

УДК 539.217.1+539.214

ТЕРМО- АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ В УСЛОВИЯХ СВЕРХ- ПЛАСТИЧНОСТИ

Предложена методика определения энергии активации развития зернограничных пор в условиях сверхпластичности. Показано, что энергия активации развития пор совпадает как с общей энергией активации деформации, так и с энергией активации зернограничного проскальзывания. Это свидетельствует о том, что процесс развития пористости находится во взаимосвязи с зернограничным проскальзыванием и контролируется тем же микромеханизмом, что и сверхпластическое течение

В.В. Брюховецкий

Доктор физико-математических наук, заведующий отделом*

Контактный тел.:(057) 700-41-11

e-mail: ie@kipt.kharkov.ua

Р.И. Кузнецова

Доктор физико-математических наук, профессор*

e-mail: ie@kipt.kharkov.ua

А.В. Пойда

Кандидат физико-математических наук*

e-mail: ie@kipt.kharkov.ua

В.П. Пойда

Доктор технических наук, профессор

Харьковский национальный университет им.В.Н.Каразина

пл. Свободы, 4, г.Харьков, Украина, 61077

e-mail: ie@kipt.kharkov.ua

В.Ф. Клепиков

Доктор физико-математических наук, профессор, директор*

e-mail: ie@kipt.kharkov.ua

Ю.А. Касаткин

Доктор физико-математических наук, доцент*

*Институт электрофизики и радиационных технологий

ул.Чернышевского, 28, а/я 8812, г.Харьков, Украина, 61002

e-mail: ie@kipt.kharkov.ua

Каафарани Али Махмуд

Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель

Арабский университет

ул. Тарик эль Жаиди, г.Бейрут, Ливан

e-mail: ie@kipt.kharkov.ua

1.Введение

Как известно, сверхпластическая деформация практически всегда сопровождается порообразованием. В её ходе происходит зарождение пористости, ее рост, а также и залечивание [1-3]. Известно, что в усло-

виях высокотемпературной ползучести залечивание зернограничных пор осуществляется диффузионными процессами [4]. В условиях же структурной сверхпластичности как рост, так и залечивание изолированных зернограничных пор, как было показано в [3], осуществляется в основном за счет зернограничного

проскальзывания. Однако до сих пор остается слабо исследованной связь процесса роста и залечивания пор с температурно-силовыми и деформационными характеристиками в условиях сверхпластической деформации. В связи с этим весьма интересен анализ значений энергии активации развития зернограничной пористости в условиях сверхпластической деформации.

Следует отметить, что до настоящего времени прямой термоактивационный анализ процесса развития зернограничной пористости в условиях как структурной сверхпластичности, так и высокотемпературной, проведен не был. Поэтому в настоящем исследовании была разработана методика определения энергии активации развития зернограничной пористости в условиях сверхпластического течения. Проведена апробация разработанной методики на ряде материалов, ранее проявивших сверхпластические свойства.

2.Методика

Скорость роста поры можно записать как:

$$\dot{\epsilon}_{\text{рп}} = A \exp\left(-\frac{Q_{\text{рп}}}{RT}\right), \quad (1)$$

где A – некоторая константа, $Q_{\text{рп}}$ – энергия активации роста поры, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Из этого уравнения в случае постоянной приложенной нагрузки энергию активации роста поры можно определить как

$$Q_{\text{рп}} = -R \partial \ln \dot{\epsilon}_{\text{рп}} / \partial (1/T). \quad (2)$$

Таким образом, экспериментальное определение энергии активации роста поры можно производить из соотношения

$$Q_{\text{рп}} = -R \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{\text{рп}}^1}{\dot{\epsilon}_{\text{рп}}^2} \right) \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}, \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}_{\text{рп}}^1$ – скорость роста поры при температуре T_1 , $\dot{\epsilon}_{\text{рп}}^2$ – скорость роста поры при температуре T_2 .

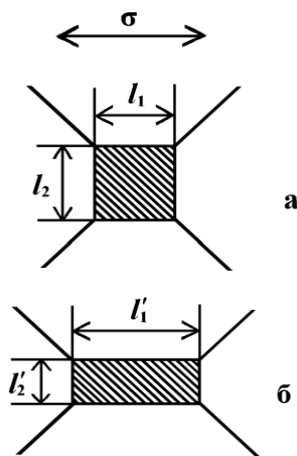


Рисунок 1. Схематическое изображение изолированной зернограничной поры на двух этапах ее развития.

В соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 1, скорость роста поры вдоль направления растяжения определяли как

$$\dot{\epsilon}_{\text{рп}} = \frac{l_1' - l_1}{l_1 t}, \quad (4)$$

где t – время осуществления дополнительного этапа деформации.

Таким образом, определив значения $\dot{\epsilon}_{\text{рп}}^1$ и $\dot{\epsilon}_{\text{рп}}^2$ и зная значения T_1 и T_2 , находим величину $Q_{\text{рп}}$.

Скорость залечивания поры можно выразить следующим образом:

$$\dot{\epsilon}_{\text{зп}} = A \exp\left(-\frac{Q_{\text{зп}}}{RT}\right), \quad (5)$$

где $Q_{\text{зп}}$ – энергия активации залечивания поры.

Энергию активации залечивания поры экспериментально можно определить из соотношения, аналогичного для роста поры,

$$Q_{\text{зп}} = -R \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{\text{зп}}^1}{\dot{\epsilon}_{\text{зп}}^2} \right) \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}, \quad (6)$$

где $\dot{\epsilon}_{\text{зп}}^1$ – скорость залечивания поры при температуре T_1 , $\dot{\epsilon}_{\text{зп}}^2$ – скорость залечивания поры при температуре T_2 .

В соответствии с рис. 1 скорость залечивания поры определяется из соотношения:

$$\dot{\epsilon}_{\text{зп}} = \frac{l_2 - l_2'}{l_2 t}. \quad (7)$$

Определив значения $\dot{\epsilon}_{\text{зп}}^1$ и $\dot{\epsilon}_{\text{зп}}^2$ и зная значения T_1 и T_2 находим величину $Q_{\text{зп}}$.

3.Результаты экспериментальных исследований

Предложенная выше методика была применена для определения энергии активации развития пористости в электролитических фольгах меди и в модельном алюминиевом сплаве Al-4мас.%Cu, условия проявления сверхпластичности которыми были определены ранее в работах [1,5].

Оценка термоактивационных параметров процессов, осуществляющихся в ходе деформации однокристалльных по толщине фольг меди, была проведена в области температур $T = 1173 \div 1273$ К. При этом для возможности сравнения общей энергии активации деформации и значений энергий активации отдельных процессов, осуществляющихся в процессе самой деформации, те и другие измерения производили для $\sigma = 1,5$ МПа. Заметим, что такое напряжение течения является оптимальным для сверхпластической деформации фольг меди при $T = 1273$ К [1].

Прежде всего, из наклона зависимости $\ln \dot{\epsilon} - 10^3/T$ было получено значение энергии активации сверхпластической деформации фольг меди $Q \cong 117$ кДж/моль.

Учитывая то, что главным деформационным процессом сверхпластической деформации изучаемых фольг меди является зернограничное проскальзывание [1] (вклад зернограничного проскальзывания в общую деформацию $\gamma_{\text{зп}}$ в случае деформации образцов

при $\sigma = 1,5$ МПа и $T = 1273$ К составляет ~60%), была определена энергия активации зернограничного проскальзывания. Скорость зернограничного проскальзывания $\dot{\epsilon}$ в общем виде можно записать так:

$$\dot{\epsilon}_{згп} = V \exp\left(-\frac{Q_{згп}}{RT}\right), \quad (8)$$

где $Q_{згп}$ – энергия активации зернограничного проскальзывания, V – константа.

За скорость зернограничного проскальзывания принимали отношение среднего относительного смещения рисок ко времени деформации. После того, как экспериментально была определена $\dot{\epsilon}_{згп}$, из зависимости $\ln \dot{\epsilon}_{згп} - 10^3/T$ было найдено значение $Q_{згп} \cong 12-4$ кДж/моль. Полученный результат показывает, что энергия активации зернограничного проскальзывания близка к общей энергии активации сверхпластической деформации фольг меди. Это свидетельствует о том, что зернограничное проскальзывание контролируется тем же микромеханизмом, что и сверхпластическое течение.

Процесс сверхпластической деформации фольг меди осуществляется при наличии и с участием зернограничной пористости [1]. Если проследить развитие пор в динамике (рис. 2), то отчетливо видно, как в процессе деформации поры изменяют свои размеры, увеличиваясь в направлении растяжения и заживаясь в направлении, перпендикулярном оси растяжения. Были проведены измерения размеров 20 изолированных пор на двух этапах развития для каждой из температур, и для определения $\dot{\epsilon}_{рп}$ и $\dot{\epsilon}_{зп}$ все измерения l_1 , l'_1 , l_2 и l'_2 были усреднены. Затем из наклона зависимости $\ln \dot{\epsilon}_{рп} - 10^3/T$ было получено значения энергии активации развития пор $Q_{рп} \cong 127$ кДж/моль. Для $Q_{зп}$ получено значение $\cong 123$ кДж/моль.

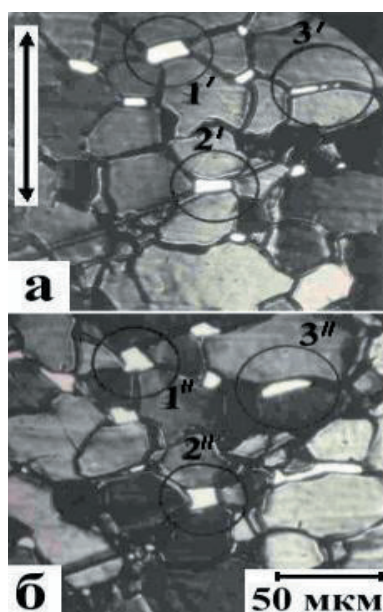


Рисунок 2. Микрофотографии одного и того же участка фольги меди на различных этапах деформации а) $\epsilon = 5\%$, б) $\epsilon = 8\%$. ($T = 1273$ К).

Полученный результат показывает, что энергия активации развития изолированных пор близка как

к энергии активации зернограничного проскальзывания, так и к общей энергии активации сверхпластической деформации. Этот результат свидетельствует в пользу того, что процесс развития пористости находится во взаимосвязи с зернограничным проскальзыванием и контролируется тем же микромеханизмом, что и сверхпластическое течение. Анализируя полученные результаты, хотелось бы отметить то, что обычно энергия активации сверхпластической деформации, совпадает либо с энергией активации зернограничной диффузии, либо с энергией активации объемной диффузии [6]. При этом перемена значения энергии активации сверхпластической деформации происходит, как правило, в области температур $T = 0,75 \div 0,85 T_{пл}$. В данной работе эксперименты были проведены при высоких гомологических температурах $T = 0,85 \div 0,96 T_{пл}$. Изучение микроструктуры деформируемых пленок позволило обнаружить на начальных этапах раскрытия зернограничных пор зарождение структур, сходных с нитевидными волокнами в алюминиевых сплавах (см. пору 3' на рис. 2). Это может свидетельствовать об осуществлении локального плавления на границах зерен фольг меди в ходе их деформирования. Хотя процессы локального плавления фольг меди могли иметь место в проведенных экспериментах, однако существенного влияния на механизм сверхпластической деформации фольг они не оказывали. Поэтому полученные значения энергии активации близки к значению энергии активации зернограничной диффузии в меди [7,8]. Следует также отметить, что полученные значения энергии активации близки к значению энергии активации процесса межзеренного скольжения электролитической меди (134 кДж/моль), полученному из опытов Ке [9].

Также для выяснения вопроса об энергии активации развития зернограничных пор были проведены исследования образцов сплава Al-4мас.%Cu. Сведения об условиях проявления сверхпластичности этим сплавом были получены ранее в работе [5]. Оптимальные условия проявления сверхпластичности сплавом Al-4мас.%Cu следующие: $T = 803$ К, напряжение течения $\sigma = 5,5$ МПа, а удлинение до разрушения δ при этом составляет 220%. Температура $T = 803$ К близка к температуре плавления сплава Al-4мас.%Cu и составляет 0,96 по отношению к равновесной температуре солидус и 0,98 по отношению к температуре эвтектики. Таким образом, локальное плавление на границах зерен за счет фазовых превращений в сплаве Al-мас.4%Cu произойти не может, поскольку оптимальная температура его сверхпластической деформации составляет величину 0,98 от температуры эвтектики. Таким образом, сплав Al-мас.4%Cu проявляет сверхпластичность хотя и при достаточно высоких гомологических температурах, однако находясь в твердом состоянии. Не исключена, однако, возможность локального плавления сплава Al-мас.4%Cu за счет адиабатического разогрева.

На рис. 3 приведен вид деформационного рельефа образца сплава Al-мас.4%Cu, деформированного в оптимальных условиях проявления сверхпластичности на двух этапах развития деформации: а) после дополнительной деформации на 10% предварительно отполированного образца, уже деформированного на

92% ($92+10\%$); б) после дополнительной деформации этого же образца ещё на 10% ($102+10\%$).

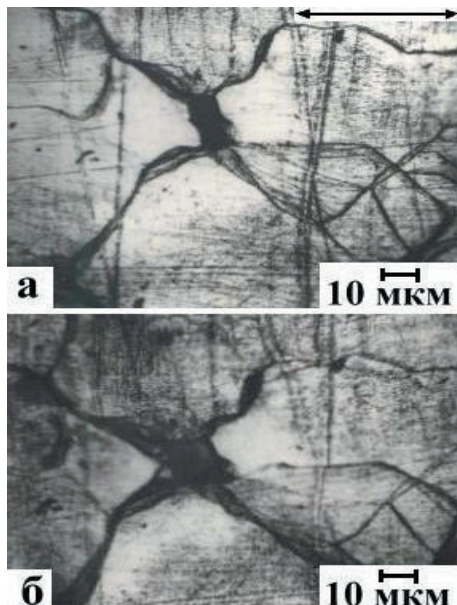


Рисунок 3. Микрофотографии одного и того же участка рабочей части образца сплава Al-4мас.%Cu на различных этапах деформации: а) $\epsilon = 92+10\%$; б) $\epsilon = 102+10\%$. ($T = 803\text{ K}$)

Если проследить развитие поры, приведенной на рис. 3, в динамике, то отчетливо видно как в процессе деформации пора изменяет свои размеры, увеличиваясь в направлении растяжения и заживаясь в направлении, перпендикулярном оси растяжения, в полной аналогии с деформационной моделью, предложенной в [1,2].

Термоактивационный анализ деформации сплава Al-мас.4%Cu показал, что энергия активации его сверхпластической деформации составляет величину ~ 172 кДж/моль, что несколько выше энергии активации объемной диффузии в алюминии. Применение предложенной выше методики позволило установить, что для роста и для заживания зернограницных пор энергия активации составляет величины ~ 164 и ~ 156 кДж/моль, соответственно. Эти величины близки к энергии активации объемной самодиффузии в алюминии а также к общей энергии активации сверхпластической деформации сплава Al-4мас.%Cu.

Применение методики определения вкладов различных видов деформации в развитие поры, разработанной нами ранее в [3], позволило установить, что и в рост и в заживание поры основной вклад вносит зернограницное проскальзывание ($\sim 85\%$). Также известно [10], что основным деформационным механизмом сплава Al-4мас.%Cu в условиях сверхпластического течения является зернограницное проскальзывание. Таким образом, учитывая все эти результаты, можно говорить, что развитие поры

осуществляется самим же деформационным процессом, а именно проскальзыванием зерен по границам при деформации.

4. Выводы

1. Разработана методика определения энергии активации развития зернограницной пористости в условиях сверхпластического течения.

2. Энергия активации развития пор совпадает как с общей энергией активации деформации, так и с энергией активации зернограницного проскальзывания. Это свидетельствует о том, что процесс развития пористости находится во взаимосвязи с зернограницным проскальзыванием и контролируется тем же микромеханизмом, что и сверхпластическое течение.

5. Литература

1. Кузнецова Р.И. Роль зернограницной пористости в сверхпластичности // ФММ. – 1978. – Т. 45, Вып.3. – С. 641-646.
2. Mechanism of superplastic deformation of coarse-grained materials / R.I. Kuznetsova, N.N. Zhukov, O.A. Kaibyshev, R.Z. Valiev // Phys. Stat. Sol. – 1982. – V.70A, N2. – P. 371-378.
3. Механизмы развития зернограницных пор и локальная неоднородность деформации в условиях сверхпластического течения / Р.И.Кузнецова, В.В.Брюховецкий, В.П.Пойда, Т.Ф.Сухова // Металлофиз. новейшие техн. – 1995. – Т.17, №8. – С. 64-72.
4. Пуарье Ж.-П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамик и минералов при высоких температурах: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. – 287 с.
5. Развитие пористости и разрушение при сверхпластическом течении сплава Al – 4 мас.% Cu / Р.И. Кузнецова, В.П. Пойда, Л.М. Летяго, С.А. Бахарев // ФММ. – 1982. – Т.54, Вып.6. – С. 1183-1187.
6. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
7. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Бокштейн С.З. Строение и свойства металлических сплавов. М.: Металлургия. - 1971. - 496 с.
9. Механические свойства материалов при повышенных температурах. Сб. докладов. Под ред. Дж.Е.Дорна. Перевод с англ. М.: Металлургия. - 1965. - 295 с.
10. Пойда В.П., Кузнецова Р.И., Шапран А.С. Роль зернограницного проскальзывания в пластической деформации пористых поликристаллов. Сверхпластичность // ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 1985. – Вып.3 (36). – С. 47-50.