

## Накопление деформации и акустическая эмиссия в условиях термомеханического нагружения алюминиево-магниевого сплава\*

С.В. Макаров<sup>1</sup>, В.А. Плотников<sup>1,2</sup>, М.В. Лысиков<sup>1</sup>, Е.А. Колубаев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия)

## Acoustic Emission and Strain Accumulation under Thermomechanical Loading of Aluminum-Magnesium Alloy

S.V. Makarov<sup>1</sup>, V.A. Plotnikov<sup>1,2</sup>, M.V. Lysikov<sup>1</sup>, E.A. Kolubaev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia)

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

Проведены исследования деформационного поведения и акустической эмиссии в алюминиево-магниево-магний в сплаве в условиях неизотермического термомеханического нагружения. Накопление деформации в сплаве, в условиях изменения температуры от комнатной до 500 °С, протекает в двух температурных интервалах (I, II), характеризующихся разной скоростью деформации. Скорость накопления деформации коррелирует с акустической эмиссией. С ростом нагрузки в циклах от 40 до 200 МПа значение граничной температуры ( $T_{гр}$ ) между интервалами I и II изменяется немонотонным образом. В циклах с нагрузкой до 90 МПа значение  $T_{гр}$  возрастает, с увеличением нагрузки в циклах до 200 МПа  $T_{гр}$  смещается в область низких температур. Это свидетельствует о том, что смещение границы в область низких температур и появления высокоамплитудных импульсов акустической эмиссии характеризует снижение величины тепловых флуктуаций при повышении механической нагрузки, приводящих к разрыву межатомных связей в элементарном деформационном акте.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, алюминиево-магний в сплаве, монотонная деформация, скачкообразная деформация, корреляция.

Strain behavior and acoustic emission in aluminum-magnesium alloy under non-isothermal thermomechanical loading are investigated. The strain accumulation in the alloy within the temperature range from room temperature to 500 °C proceeds in two temperature intervals (I, II) with different straining rates. The rate of strain accumulation is correlated with acoustic emission. When the loading in cycles increases from 40 MPa to 200 MPa, changes of the boundary temperature ( $T_{GR}$ ) between intervals I and II are non-monotone. For the cycles with loading up to 90 MPa the  $T_{GR}$  values increase, while further for the cycles with loading up to 200 MPa the  $T_{GR}$  values shift into the low-temperature area. This fact demonstrates that shifting of the boundary into the low-temperature area and appearance of high-amplitude pulses of acoustic emission describes the reduction of thermal fluctuation when mechanical loading increases causing interatomic bond breakups during elementary deformation.

**Keywords:** acoustic emission, aluminum-magnesium alloy, monotonically deformation, jump deformation, correlation.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-06

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации проекта № 288 «Новые электромагнитные и акустические методы исследования деформационного поведения металлов и сплавов».

**Введение.** Эксперименты по деформированию моно- и поликристаллов алюминия и других металлов и сплавов в широком интервале температур свидетельствуют, что в ходе нагружения накопление деформации осуществляется двояким образом: монотонным путем, когда на зависимости деформации от времени (температуры) процесса отсутствуют события, нарушающие монотонность; немонотонным путем, когда на этой зависимости наблюдаются макроскопические деформационные скачки [1, 2]. Эти особенности деформационного поведения металлов коррелируют с акустической эмиссией, сопровождающей процесс накопления деформации при высоких температурах: монотонное накопление деформации сопровождается низкоамплитудной акустической эмиссией; скачкообразное накопление деформации характеризуется высокоамплитудными единичными сигналами акустической эмиссии [3, 4].

Деформирование алюминиево-магниевого сплава в широком интервале температур также представляет собой двоякий процесс накопления деформации, сопровождаемый акустической эмиссией [5, 6]. Известно, что эффект прерывистой текучести в алюминиево-магниевого сплавах при механическом нагружении представляет собой процесс формирования полос деформации, являющиеся областями локализации пластической деформации [7]. Прерывистая текучесть на зависимости напряжение — деформация проявляется в скачках (зубцах) напряжения, причем полоса деформации, ответственная за акты прерывистой текучести, является макроскопическим объектом и развивается из критического зародыша полосы. Наблюдаются два типа полос деформации: пространственно неорганизованные полосы и пространственно организованные. Каждый акт прерывистой текучести связан с появлением одной полосы деформации [8].

Прерывистая текучесть сопровождается импульсами акустической эмиссии, коррелирующие с появлением полос деформации, т. е. каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [5, 6, 8]. Проявление закономерностей прерывистой текучести и акустической эмиссии есть следствие волновой природы деформации в алюминиево-магниевого сплавах, волна деформации, распространяясь от концентратора напряжений, стимулирует образование полос деформации и акустическую эмиссию [9].

Целью данной работы является проведение исследования деформации и акустической эмиссии в Al-Mg сплаве при нагружении в широком интервале температур вплоть до температуры плавления.

**Методика экспериментов.** Объектом исследований был выбран алюминиево-магний сплав АМг6. Из пластины сплава АМг6 вырезали образцы в виде стержней длиной 300 мм, в которых были сформированы области локализации деформации диаметром 4 мм и длиной 30 мм. Образец предварительно

отжигали при температуре 500 °С в течение 1 ч и охлаждали с печью.

Механическое нагружение, измерение деформации, температуры и среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии проводили с помощью установки, схематичное описание которой приведено в публикации [6]. Образец нагружали сдвиговым напряжением и измеряли сдвиговую деформацию. Нагружение осуществляли неизотермически непрерывным нагревом от 25 до 500 °С. Кроме среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии  $U$ , в экспериментах анализировали и интегральный параметр акустической эмиссии  $J = \sum U^2 \Delta t_i$ , где  $\Delta t_i$  — шаг разбиения временного интервала процесса.

**Экспериментальные результаты.** Экспериментальные данные по накоплению деформации и акустической эмиссии в образце, полученные в условиях неизотермического цикла при постоянном механическом напряжении величиной около 120 МПа, представлены на рисунке 1. Из приведенных данных следует, что при нагреве нагруженного образца наблюдаются два участка монотонного накопления деформации (область I, область II). В низкотемпературной области I в температурном интервале 20–400 °С монотонному накоплению деформации величиной примерно 5% соответствует акустическая эмиссия, характеризующаяся монотонным изменением среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии.

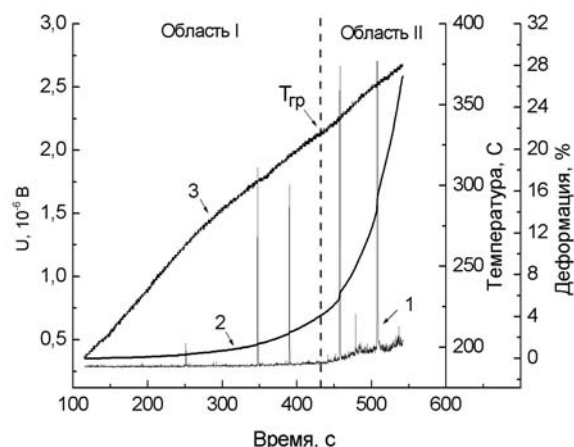


Рис. 1. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в сплава АМг6 при нагрузке 120 МПа в ходе неизотермического термомеханического цикла: 3 — температура в ходе нагрева; области: I — низкотемпературная, II — высокотемпературная

В высокотемпературной области II при температуре около 400 °С ( $T_{гр}$ ) характер накопления деформации и акустической эмиссии меняется: быстрому накоплению деформации соответствует активный рост амплитуды среднеквадратичного напряжения акустической

Таблица 1

Параметры деформационных скачков и акустической эмиссии при монотонно-скачкообразной деформации в неизотермическом цикле при нагрузке 200 МПа

Деформационный скачок	Температура скачка, °С	$J_{\text{пика}}, 10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$	Величина деформационного скачка, %	Амплитуда сигналов акустической эмиссии, мкВ
1	265	0,11	0,003	0,18
2	305	0,90	0,011	1,61
3	320	0,83	0,013	1,45
4	345	4,21	0,623	2,45
5	365	7,41	1,275	2,53

эмиссии. Это может свидетельствовать, что в области II после 400 °С активизируется механизм накопления деформации, который становится основным. Интегральный параметр акустической эмиссии  $J$  пропорционален энергии акустической эмиссии и характеризует интенсивность элементарных деформационных процессов, ответственных за формирование акустических сигналов (табл. 1).

При увеличении нагрузки в неизотермических циклах до 200 МПа характер деформации изменяется на монотонно-скачкообразный (рис. 2). На фоне монотонно возрастающей нагрузки возникают деформационные скачки. Первый деформационный скачок (0,003 %) формируется при 265 °С, которому соответствует пик акустической эмиссии амплитудой 0,18 мкВ (табл. 1). С ростом температуры процесс накопления деформации приобретает периодический характер — монотонные участки чередуются с деформационными скачками, которые, в свою оче-

редь, коррелируют с высокоамплитудными сигналами акустической эмиссии. Температурный интервал монотонно-скачкообразной деформации составляет 265–365 °С. Отметим, что монотонно-скачкообразный характер деформационного поведения сплава проявляется при высоких значениях механических напряжений около 190–200 МПа. Это может свидетельствовать об особом, структурно упрочненном состоянии материала.

Анализ деформационных скачков и акустической эмиссии при монотонно-скачкообразной деформации в неизотермических циклах показал (табл. 1), что с возрастанием температуры в цикле увеличиваются, как деформационные скачки (от 0,003 до 1,275 %), так и амплитуда сигналов акустической эмиссии (от 0,18 до 2,53 мкВ), а интегральный параметр акустической эмиссии  $J$ , характеризующий интенсивность элементарных деформационных процессов, изменяется почти на два порядка.

**Анализ экспериментальных результатов.** Рост амплитуды единичного сигнала акустической эмиссии (табл. 1) свидетельствует о возрастании корреляции в системе элементарных деформационных актов в условиях сложного термомеханического нагружения [10]. При этом доля деформационных скачков в общей монотонной деформации за цикл незначительна и составляет 0,06 %.

Для всех неизотермических циклов при механических нагрузках в интервале от 40 до 200 МПа на деформационной зависимости можно выделить две области: низкотемпературную — область I, высокотемпературную — область II (рис. 1, 2), отличающиеся скоростью накопления деформации, следовательно, скоростью элементарных деформационных процессов.

В рамках данного подхода проведен анализ зависимости накопления деформации на двух деформационных участках методом наименьших квадратов с помощью двойной экспоненциальной функции вида

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{01} \exp(\nu_1 t) + \varepsilon_{02} \exp(\nu_2 t),$$

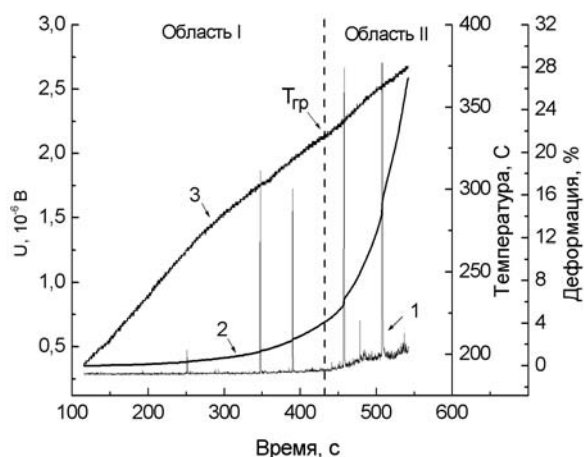


Рис. 2. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в сплава АМгб при нагрузке 200 МПа в ходе неизотермического термомеханического цикла: 3 — температура в ходе нагрева; области: I — низкотемпературная, II — высокотемпературная

Таблица 2

Значения параметров аппроксимирующей функции  $Y = A + B \cdot X$  для двух интервалов напряжений (рис. 3)

Интервал напряжений, МПа	Параметр А	Параметр В	Коэффициент корреляции, r
40–90	428±16	0,35±0,21	0,562
90–200	662±28	-2,1±0,2	0,964

где  $\varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$  — начальные деформации;  $v_1, v_2$  — скорости деформации на двух температурных интервалах (области I, II). Данные аппроксимации зависимости деформации от времени в неизотермических циклах при разных механических нагрузках приведены в таблице 2. Для двух температурных интервалов (области I, II) найдены скорости деформации  $v_1$  и  $v_2$ .

Для низкотемпературного интервала значения скорости деформации  $v_1$  составляет  $0,0031 \pm \pm 0,0017 \text{ с}^{-1}$ , в то время как для высокотемпературного —  $v_2 = 0,0129 \pm 0,0021 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, средняя скорость деформации в высокотемпературной области приблизительно в четыре раза выше средней скорости деформации в низкотемпературной области. В области II температурный интервал составляет приблизительно  $100^\circ\text{C}$  для всех механических нагрузок.

При этом значение граничной температурной точки ( $T_{гр}$ ) (рис. 1, 2) между областями I и II изменяется в зависимости от величины нагрузки в циклах от 40 до 200 МПа не монотонным образом (рис. 3). Максимальное значение граничной температуры соответствует механическому напряжению около 90 МПа. Проведенный анализ методом наименьших квадратов для двух интервалов механических напряжений показал, что в интервале нагрузок 40–90 МПа значение температуры  $T_{гр}$  незначительно возрастает по линейному закону (зависимость 1), в то время как в циклах с нагрузкой от 90 до 200 МПа наблюдается значи-

тельное линейное снижение температуры  $T_{гр}$  (зависимость 2) (табл. 2). Значение максимальной температуры при 90 МПа составляет около  $470^\circ\text{C}$ .

**Обсуждение результатов.** Процесс накопления деформации в алюминий-магнийевом сплаве протекает на двух температурных интервалах: низкотемпературном — область I, высокотемпературном — область II. Скорость деформации на первом температурном интервале почти в четыре раза меньше скорости в области II.

В области I низкая скорость накопления деформации ( $v_1 = 0,0031 \text{ с}^{-1}$ ) соответствует низкоамплитудная монотонная акустическая эмиссия, свидетельствующая о низкой корреляции элементарных деформационных актов [2]. Малоамплитудная акустическая эмиссия соответствует малым степеням деформации образца в пределах [8, 9]. В высокотемпературной области II быстрое ( $v_2 = 0,0129 \text{ с}^{-1}$ ) накопление деформации соответствует быстрому монотонному росту высокоамплитудной акустической эмиссии. Здесь рост акустической эмиссии может свидетельствовать о повышении корреляционных эффектов в системе элементарных деформационных актов. При этом с ростом температуры повышение корреляции в системе элементарных деформационных актов может привести к формированию глобального макроскачка и разрушению материала. Формирование глобального макроскачка свидетельствует о макроскопическом масштабе корреляции деформационных актов в образце.

Кроме того, в условиях высоких механических нагрузок (190–200 МПа) в областях I, II формируются единичные деформационные скачки различной амплитуды в температурном интервале  $265\text{--}365^\circ\text{C}$ , которые соответствуют высокоамплитудным сигналам акустической эмиссии (рис. 3, табл. 1). Это свидетельствует о локальном увеличении концентраторов напряжений, срыв которых приводит к возникновению деформационного скачка, как минимум в пределах одного зерна.

Элементарным деформационным актом при нагружении образцов является формирование деформационной полосы [7–9]. Очевидно, монотонное накопление деформации обусловлено слабой корреляцией в формирующейся системе деформационных полос. В то же время деформационные скачки свидетельствуют о высокой корреляции и локализации дефор-

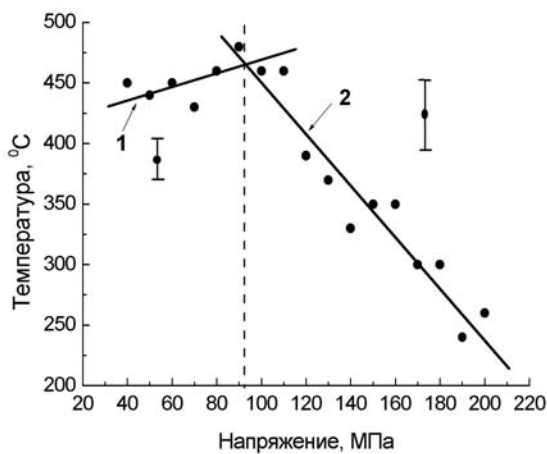


Рис. 3. Зависимость граничной температуры от механического напряжения в циклах

мационных полос в макроскопическом масштабе, а импульсы акустической эмиссии характеризуют высокую когерентность элементарных акустических сигналов от системы деформационных полос, интерференция которых формирует единичный акустический сигнал.

**Заключение.** Особенности деформационного поведения алюминивно-магниевого сплава проявляются в двух температурных интервалах, характеризующихся разной скоростью деформации. В низкотемпературной области накоплению деформации с низкой скоростью соответствует низкоамплитудная монотонная акустическая эмиссия, что свидетельствует о низкой корреляции элементарных деформационных актов.

В высокотемпературной области быстрое накопление деформации соответствует быстрому монотонному росту высокоамплитудной акустической эмиссии, что приводит к формированию глобального макроскачка. Такой характер деформации свидетельствует о высокой корреляции элементарных деформационных актов. В циклах с нагрузкой от 90 до 200 МПа  $T_{тр}$  смещается в область низких температур. Таким образом, смещение границы в область низких температур и появления высокоамплитудных импульсов акустической эмиссии характеризует снижение величины тепловых флуктуаций при повышении механической нагрузки, приводящих к разрыву межатомных связей в элементарном деформационном акте.

### Библиографический список

1. Плотников В.А., Макаров С.В. Деформационные эффекты и акустическая эмиссия при высокотемпературной деформации алюминия // Письма в ЖТФ. — 2008. — Т. 34, № 6.
2. Плотников В.А., Макаров С.В., Потекаев А.И. Высокотемпературная пластическая деформация и акустическая эмиссия алюминия в слабоустойчивом состоянии // Известия вузов. Физика. — 2013. — Т. 56, № 6.
3. Плотников В.А., Макаров С.В. Структурный фактор акустической эмиссии при высокотемпературной деформации алюминия // ФММ. — 2008. — Т. 105, № 4.
4. Плотников В.А., Макаров С.В. Акустическая эмиссия и активационные параметры при высокотемпературной деформации алюминия // ФММ. — 2008. — Т. 105, № 5.
5. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Закономерности акустической эмиссии в условиях пластической деформации алюминивно-магниевого сплава при неизотермическом нагружении // Известия Алт. гос. ун-та. — 2014. — № 1/1. DOI:10.14258/izvasu(2014)1.1-56.
6. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Скачкообразная деформация и импульсная акустическая эмиссия при нагружении алюминивно-магневых сплавов // Известия Алт. гос. ун-та. — 2014. — № 1/2. DOI:10.14258/izvasu(2014)1.2-36
7. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ. — 1993. — Т. 75, № 5.
8. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминивно-магневых сплавов // ФММ. — 1996. — Т. 81, № 1.
9. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Влияние геометрических параметров образца на механические свойства и акустическую эмиссию при прерывистой текучести в Al-Mg сплавах // ФММ. — 1991. — № 10.
10. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. Акустическая эмиссия и проявление неустойчивости кристаллической решетки алюминия при высокотемпературной деформации // Известия вузов. Физика. — 2011. — № 3.