

Частотный спектр акустической эмиссии в ходе накопления деформации в алюминиево-магниево- сплаве в условиях термомеханического нагружения

С.В. Макаров¹, В.А. Плотников^{1,2}

¹Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Frequency Spectrum of Acoustic Emission during Deformation Accumulation in Aluminum-Magnesium Alloy under Thermomechanical Loading

S.V. Makarov¹, V.A. Plotnikov^{1,2}

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch
of the RAS (Tomsk, Russia)

Приведены результаты исследования частотных спектров акустической эмиссии, полученных в ходе накопления деформации в алюминиево-магниево-сплаве в условиях термомеханического нагружения от комнатных температур до 550 °С. Проведен анализ спектров сигналов акустической эмиссии в условиях активного накопления деформации: монотонного — в области низких температур (до температуры деформационного структурного перехода), квазискачкообразного — в высокотемпературной области.

Анализ спектральной плотности сигналов акустической эмиссии свидетельствует о перераспределении колебательной энергии первичного акустического сигнала по резонансным колебаниям стоячих сдвиговых и продольных волн резонатора, геометрия которого соответствует области локализации деформации (проточки образца). Показано, что в спектре сигналов при монотонном накоплении деформации до деформационного структурного перехода (в области низких температур) фактически не сформированы резонансы в выделенных резонансных частотах. В области высоких температур при квазискачкообразном накоплении деформации в резонаторе накапливается заметная энергия колебаний стоячих волн (как для сдвиговых, так и для продольных волн). В кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме, который связан с длиной стоячей волны, определяющей макроскопический масштаб корреляции.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, высокотемпературная деформация, монотонная и скачкообразная деформация, спектральная плотность.

In this paper, results of a study of acoustic emission frequency spectra obtained during accumulation of deformation in an aluminum-magnesium alloy under thermo-mechanical loading from room temperature up to 550°C are presented. The spectra of acoustic emission signals are analyzed for the conditions of active deformation accumulation: the monotonic accumulation — in the region of low temperatures (up to a temperature of deformation and structural transition), and the quasi step-like accumulation — in the high-temperature region.

Analysis of spectral density of acoustic emission signals indicates the redistribution of the vibrational energy of the primary acoustic signal by the resonant vibrations of the standing shear and longitudinal waves of the resonator, the geometry of which corresponds to the region of deformation localization (sample flow). It is shown that no resonances are formed in the selected resonant frequencies in the spectrum of signals at monotonic accumulation of deformation before the structural transition (in the region of low temperatures). In the high-temperature region of the quasi step-like accumulation of deformation, noticeable energy of oscillations of standing waves (both for shear and longitudinal waves) is accumulated in the resonator. In the crystal medium, the oscillations of the standing wave activate elementary deformation shifts in a certain volume, which is associated with the length of the standing wave, which determines the macroscopic scale of the correlation.

Key words: acoustic emission, high temperature deformation, monotonic and abrupt deformation, the spectral density.

Введение

Результаты экспериментальных исследований по деформированию алюминиево-магниевого сплава в условиях высоких 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]. Эти особенности деформационного поведения 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.

Известно, что эффект прерывистой текучести в алюминиево-магневых сплавах при механическом нагружении представляет собой процесс формирования полос деформации, являющихся областями локализации пластической деформации [2]. 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 и пространственно организованные полосы. Каждый акт прерывистой текучести связан с появлением одной полосы деформации [3]. Прерывистая текучесть сопровождается импульсами акустической эмиссии, коррелирующими с появлением полос деформации, т.е. каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [3, 4].

Спектральный и динамический анализы прерывистой текучести обнаруживают наличие дальнедействующих долговременных корреляций в деформируемом материале [5]. Природа пространственной и временной корреляции согласно [6] связана каскадным механизмом размножения деформационных полос. Однако фактором корреляции выступает напряжение, локализованное на фронте границы деформационной полосы, а также дальнедействующие напряжения изгиба. На основе спектрального и динамического анализов можно утверждать, что фликкер-шумовая структура и монофрактальность силового отклика свидетельствуют о состоянии самоорганизующейся критичности деформируемого материала. Однако роль акустической эмиссии в процессах пространственной и временной корреляции элементарных деформационных актов до сих пор не обсуждалась.

Целью работы является исследование эволюции спектральной плотности акустической эмиссии в ходе

накопления деформации в алюминиево-магневом сплаве в условиях термомеханического нагружения.

Методика экспериментов

Образцы в виде стержней длиной 300 мм с квадратным сечением 5x5 мм, изготовленные из листового проката сплава АМг6, представляли собой волноводы, на которых были сформированы области локализации деформации диаметром 4 мм и длиной 40 мм. Для исследования пластических свойств в экспериментах была использована так называемая мягкая схема нагружения, в которой фиксировалась деформация как функция параметров силового воздействия.

Нагрев образца осуществляли именно в области локализации деформации. Остальную часть стержня не нагревали, она выполняла роль волновода. В реальном режиме времени одновременно регистрировались механическое нагружение, накопление деформации, температура и среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии. Измерения проводили с помощью оригинальной установки, собранной в лабораторных условиях [7]. Образец нагружали сдвиговым напряжением, измеряли сдвиговую деформацию. Нагружение постоянной нагрузкой в термомеханическом цикле осуществляли в ходе непрерывного нагрева образцов со скоростью около 1 град/с начиная от 25 и до 550 °С и последующего охлаждения до комнатной температуры. Для быстрого преобразования Фурье использовался стандартный алгоритм [8].

Экспериментальные результаты

Экспериментальные данные по регистрации акустической эмиссии в широком диапазоне частот, а также накоплению деформации в алюминиево-магневом сплаве в температурном интервале нагрева от комнатной до 550 °С при нагрузке 120 МПа приведены на рисунке 1. Накопление деформации до температуры 450 °С осуществляется монотонно (рис. 1, область 1), чему соответствует монотонная акустическая эмиссия, и квазискачкообразно в высокотемпературной области 2 (в интервале 450–550 °С), в которой наблюдается значительный рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. Квазискачкообразный характер накопления деформации представляет собой последовательность макроскопических деформационных актов, перемежающихся участками с монотонным накоплением деформации.

Согласно нашим работам при критической температуре $T_{кр}$ (рис. 1, $T_{кр} = 450$ °С) осуществляется смена механизма накопления деформации [9] в условиях деформационного структурного перехода, представляющая собой переход от накопления деформации, контролируемой термически активируемым переполнением дислокаций [10], к накоплению деформации, контролируемой зернограничными процессами производства полных (решеточных) дислокаций на тройных зернограничных стыках [11].

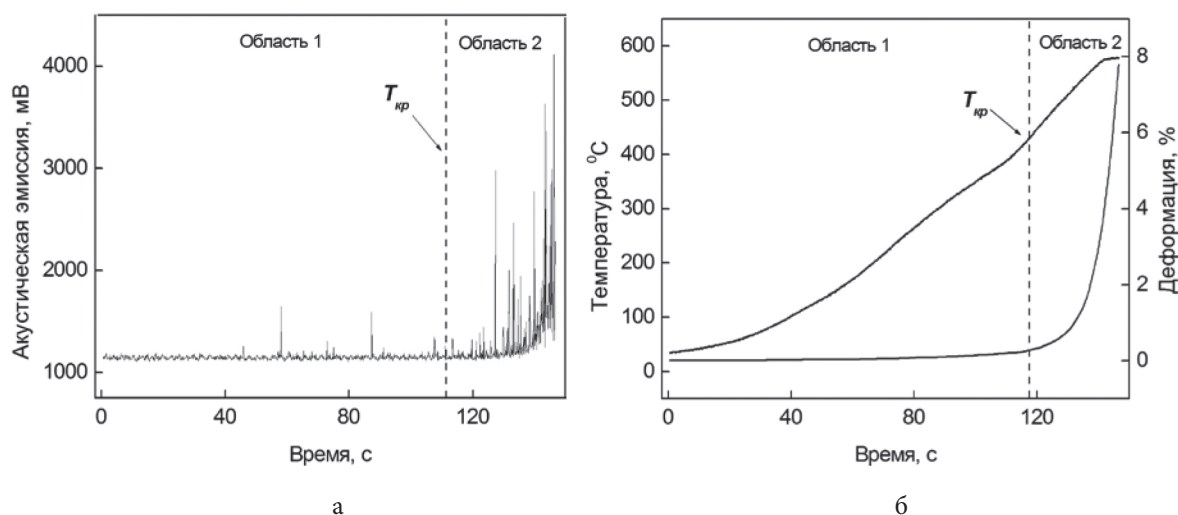


Рис. 1. Акустическая эмиссия, накопление деформации (а), температура в неизотермическом цикле (б)

Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии проведен для монотонного участка накопления деформации (рис. 1, область 1 — до деформационного структурного перехода) и для квазискачкообразного (рис. 1, область 2 — после деформационного структурного перехода, $T_{кр}$).

На рисунке 2 а,б представлены характерные спектры сигналов акустической эмиссии, полученные в одном неизотермическом цикле на деформационных участках с разными температурно-скоростными параметрами (область 1 — $T_{кр}$ — область 2). Мощность спектральной плотности, приведенной на рисунке 2а, характерна для монотонного накопления деформации и монотонной акустической эмиссии в области 1 (до температуры $T_{кр}$), а на рисунке 2б — для участков (область 2) квазискачкообразного накопления деформации и высокоамплитудной акустической эмиссии (после температуры $T_{кр}$).

При деформировании алюминий-магниевого сплава в области 1 с низкой скоростью на-

копления деформации ($\dot{\nu} = 0,03 \text{ \% c}^{-1}$) мощность спектральной плотности сигналов акустической эмиссии в диапазонах 40–50 и 80–95 кГц близка к уровню шума (рис. 2а). Очевидно, что спектральная линия с амплитудой 20000 усл. ед. на частоте 35,4 кГц соответствует резонансному колебанию, не связанному с деформационными процессами, а представляет собой шум измерительного датчика. На рисунке 2б приведен спектр сигналов акустической эмиссии, полученный на высокотемпературном квазискачкообразном участке накопления деформации (область 2). Характерной особенностью спектра является наличие высокоамплитудных спектральных линий в частотных диапазонах около 40–50 (1) и 80–95 (2)кГц, амплитуды которых на порядок превосходят амплитуды спектральных линий при монотонном участке накопления деформации (область 2).

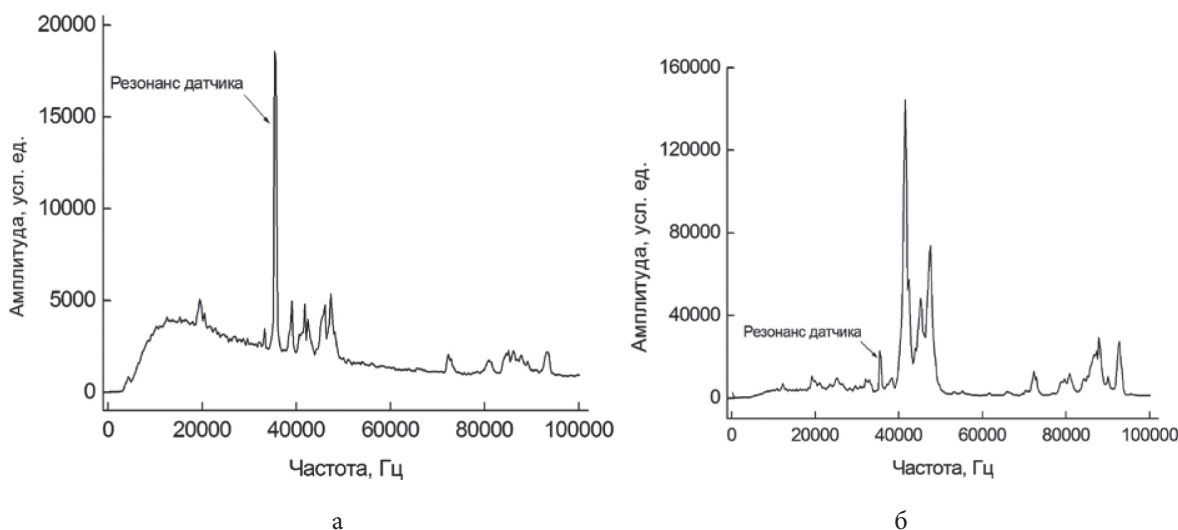


Рис. 2. Мощность спектральной плотности акустической эмиссии для двух участков накопления деформации: монотонного (область 1, рис. 1) и квазискачкообразного (область 2, рис. 1)

Дискретный характер мощности спектральной плотности сигналов акустической эмиссии свидетельствует, что система образцов — волновод представляет собой резонансную систему, состоящую из резонаторов, распределяющих колебательную энергию акустической эмиссии по выделенным спектральным диапазонам (рис. 2 а,б). Колебательная энергия акустической эмиссии может накапливаться на резонаторах (резонансных объемах) системы образцов — волновод путем формирования стоячих акустических волн.

Резонаторы определяют набор длин волн исходя из условия стоячей волны $L = \frac{\lambda}{2}k$, где L — геометри-

ческий размер резонатора; λ — длина волны; k — номер резонанса. Рассчитаны геометрические параметры резонаторов для случая распространения сигналов акустической эмиссии в виде сдвигового и продольного волновых пакетов (табл.).

Как следует из спектральных данных, резонансы для сдвиговых волн (скорость сдвиговой волны в алюминии равна 3040 м/с) в диапазоне 1 (40–50 кГц), а также для продольных волн (скорость продольной волны в алюминии равна 6420 м/с) в диапазоне 2 (80–95 кГц) соответствуют геометрии концентратора деформации длиной около 40 мм, который является областью локализации сдвиговой деформации.

Геометрические параметры резонаторов для случая распространения сигналов акустической эмиссии в виде сдвигового и продольного волновых пакетов

Область	Скорость деформации, с ⁻¹	Накопленная деформация, ε %	Частотный интервал, Гц			
			40–45	80–95	40–45	80–95
			Энергия, усл. ед.		Стоячая волна, λ/2, м	
1	0,03	0,2	104154	115792	0,038–0,033	0,04–0,034
2	0,2	8,1	1364040	669478	(сдвиговая)	(продольная)

Как показано в таблице, ширина и высота спектральных линий изменяется в процессе высокотемпературного деформирования. Из сопоставления спектральных данных (рис. 2 а,б) следует, что амплитуда спектральных линий возрастает более чем на порядок при переходе (в условиях деформационного структурного перехода) из области 1 (монотонной деформации) в область 2 (квазискачкообразной деформации).

Обсуждение экспериментов

Накопление деформации в алюминиево-магниевом сплаве при нагреве до 550 °С и действии постоянной нагрузки 120 МПа осуществляется по двум вариантам: до деформационного структурного перехода (до $T_{кр}$) монотонным путем, а в области высоких температур после деформационного структурного перехода — квазискачкообразным. Монотонному накоплению деформации соответствует монотонный рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии, квазискачкообразному — единичные сигналы среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии, формирующие высокоамплитудный пик в области высоких температур. В области низких температур монотонное накопление деформации контролируется преимущественно термически активируемым перемещением дислокаций, в высокотемпературной области накопление деформации контролируется преимущественно зернограничными процессами генерации полных решеточных дислокаций границами зерен [11].

Анализ спектральной плотности сигналов акустической эмиссии, полученной в области активного накопления деформации в алюминиево-магниевом сплаве, свидетельствует о значительном увеличении колебательной энергии первичного акустического

сигнала по резонансным колебаниям стоячих сдвиговых (40–50 Гц, рис. 2б) и продольных (80–95 Гц, рис. 2б) волн (табл.), параметры которых соответствуют геометрии резонатора (области локализации деформации — проточки образца).

В спектре сигналов при монотонном накоплении деформации в области низких температур (область 1, рис. 2) фактически не сформированы резонансы в выделенных частотах (40–50 и 80–95 Гц). В то же время в области высоких температур (рис. 2, область 2) при квазискачкообразном накоплении деформации в резонаторе накапливается заметная энергия колебаний стоячих волн (как для сдвиговых, так и для продольных волн) (рис. 2б, табл.).

В кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме, связанном с длиной стоячей волны, определяющей макроскопический масштаб корреляции. В то же время коррелированные деформационные сдвиги генерируют акустические сигналы, отвечающие условию когерентности, в результате интерференции которых формируется единичный акустический сигнал аномально высокой амплитуды. Эти сигналы компенсируют потери колебательной энергии стоячих волн в резонаторе, связанном с областью локализации деформации, что поддерживает корреляцию элементарных деформационных актов [9].

Заключение

Проведенный спектральный анализ сигналов акустической эмиссии показал, что в системе образцов — волновод происходит перераспределение энергии первичного высокочастотного акустического сигнала по низкочастотным резонаторам. Спектральная плотность акустической эмиссии представляет собой

острые резонансные линии, свидетельствующие о существовании резонансных объемов в пластически деформируемом материале.

Особенностью низкочастотных дискретных спектров сигналов акустической эмиссии для высокотемпературного квазискачкообразного накопления деформации является наличие

двух частотных областей: область 1 — 40–50 кГц, область 2 — 80–95 кГц, при этом спектральная плотность в высокотемпературной области 2 на порядок выше спектральной плотности низкотемпературной области 1, что свидетельствует об увеличении колебательной энергии стоячих волн в объеме деформируемого материала.

Библиографический список

1. Макаров С.В., Лысиков М.В. Накопление деформации в алюминий-магний-магний сплав в условиях деформационного структурного перехода // Известия Алтайского гос. ун-та. 2017. №1. DOI: 10.14258/izvasu(2017)1-03.
2. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // Физика металлов и металловедение (ФММ). 1993. Т. 75, №5.
3. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминий-магний-магний сплавов // ФММ. 1996. Т. 81, № 1.
4. 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.
5. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Гасанов М.Ф. Спектральный и динамический анализ пластических неустойчивостей при прерывистой ползучести алюминий-магний-магний сплав // Физика твердого тела (ФТТ). 2014. Т. 58, № 5.
6. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Денисов А.А. Макролокализация пластической деформации при прерывистой ползучести алюминий-магний-магний сплав // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, №4.
7. Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В., Колубаев Е.А. Накопление деформации и акустическая эмиссия в условиях термомеханического нагружения алюминий-магний-магний сплав // Известия Алтайского гос. ун-та. 2015. № 1/2. DOI: 10.14258/izvasu(2015)1.2-06.
8. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. М., 1990.
9. Макаров С.В., Плотников В.А., Потехаев А.И. Макроскопическая корреляция элементарных деформационных актов в слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки ГЦК металлов // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 4.
10. Мышляев М.М. Ползучесть полигонизованных структур // Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения. М., 1972.
11. Гудкин М.Ю., Овидько И.А., Скиба Н.В. Зернограничное скольжение и эмиссия решеточных дислокаций в нанокристаллических материалах при сверхпластической деформации // ФТТ. 2005. Т. 47, № 9.