

ние, если амплитуда удлинения не превышает 40 мкм. Динамический диапазон выделенного полезного сигнала достигает 35 дБ. Результаты измерений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) показали, что последняя линейна в диапазоне 6–2500 Гц. Завал АЧХ вне этого диапазона обусловлен частотно-временными характеристиками используемой электронной схемы. Результаты исследования зависимости обработанного сигнала интерферометра от температуры представлены на рис. 2 (кривая 2). Как видно, средняя нестабильность сигнала не превышает  $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ , что соответствует температурной нестабильности используемых фотоприемников (ФЛ-23К). Исследование долговременной стабильности показало, что при постоянной амплитуде деформации многомодового интерферометра его выходной сигнал в течение 8 ч изменяется более чем на 2.5%.

Таким образом, предложенное устройство может значительно расширить область применения многомодовых интерферометров в измерительных устройствах.

### Список литературы

- [1] Бусурин В.И., Семенов А.С., Удалов Н.П. // Квантовая электрон. 1985. Т. 12. № 5. С. 901–943.
- [2] Быковский Ю.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. // Квантовая электрон. 1990. Т. 17. № 10. С. 1377–1378.
- [3] Звелто О. Физика лазеров. М.: Мир, 1984. 395 с.
- [4] Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь. 1987. 656 с.

## МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

© В.Н.Перевезенцев

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Нижегородский филиал,  
603024 Нижний Новгород, Россия  
(Поступило в Редакцию 12 января 1996 г.)

1. Известно [1], что мелкозернистые алюминиевые сплавы при температурах, близких к температурам солидуса ( $T_s$ ), способны деформироваться с необычайно высокой скоростью ( $\dot{\epsilon} = 10^0 - 10^3 \text{ с}^{-1}$ ), обнаруживая при этом все характерные черты сверхпластичности: высокую предельную деформацию ( $\epsilon_c \sim 800 - 1000\%$ ), высокие значения коэффициента скоростной чувствительности ( $m = \partial \lg \sigma / \partial \lg \dot{\epsilon} \cong 0.5 - 0.6$ ), существование порогового напряжения течения, сохранение равноосности зерен в ходе деформации. Было показано [1–5], что эффект высокоскоростной сверхпластичности обусловлен локальным плавлением границ зерен при температуре  $T_i < T_s$ , причем  $T_i$  может существенно

отличаться от  $T_i$ , за счет отличия химического состава границ и тела зерен. Важно, что при температуре  $T = T_i$  наблюдаются падение деформирующих напряжений и неожиданное существенное увеличение энергии активации процесса деформации [1]. Если при  $T < T_i$  энергия активации сверхпластической деформации (СПД) близка обычно к энергии активации диффузии по границам зерен  $Q_b$ , то при  $T > T_i$  энергия активации может значительно (в 2–3 раза) превосходить значения  $Q_b$ . Указанные особенности позволяют предположить [1], что при  $T \geq T_i$  происходит смена механизмов деформации и традиционные модели СПД становятся неприменимы. В настоящей работе предпринята попытка построения модели, пригодной для описания особенностей высокоскоростной сверхпластичности.

2. При выборе модели надо принять во внимание следующие обстоятельства. С одной стороны, необходимым условием реализации высокоскоростной СПД является достижение температур  $T \geq T_i$ , при которых происходит локальное плавление границ. С другой стороны, достижение больших деформаций невозможно без поддержания высокого уровня когезии между зернами, что представляется нереальным в условиях, когда границы зерен целиком переходят в жидкое состояние.

Указанный парадокс может быть устранен, если предположить, что, хотя основной объем зернограницной фазы и переходит в жидкое состояние при  $T \geq T_i$ , тем не менее в границе существует определенная доля твердых перемычек, поддерживающих когезию соседних зерен. В силу малой ширины границ зерен образование (и разрыв) этих перемычек ( $S$ -перемычек) может осуществляться термофлюктуационным путем, например за счет локальных флюктуаций химического состава зернограницной фазы.

В рассматриваемой двухфазной модели границы в поле внешних напряжений  $\sigma$  произойдет сдвиг вдоль жидких участков и появится возвращающая сила, связанная с упругой деформацией твердых перемычек. Величину соответствующего взаимного смещения зерен  $B$  вдоль границы можно оценить из выражения

$$B = \lambda(\sigma/G), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — среднее расстояние между  $S$ -перемычками,  $G$  — модуль сдвига.

Дальнейшая деформация возможна лишь за счет термофлюктуационного или силового разрушения  $S$ -перемычек. Одновременный разрыв  $p$  соседних перемычек на некоторой площадке размера  $R$  приводит к образованию на ней сдвига мощности  $R(\sigma/G)$ , что можно представить как возникновение по периметру данной площадки петли “дислокации” с вектором Бюргерса  $B = R(\sigma/G)$  характерного размера  $R$ . Дальнейшее движение этой дислокации (расширение петли в плоскость границы) может происходить в двух режимах. В первом из них внешнее напряжение, действующее на дислокацию, достаточно для силового (безактивационного) пересечения дислокацией встречающихся на ее пути  $S$ -перемычек. Второй режим связан с термофлюктуационным преодолением  $S$ -перемычек.

В данной работе мы остановимся на рассмотрении первого режима, поскольку, как показывает анализ, именно такой режим позволяет обеспечить наблюдаемые при эксперименте экстремально высокие

скорости зернограничного проскальзывания (ЗГП). Проанализируем условия, необходимые для реализации этого режима. Запишем работу внешних напряжений, необходимую для увеличения радиуса дислокационной петли на величину  $\Delta R$ ,

$$\Delta A = \sigma B \pi [R^2 - (R - \Delta R)^2] = 2\pi R \Delta R \sigma B. \quad (2)$$

С другой стороны, энергия, необходимая для разрушения  $S$ -перемычек при увеличении радиуса петли на  $\Delta R$ , определяется соотношением

$$\Delta U = (2\pi R \Delta R) n_s Q, \quad (3)$$

где  $n_s$  — стационарное число  $S$ -перемычек на единице площади границы,  $Q$  — энергия активации разрушения  $S$ -перемычек.

Безактивационный режим движения дислокации осуществляется при условии  $\Delta A \geq \Delta U$ , которое с учетом (2) и (3) можно записать в виде  $\sigma B \geq n_s Q$ . Принимая во внимание соотношение (1), это неравенство можно записать в виде условия на величину внешнего напряжения

$$\sigma \geq \sigma_{\text{пор}} = \sqrt{G n_s Q / R}. \quad (4)$$

Наибольший интерес представляет случай, когда термофлюктуационное разрушение всего лишь одной  $S$ -перемычки приводит к зарождению дислокационной петли, способной к дальнейшему безактивационному расширению в границе. В этом случае  $R \cong \lambda(p = 1)$  и величину порогового напряжения  $\sigma_{\text{пор}}$  в (4) можно оценить из выражения

$$\sigma_{\text{пор}} \cong (GQ)^{1/2} n_s^{3/4}. \quad (5)$$

3. Определим теперь скорость взаимного смещения зерн  $u$ , используя известное соотношение  $u = \rho_{\perp} B V_{\perp}$ , где  $\rho_{\perp}$  — плотность и  $V_{\perp}$  — скорость движения дислокаций. Величину  $\rho_{\perp}$  запишем в виде  $\rho_{\perp} = N L$ , где  $N$  — число дислокационных петель на единице площади границы и  $L$  — средний периметр петли. При однородном распределении  $S$ -перемычек в границе и зарождении дислокационных петель путем термофлюктуационного разрушения единичной  $S$ -перемычки величину  $N$  можно оценить из выражения  $N = (1/\lambda^2) e^{-Q/kT}$ . Средняя длина пробега дислокации до ее столкновения и аннигиляции с дислокациями другого знака  $L \cong \pi L_p \cong \pi \lambda e^{Q/2kT}$ . Таким образом, выражение для плотности дислокаций  $\rho_{\perp}$  имеет вид

$$\rho_{\perp} = (\pi/\lambda) e_{-}^{Q/2kT}. \quad (6)$$

Скорость дислокации в рассматриваемом режиме деформации лимитируется лишь вязким сопротивлением жидкой прослойки, и в первом приближении ее можно оценить как скорость взаимного смещения зерен вдоль жидкой прослойки  $V_{\perp} \cong \sigma/\eta$ , где  $\eta$  — коэффициент вязкости. В диффузионном приближении  $\eta \approx kT/D_L a^2$  (где  $D_L$  — коэффициент самодиффузии в расплаве,  $a$  — межатомное расстояние) и, следовательно,

$$V_{\perp} \cong (\sigma/G) (D_L/a) (G a^3/kT). \quad (7)$$

С учетом выражений (1), (6) и (7) окончательное выражение для скорости ЗГП принимает вид

$$u = 2\pi(\sigma/G)^2(D_L/a)(Ga^3/kT)\exp(-Q/2kT), \quad (8)$$

а скорость деформации, лимитируемая скоростью собственного ЗГП,

$$\dot{\epsilon} = u/d = (\sigma/G)^2(2\pi D_L/ad)(Ga^3/kT)\exp(-Q/2kT), \quad (9)$$

где  $d$  — средний размер зерна.

Отметим, что полученное выражение для  $\dot{\epsilon}$  не содержит величины плотности  $S$ -перемычек ( $n_s$ ), однако указанный режим деформации возможен лишь при превышении внешним напряжением некоторой пороговой величины, зависящей от  $n_s$  (см. (5)). Оценим  $\dot{\epsilon}$  по формуле (9). При типичных значениях параметров  $D_L = 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с,  $a \approx 3 \cdot 10^{-8}$  см,  $Ga^3/kT \approx 50$  и характерных для высокоскоростной СПД сплава IN9021 [4] величин  $\sigma/G \sim 6 \cdot 10^{-3}$ ,  $d \sim 500a$  получим  $\dot{\epsilon} \cong 10^5 \exp(-Q/2kT)$  (с<sup>-1</sup>). В этом выражении остается неопределенной лишь величина энергии активации разрушения  $S$ -перемычки ( $Q$ ). Если принять за величину  $Q$  экспериментально измеренную энергию активации для сплава IN9021 [1]  $Q = 149$  кДж/моль  $\approx 20kT_s$ , то получим  $\dot{\epsilon} \sim 10$  с<sup>-1</sup>, что хорошо согласуется со значением оптимальной скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{\text{опт}} \sim 50$  с<sup>-1</sup> в этом сплаве. Разумеется, к такого рода сопоставлениям следует относиться с осторожностью, поскольку остаются неисследованными механизмы возникновения и разрушения твердых перемычек, в силу чего остаются неопределенными важнейшие параметры модели (плотность  $S$ -перемычек, величина энергии активации  $Q$ ). Кроме того, более адекватный анализ зависимости скорости деформации от напряжения, температуры и размера зерна требует детального рассмотрения не только собственного ЗГП, но и процессов аккомодации ЗГП в стыках зерен [6,7]. Тем не менее рассмотренная модель позволяет объяснить наблюдаемые в опыте необычно высокие скорости деформации, наличие порогового напряжения и получить характерную для оптимальных условий СПД величину коэффициента скоростной чувствительности  $m = 0.5$ .

Проведенные исследования осуществлены при поддержке Международного научного фонда (грант № R9A300).

### Список литературы

- [1] Higashi K. // Mater. Sci. Forum. 1994. Vol. 170–172. P. 131–134.
- [2] Koike J., Mabuchi M., Higashi K. // Acta Metall. Mater. 1995. Vol. 43. N 1. P. 199–206.
- [3] Mabuchi M., Higashi K. // Phil. Mag. Lett. 1994. Vol. 70. N 1. P. 1–6.
- [4] Higashi K., Nieh T.G., Mabuchi M., Wadsworth J. // Sct. Metall. 1995. Vol. 32. N 7. P. 1079–1084.
- [5] Higashi K., Nieh T.G., Wadsworth J. // Acta Metall. Mater. 1995. Vol. 43. N 9. P. 3275–3282.
- [6] Perevezentsev V.N., Rybin V.V., Chuvil'deev V.N. // Acta Metall. Mater. 1992. Vol. 40. P. 887–924.
- [7] Perevezentsev V.N., Chuvil'deev V.N., Larin S.A. // Mater. Sci. Forum. 1994. Vol. 170–172. P. 613–620.