заметно отличающиеся между собой размеры большой и малой осей эллипсообразного сечения  $d'$  и  $d''$  (рисунок 1 б), совпадающих соответственно с плоскостью и толщиной пластины, свидетельствовали о наличии анизотропии деформационных свойств материала во взаимно перпендикулярных направлениях.

Для характеристики изменчивости процесса шейкообразования в меняющихся температурно-скоростных условиях введен [3] параметр анизотропии  $\psi$ , представляющий собой отношение деформаций, измеряемых по малой  $\varepsilon''$  и большой  $\varepsilon'$  осям эллипсообразного поперечного сечения:

$$\psi = \varepsilon''/\varepsilon'; \quad \psi \geq 1. \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon' = (d_0 - d')/d_0$ ;  $\varepsilon'' = (d_0 - d'')/d_0$ , где  $d_0$  – исходный диаметр рабочей части образца;  $d'$  и  $d''$  – соответственно размеры большой и малой осей деформированного поперечного сечения (рисунок 1).

**Экспериментальные данные.** На рисунке 2 представлены результаты измерения параметра  $\psi$  от температуры  $\theta$  при различных скоростях деформирования.

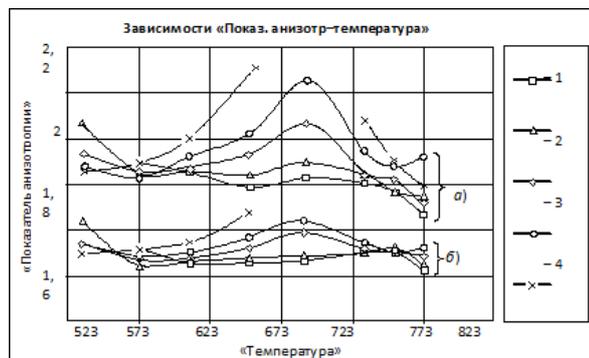


Рисунок 2 – Изменение показателя анизотропии от температуры ( $\psi-\theta$ ) при скоростях деформирования: 1– $v_3=0,36 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>-1</sup>; 2– $v_4=0,143 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>-1</sup>; 3– $v_5=0,057 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>-1</sup>; 4– $v_6=0,023 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>-1</sup>; 5– $v_7=0,00 \cdot 10^{-3}$  м/с<sup>-1</sup>

Экспериментальные данные, приведенные на рисунке 2 а, б, отвечают степеням деформации  $\bar{\varepsilon} = 0,3056$  и  $\bar{\varepsilon} = 0,6597$  соответственно, причем под степенями деформации подразумеваются действительные (логарифмические) деформации [4].

Анализ опытных данных показал, что имеет место сильная зависимость коэффициента анизотропии от термомеханических условий деформирования. Так обнаружено, что в окрестности температуры  $q = 693$ К при всех скоростях деформирования можно

выделить некоторую термическую зону, в пределах которой сплавом проявляется высокая скоростная чувствительность коэффициента  $\psi$ . При этом уменьшению максимальных значений  $\psi$  соответствует возрастание скорости деформирования. Заметим, что увеличение степени деформации снижает интенсивность скоростного влияния на коэффициент анизотропии (рисунок 2 а, б). Отметим также, что установленный эффект наблюдается при температуре, которая по данным [5], предшествует значению, отвечающему метастабильному состоянию.

При высоких температурах (выше 723К) можно выделить температурный интервал 753–773К, в котором реализуется эффект сверхпластичности. Здесь коэффициенты анизотропии минимальны, их значения для различных скоростей деформирования близки друг к другу, а при высоких степенях деформации (рисунок 2 б) практически совпадают. Отмеченное обстоятельство позволяет предположить, что минимальные показатели деформационной анизотропии связаны с режимами сверхпластичности. Подобный результат подмечен в [2], причем снижение коэффициента  $\psi$  рассматривается как следствие сверхпластической деформации.

**Эволюционное уравнение.** Смоделируем полученный экспериментальный результат с вероятностных позиций. При этом можно предположить, что эволюция параметра  $\psi$  во времени описывается одномерным уравнением Фоккера–Планка [7]. По существу в терминах механики сплошной среды указанным уравнением подчеркивается непрерывность параметра анизотропии. Отождествляя время с изменением температуры ( $t = x$ ) и полагая, что коэффициент диффузии не зависит от скорости деформации, можем, следуя [5], можно записать:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ R(\eta)\psi - \frac{1}{2} Q \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right] = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\eta$  – коллективная переменная, в изотермических условиях зависящая от скорости деформации,  $R(\eta)$  называется коэффициентом дрейфа;  $Q$  – коэффициент диффузии, причем для нормированной температуры имеем

$$\xi = \frac{\theta - \theta_A^-}{\theta_A^2 - \theta_A^-}, \quad (3)$$

а параметр порядка  $h$  определяется выражением

$$\eta = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon^*} - 1, \quad (4)$$

где  $\theta_A^2$ ,  $\theta_A^-$  – нижнее и верхнее значения температур, ограничивающих термический диапазон сверхпластичности;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации;  $\varepsilon^*$  – внутренний параметр состояния, для определения которого предложено [5] кинетическое уравнение вида

$$\frac{d \ln \dot{\epsilon}^*}{d \xi} = A_0 (1-n) (\beta - \beta_0)^{-n} \frac{d \beta}{d \xi}, \quad (5)$$

причем  $A_0, n$  – постоянные материала, а для определения  $\frac{d \beta}{d \xi}$  имеем

$$\frac{d \beta}{d \xi} = \dot{\xi} f(\beta, q), \quad (6)$$

где  $\dot{\xi}$  – скорость возрастания нормированной температуры, а  $f(\beta, q)$  названа функцией чувствительности среды к структурным превращениям.

Для функции  $f(\beta, q)$  имеем [5]:

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

$$\Gamma(\xi) = \frac{(\beta - \beta_0)^{-\alpha}}{(-\beta_0)^{-\alpha}} \cdot \frac{1 + \mu}{2} \cdot \frac{2\xi - 1}{4\mu(2\xi - 1)^2} + \frac{1}{2}, \quad (7)$$

где  $\alpha, \mu$  – постоянные материала, определяемые из сопоставления теоретических и опытных данных.

Отметим, что  $b = b_0$  является значением управляющего параметра, отвечающего середине термического диапазона сверхпластичности ( $x = 1/2$ ).

Перейдем теперь к исследованию уравнения (2), зависящего от температуры процесса  $x$ . Полагаем, что коэффициент дрейфа линеен по  $h$ :

$$R(\eta) = -c\eta (c \sim \text{const}). \quad (8)$$

Поскольку стационарное решение имеет форму гауссового распределения при выполнении условия (8), то здесь, следуя [8], также будем искать решение в виде гауссового распределения в форме

$$\psi(\xi, \eta) = N(\xi) \exp\left(-\frac{\eta^2}{a} + \frac{2b}{\theta} \eta\right), \quad (9)$$

причем принимается, что ширина гауссового распределения  $a$ , смещение  $b$  и нормировочное число  $N$  зависят от температуры процесса  $x$  (рисунок 3).

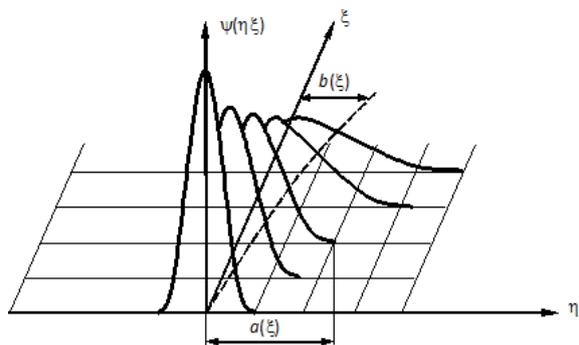


Рисунок 3 – Качественное представление  $\psi(\eta, \xi)$  как функции температуры  $\xi$  и скорости деформации  $\eta$

После подстановки (9) в уравнение (2) и группировки слагаемых по степеням параметра порядка, приходим к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{da}{d\xi} = 2Q - 2ca; \quad (10)$$

$$\frac{db}{d\xi} = -cb; \quad (11)$$

$$\frac{dN}{Nd\xi} = c + 2Q \frac{b^2}{a^2} - \frac{Q}{a}. \quad (12)$$

Уравнения (10), (11) являются линейными дифференциальными уравнениями относительно  $a$  и  $b$ . Их интегралы достаточно просто вычисляются:

$$a(\xi) = \frac{Q}{c} [1 - \exp(-2c\xi)] + a_0 \exp(-2c\xi), \quad (13)$$

$$b(\xi) = b_0 \exp(-c\xi), \quad (14)$$

причем  $a_0, b_0$  – постоянные интегрирования.

Легко проверить, что решение уравнения (12) с привлечением (10), (11) имеет следующий вид:

$$N(\xi) = (\pi a)^{-1/2} \exp\left(-\frac{b^2}{a}\right). \quad (15)$$

Подставив в (9) выражение (15), для определения коэффициента анизотропности получаем формулу:

$$\psi(\xi, \eta) = (\pi \theta)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(\eta - b)^2}{a}\right]. \quad (16)$$

Решение (16) включает четыре материальные функции скорости деформации:  $Q = Q(h), c = c(h), a_0 = a_0(h), b_0 = b_0(h)$ .

Итак, задача аналитического представления функции параметра анизотропности сведена к исследованию уравнения (16) с определением четырех материальных функций  $Q, c, a_0, b_0$  из следующих граничных условий:

$$\left. \frac{d\psi}{d\xi} \right|_{\xi=\xi^*} = 0; \quad \left. \frac{d\psi}{d\xi} \right|_{\xi=1/2} = 0; \quad \left. \frac{d^2\psi}{d\xi^2} \right|_{\xi=0} = 0; \quad \psi|_{\xi=1/2} = 1. \quad (17)$$

Зависимостями (4) подчеркивается, что при температуре  $\theta = 693\text{K}$ , соответствующей математическому максимуму на изотермах  $\psi \sim \xi$ , первая производная обращается в ноль. Аналогичная ситуация отмечается и при температуре, отвечающей середине термического диапазона сверхпластичности ( $\xi = 1/2$ ). При переходе температуры в область сверхпластичности ( $\xi = 0$ ), кривая  $\psi \sim \xi$  выполаживается. Наконец, последнее равенство (17)

означает допустимость того, что к середине температурного диапазона сверхпластичности материал станет изотропным.

Определение перечисленных выше материальных функций осуществлено с привлечением вычислительных процедур. В частности, на рисунке 4 приведена зависимость коэффициента диффузии от параметра порядка  $\eta$ , ответственного за скоростные эффекты, и его полиномиальная аппроксимация.

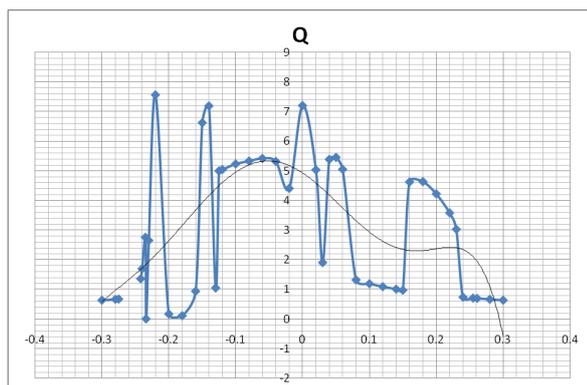


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента диффузии  $Q$  от параметра порядка

**Обсуждение результатов и выводы.** Предположение о том, что коэффициент диффузии не зависит от скорости возрастания температуры, оказалось вполне приемлемым. Поэтому существенно нелинейный характер зависимости  $Q \sim \eta$  может быть объяснен нелинейным влиянием параметра порядка. Сказанное вполне соответствует модельным представлениям, описывающим не только сверхпластичность, но и пограничные области термопластичности и высокотемпературной ползучести. Отметим, что коэффициент диффузии максимизируется вблизи нулевого приближения параметра порядка. При этом неизбежно интенсифицируются механизмы, ответственные за скольжение по границам зерен. В термическом диапазоне сверхпластичности такие процессы сопровож-

даются сменой соседей зерен. Иными словами, понятным становится утверждение об аморфизации границ зерен и их динамическом возбуждении и активизации явления [9].

В заключение отметим, что коэффициент диффузии может считаться функцией, характеризующей изменчивость механизмов деформации в зависимости от температурно-скоростных условий.

#### Литература

1. Микляев П.Г. Анизотропия механических свойств металлов / П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. М.: Металлургия, 1986. 223 с.
2. Барахтина Н.Н. Исследование оптимальных температурно-скоростных параметров горячей прокатки листов из алюминиевого сплава АМг61 (1561) / Н.Н. Барахтина, Ю.С. Золоторевский, Я.И. Рудаев и др. // Вопросы материаловедения. 1992. Вып. 19–20. С. 72–79.
3. Пазылов Ш.Т. О деформационной анизотропии алюминиевых сплавов / Ш.Т. Пазылов, Н.А. Оморов, Я.И. Рудаев // Вестник ТГУ. Сер. Естеств. и техн. науки. Вып. 3. 2010. Т. 15. С. 974–975.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
5. Рудской А.И. Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов / А.И. Рудской, Я.И. Рудаев. СПб.: Наука, 2009. 218 с.
6. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов / О.А. Кайбышев. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
7. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. Т. 2. / Р. Балеску. М.: Мир, 1978. 399 с.
8. Хакен Г. Информатизация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2014. 320 с.
9. Китаева Д.А. Синергетические представления в механике динамической сверхпластичности / Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев // НТВ СПбГПУ. 2013. № 4–1 (183). С. 274–283.