

5.1;08

Деформационные эффекты и акустическая эмиссия при высокотемпературной деформации алюминия

© В.А. Плотников, С.В. Макаров

Алтайский государственный университет, Барнаул
E-mail: plotnikov@phys.asu.ru*В окончательной редакции 26 сентября 2007 г.*

При проведении термомеханических циклов в поликристаллическом алюминии установлено, что монотонное накопление деформации с ростом температуры при увеличении механического напряжения в цикле сменяется макроскопически скачкообразным деформационным эффектом, сопровождающимся трансформированием монотонной акустической эмиссии в единичные акустические сигналы. При этом активационный объем в цикле экспоненциально растет в зависимости от температуры, свидетельствуя тем самым о нарастании объема элементарных атомных смещений в ходе единичного деформационного акта.

PACS: 81.40.Gh

Эффекты скачкообразной деформации металлических материалов хорошо известны [1,2]. Так, скачкообразная деформация в алюминии при низкой (гелиевой) температуре обусловлена динамикой взаимосвязанного движения дислокационных скоплений и термостимулированным формированием дислокационных лавин [1]. Скачкообразное пластическое течение разбавленных сплавов при комнатных и более высоких температурах связано с эффектом Портевена–Ле Шателье [2]. Считается, что термомеханическая неустойчивость пластического течения обусловлена кратковременным когерентным скольжением больших групп дислокаций, формирующих единичный след скольжения, и пространственной корреляцией деформационных процессов в мезоскопическом масштабе [1,2].

В наших экспериментах в условиях высокотемпературного нагружения поликристаллического алюминия наблюдаются макроскопические

скачкообразные деформационные эффекты. Деформационные скачки сопровождаются высокоамплитудными единичными сигналами акустической эмиссии. В результате сопоставления акустического сигнала деформационному скачку (точнее, скорости деформации на скачкообразном участке) определялся акустический критерий корреляции элементарных деформационных актов.

Эксперименты представляли собой термомеханическое циклирование образцов из алюминия технической чистоты путем циклического изменения температуры при постоянном механическом напряжении или механического напряжения при постоянной температуре. Циклическое изменение температуры осуществляли в интервале от комнатной и до температуры плавления алюминия, а циклическое изменение механического напряжения осуществляли до величин, включающих предел текучести. В экспериментах регистрировали температуру, величину накопленной деформации, среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии, механическое напряжение. Экспериментальная установка описана ранее [3].

На рис. 1 приведены результаты циклирования при циклическом изменении температуры (нагрев—охлаждение с умеренной скоростью при постоянной нагрузке). При нагрузке не выше 18 МПа нагрев до 650° сопровождается только монотонным накоплением деформации примерно до 0.6% и соответственно монотонным ростом среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. Такой характер накопления деформации и акустической эмиссии сохраняется и в последующих циклах. Следует отметить, что на фоне монотонного накопления деформации наблюдаются небольшие деформационные скачки, которым соответствуют единичные акустические сигналы.

При увеличении нагрузки в цикле примерно до 18.7 МПа и выше, как показано на рис. 1, монотонный характер накопления деформации величиной около 0.7% сменяется макроскопическим скачкообразным деформационным актом величиной около 0.5% (на рис. 1 приведено 2 деформационных скачка, разделенных небольшим монотонным участком). Деформационные скачки развиваются в высокотемпературной области цикла примерно с 600°С. Такому деформационному скачку соответствует акустический сигнал аномально большой амплитуды. Дальнейшее проведение циклов при возрастании механического напряжения сопровождается макроскопическими деформационными скачками и высокоамплитудной акустической эмиссией, чередующимися с моно-

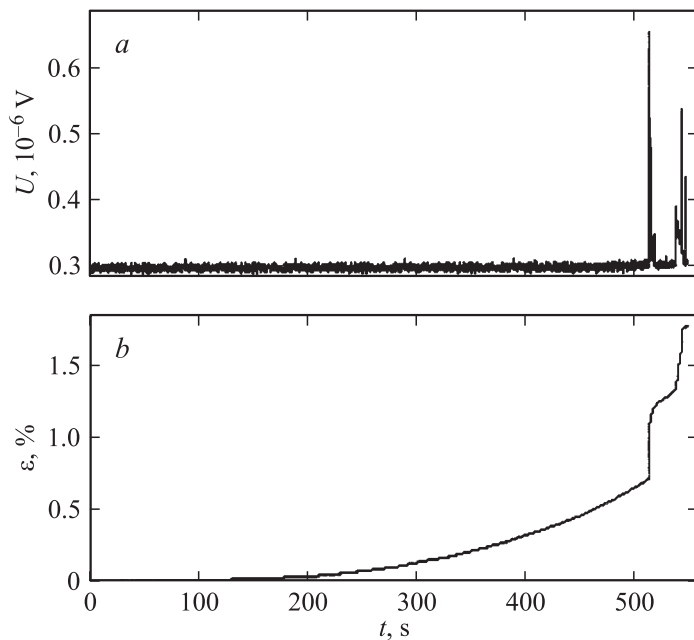


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (а) и деформации (б) от времени процесса.

тонным накоплением деформации и монотонным ростом среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии.

Данные по накоплению деформации в изотермических циклах нагружение–разгрузка образца представляют собой монотонно возрастающую зависимость величины деформации от времени процесса. Ввиду тривиальности такой зависимости эти данные здесь не представлены, однако используются при анализе активационных параметров. Максимальная деформация в цикле достигла величины примерно 26%. Такому монотонному характеру накопления деформации соответствует как монотонный рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии, так и формирование единичных акустических сигналов в ходе всего процесса деформирования. Циклы нагрузка до 30–35 МПа – разгрузка до нулевого напряжения были проведены для температур от комнатной и далее через каждые 100 вплоть до 600°С.

Для анализа выявленных особенностей накопления деформации в термомеханических циклах, представленных на рис. 1, проведем анализ активационного объема элементарного деформационного акта, воспользовавшись данными для всех температур изотермических термомеханических циклов. Определение активационного объема проводили путем анализа зависимости энергии акустической эмиссии от механического напряжения и традиционным методом [4], анализируя зависимость скорости деформации от напряжения.

Согласно выражению [4]:

$$d\varepsilon/dt = d\varepsilon_0/dt \exp[-(\Delta H_0 - \sigma b\Delta B)/RT], \quad (1)$$

где константа $d\varepsilon_0/dt$ — предэкспоненциальный множитель, непосредственно связанный с числом структурных элементов, вовлекаемых в элементарный акт пластической деформации, $(\Delta H_0 - \sigma b\Delta B)$ — энтальпия активации, тождественная „кажущейся энергии активации“, ΔH_0 — энтальпия активации в отсутствие внешнего нагружения, $\sigma b\Delta B$ — работа, которую совершает приложенное напряжение σ ; для определения активационного объема $b\Delta B$ (здесь b — вектор Бюргерса) или активационной площади ΔB необходимо воспользоваться экспериментальными данными по накоплению деформации в изотермических условиях, представив экспериментальные данные в координатах $\ln(d\varepsilon/dt) - \sigma$. Ранее было показано [3], что энергия акустической эмиссии $J = U_i^2 t_i$ в термомеханических циклах пропорциональна приращению деформации, а мощность акустической эмиссии dJ/dt (фактически квадрат амплитуды акустической эмиссии) пропорциональна скорости деформации (здесь Δt_i — время i -го интервала, в котором измерено U_i). Здесь нет противоречий с известными данными, согласно которым акустическая эмиссия приходится на начальную стадию пластического течения. В наших экспериментах силовое воздействие в термомеханическом цикле может быть и ниже предела текучести. В то же время при термическом воздействии за накопление деформации могут быть ответственны как дислокационные, так и совокупность диффузионных и зернограничных процессов, контролирующих элементарный деформационный акт [4].

Выражение (1) в связи со сказанным можно записать как

$$dJ/dt = dJ_0/dt \exp(-\Delta H_0/RT) \exp(\sigma b\Delta B/RT). \quad (2)$$

Так как температура в наших (изотермических) экспериментах константна, то множитель $dJ_0/dt \exp(-\Delta H_0/RT)$ в выражении (2) является

Активационный объем элементарного деформационного акта в алюминии при термомеханическом циклировании

Температура термомеханического цикла, °C	Активационный объем		Коэффициент корреляции	
	$b\Delta V_1 \cdot 10^{21}, \text{cm}^3$	$b\Delta V_2 \cdot 10^{21}, \text{cm}^3$	r_1	r_2
25	0.34 ± 0.01	0.41 ± 0.02	0.985	0.993
100	0.53 ± 0.02	0.57 ± 0.06	0.987	0.996
200	0.57 ± 0.05	0.65 ± 0.08	0.986	0.995
300	0.94 ± 0.11	0.84 ± 0.1	0.988	0.997
400	0.93 ± 0.1	1.5 ± 0.014	0.986	0.994
500	1.36 ± 0.12	1.72 ± 0.16	0.987	0.998
600	2.70 ± 0.23	2.59 ± 0.25	0.994	0.997

Примечание. Активационный объем $b\Delta V_1$ определен по анализу акустической эмиссии, т.е. в соответствии с уравнением (2). Активационный объем $b\Delta V_2$ определен по скорости накопления деформации, т.е. в соответствии с уравнением (1). Коэффициент корреляции r_1 характеризует точность аппроксимации экспериментальных данных уравнением (2), а r_2 — точность аппроксимации уравнением (1).

также константой. Из такого представления можно определить активационный объем $b\Delta V$ для данной температуры процесса.

В таблице представлены данные по активационному объему, полученные из анализа зависимостей мощности (2) акустической эмиссии и скорости деформации (1) от механического напряжения в соответствии с подходом [5]. Из сопоставления активационных объемов следует, что в пределах экспериментальной погрешности они совпадают, свидетельствуя о корректности проведенного анализа. Такое совпадение может также свидетельствовать о связи амплитуды акустического сигнала с величиной объема активации элементарного деформационного акта. Разумеется, эта связь опосредована и, по-видимому, определяется размером дислокационного сегмента, выходящего на границу раздела. Такой вывод не противоречит классическим представлениям о генерировании акустических сигналов дислокациями, выходящими на поверхность [6,7]. Следует лишь учесть, что при высокой температуре в термомеханическом цикле формируется деформационная полоса, представляющая собой выход на поверхность дислокационного ансамбля [4].

Из этих же данных следует, что активационный объем растет с увеличением температуры эксперимента. Как показано на рис. 2, зависимость объема активации от температуры носит нелинейный ха-

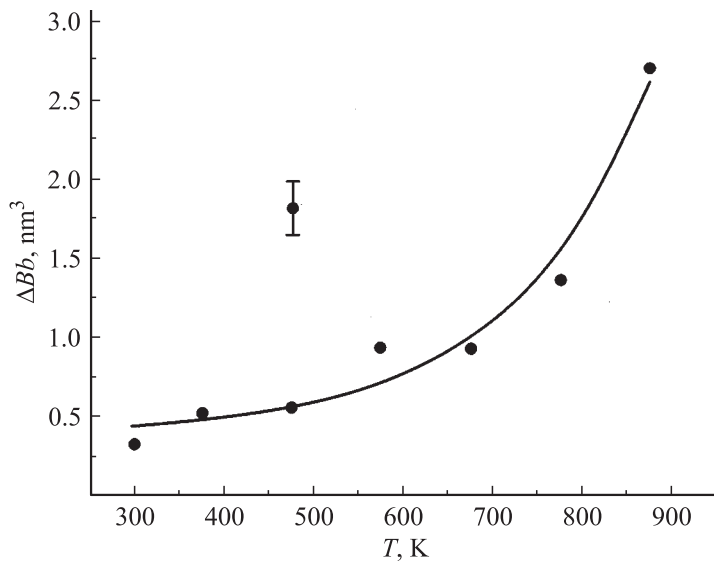


Рис. 2. Зависимость активационного объема элементарного деформационного акта в алюминии от температуры термомеханического цикла.

рактически, с высокой точностью эту зависимость можно аппроксимировать экспоненциальной функцией

$$y = y_0 + A \exp(T/t), \quad (3)$$

где $y_0 = 0.47 \pm 0.12$, $A = 0.0027 \pm 0.004$, $t = 130 \pm 29$. Коэффициент корреляции, равный 0.986, близок к единице. Размерность параметров y_0 , A совпадает с размерностью объема в nm^3 . Параметр t имеет размерность температуры, физическая сущность его в данной статье не обсуждается. Величина параметра y_0 на порядок превышает величину атомного объема, значение которого для твердых тел, согласно [8], близко к 0.01 nm^3 .

Экспоненциальный рост активационного объема при увеличении температуры свидетельствует о существенном увеличении масштаба кооперативных атомных перемещений, контролирующих единичный деформационный акт. Сопоставление экспоненциального роста активационного объема, представленного на рис. 2, и скачкообразного

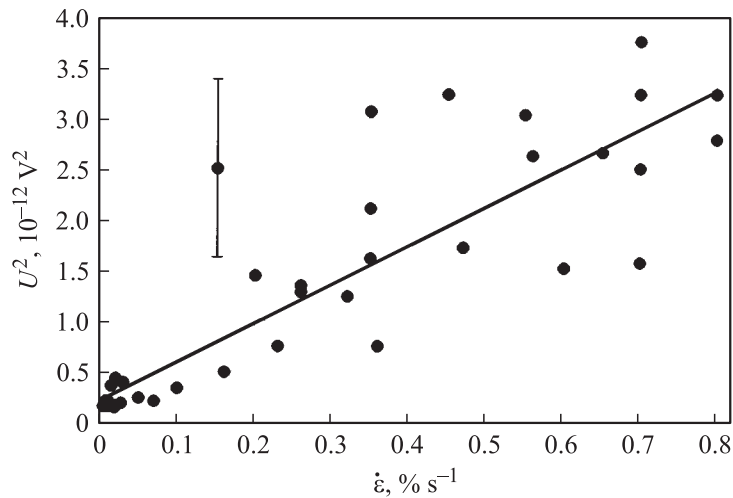


Рис. 3. Зависимость квадрата амплитуды акустического сигнала от скорости деформации на скачкообразном участке. Линейная аппроксимация зависимости осуществлена при коэффициенте корреляции 0.9.

характера накопления деформации, приведенного на рис. 1, свидетельствуют о росте корреляции элементарных деформационных актов в мезоскопическом масштабе. Известно, что дислокационный ансамбль, формирующий деформационную полосу при высокой температуре [4], может быть представлен как динамическая система, коллективное поведение которой связано с когерентным скольжением больших групп дислокаций [2]. Тогда выход на поверхность таких дислокаций представляет собой систему элементарных излучателей, формирующих акустический сигнал аномально большой амплитуды.

В то же время макроскопическая величина деформационного скачка в наших экспериментах свидетельствует, что в этом акте участвует более чем одна деформационная полоса. То есть эффект корреляции в процессе макроскопического скачка должен охватывать систему деформационных полос, а амплитуда акустического сигнала будет выступать в качестве меры корреляции.

Действительно, как показано на рис. 3, квадрат амплитуды акустического сигнала пропорционален скорости деформации на скачкообразном

участке. С достаточной точностью (коэффициент корреляции около 0.9) зависимость квадрата амплитуды акустического сигнала от скорости деформации может быть аппроксимирована линейной функцией.

Таким образом, экспериментальные результаты свидетельствуют, что при высоких температурах накопление деформации может осуществляться немонотонно и представлять собой разномасштабные (вплоть до макроскопических) деформационные скачки, сопровождаемые акустическими сигналами, амплитуда которых коррелирует со скоростью прироста деформации на немонотонном участке. Существенно, что размер активационного объема экспоненциально растет при увеличении температуры, свидетельствуя тем самым об увеличении масштаба коррелированных атомных смещений, контролирующих элементарный деформационный акт. Из приведенных экспериментальных данных следует, что эффект корреляции может охватывать дислокационный ансамбль в масштабе более чем одна деформационная полоса.

Список литературы

- [1] Бобров В.С., Лебедкин М.А. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 7. С. 1881–1889.
- [2] Лебедкин М.А., Дунин-Барковский Л.Р. // ЖЭТФ. 1998. Т. 113. № 5. С. 1816–1829.
- [3] Плотников В.А., Макаров С.В. // Изв. вузов. Физика. 2005. № 11. С. 33–38.
- [4] Пуарье Ж.-П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. М.: Мир, 1988. 287 с.
- [5] Малыгин Г.А. // ФММ. 1972. Т. 34. № 1. С. 191–199.
- [6] Нацик В.Д., Чишко К.А. // Акустический журнал. 1982. Т. 20. № 3. С. 381–389.
- [7] Бойко В.С., Кривенко Л.Ф. // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. № 1. С. 255–261.
- [8] Слуцкер А.И. // ФТТ. 2005. Т. 47. № 5. С. 777–787.