

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ С СОДЕРЖАНИЕМ МАГНИЯ 6%

Макаров С.В.¹, Колубаев Е.А.^{2,3}, Лысиков М.Ю.¹

¹Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия (656049, г.Барнаул, пр. Ленина, 61), e-mail: mak.ispms@mail.ru

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия (634021, г.Томск, пр. Академический 2/4)

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, Россия (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30)

Проведены исследования деформации и акустической эмиссии в Al-Mg сплаве при нагружении в широком интервале температур вплоть до температуры плавления. Получены экспериментальные данные по накоплению деформации и акустической эмиссии в образце АМг6 в условиях неизотермического цикла при постоянном механическом напряжении. Обнаружено, что при нагреве нагруженного образца наблюдаются участки монотонного накопления деформации в двух температурных интервалах, характеризующиеся 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.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, термомеханическое нагружение, механическая активация.

FEATURES OF DEFORMATION AND ACOUSTIC EMISSION BEHAVIOR IN ALUMINIUM-MAGNESIUM ALLOYS CONTAINING Mg 6%

Makarov S.V.^{1,2}, Kolubaev E.A.^{2,3}, Lisikov M.Y.¹

¹Altai State University, Barnayl, Russia (656049, Barnayl, pr. Lenina, 61), e-mail: mak.ispms@mail.ru

²Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4)

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, pr. Lenina, 30)

Researches of deformation and acoustic emission in Al-Mg alloy under load over a broad temperature range up to melting temperature were occurred. Experimental data on the accumulation of deformation and acoustic emission in the sample AMg6 in conditions of nonisothermal cycle under constant mechanical tension were obtained. It was found that on heating of loaded sample plots monotonic accumulation of deformation in two temperature ranges are observed which are characterized by different rates of deformation. Low amplitude monotone acoustic emission corresponds to deformation accumulation with low speed in low temperature region that indicates on low correlations of element deformation acts. In the high-temperature area the rapid accumulation of deformation corresponds to the rapid monotonic growth of high-amplitude acoustic emission, which leads to the formation of a global macrojump. This type of deformation shows a high correlation of elementary deformation acts.

Keywords: acoustic emission, thermomechanical loading, mechanical activation.

Характерным откликом алюминиево-магниевых сплавов на механическое нагружение является эффект прерывистой текучести, проявляющийся в формировании полос деформации, которые представляют собой области локализации пластической деформации [1]. Прерывистая текучесть на зависимости напряжение – деформация представляет собой скачки (зубцы) напряжения, причем полоса деформации, ответственная за акты прерывистой текучести, является макроскопическим объектом и развивается из

критического зародыша полосы. При анализе поверхностного рельефа образцов обнаружено два типа полос деформации: пространственно неорганизованные полосы и пространственно организованные. Каждый акт прерывистой текучести связан с появлением одной полосы деформации [2].

Прерывистая текучесть сопровождается импульсами акустической эмиссии, коррелирующими с появлением полос деформации, то есть каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [2]. Проявление закономерностей прерывистой текучести и акустической эмиссии есть следствие волновой природы деформации в алюминий-магниевого сплавах: волна деформации, распространяясь от концентратора напряжений, стимулирует образование полос деформации и акустическую эмиссию [3].

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 алюминий-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 часа и охлаждали с печью. Механическое нагружение, измерение деформации, температуры и среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии проводили с помощью установки, схематичное изображение которой приведено на рис. 1. Как следует из схемы установки, образец нагружали сдвиговым напряжением и измеряли сдвиговую деформацию. Нагружение осуществляли неизотермическим путем, непрерывным нагревом начиная от 25 °С и до 500°С. Следует заметить, что кроме среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии U , в экспериментах анализировали и интегральный параметр акустической эмиссии $J = \sum U^2 \Delta t_i$, где Δt_i – шаг разбиения временного интервала процесса.

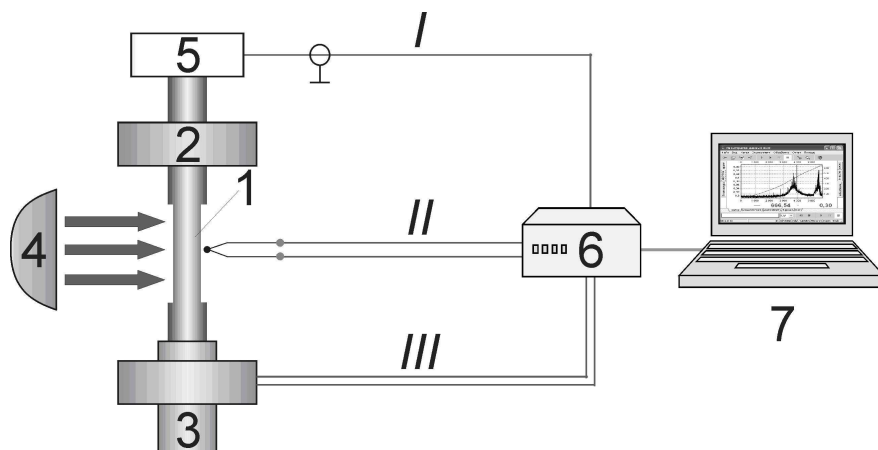


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – образец в виде стержня; 2 – неподвижный захват установки; 3 – подвижный захват установки с устройством нагружения и измерения деформации; 4 – нагревательный элемент; 5 – пьезопреобразователь сигналов акустической эмиссии; 6 – аналогоцифровой преобразователь; 7 – компьютер; символы I, II, III обозначают соответственно акустический канал, термопару, канал измерения деформации.

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 рис. 2.

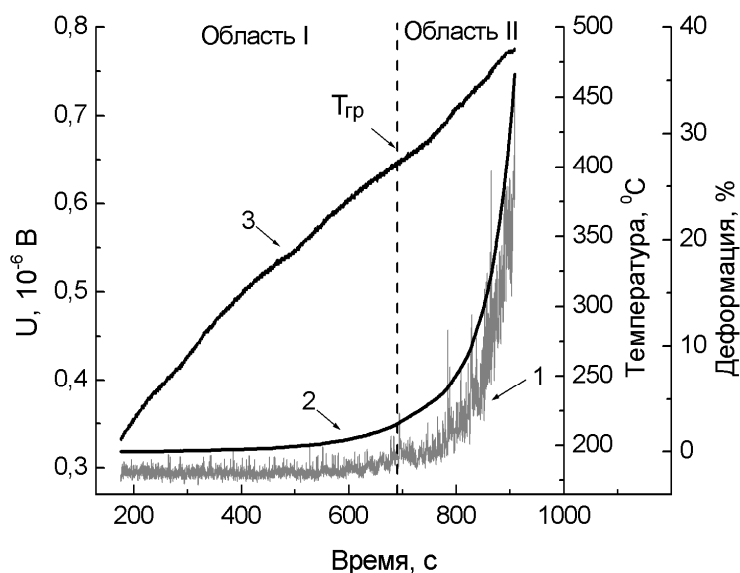


Рис. 2. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в сплаве АМгб при нагрузке 120 МПа в ходе неизотермического термомеханического цикла: 3 – температура в ходе нагрева. Области: I – низкотемпературная, II – высокотемпературная

Из приведенных данных следует, что при нагреве нагруженного образца наблюдается два участка монотонного накопления деформации (область I, область II). В низкотемпературной области I в температурном интервале 20 - 400 °C монотонному накоплению деформации величиной примерно 5 % соответствует акустическая эмиссия, характеризующаяся монотонным изменением среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии.

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

напряжения акустической эмиссии. Это может свидетельствовать, что в области II после 400 °С активизируется второй 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 (таблица 1).

При увеличении нагрузки в неизотермических циклах до 200 МПа характер деформации изменяется на монотонно-скачкообразный (рис.3).

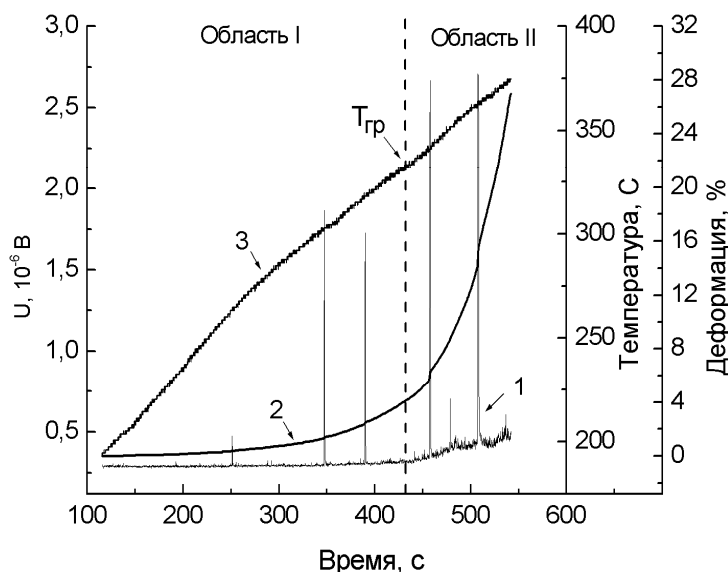


Рис. 3. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в сплава АМг6 при нагрузке 200 МПа в ходе неизотермического термомеханического цикла: 3 – температура в ходе нагрева. Области: I – низкотемпературная, II – высокотемпературная.

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 (Таблица 1). С ростом температуры процесс накопления деформации имеет периодический характер - монотонные участки чередуются с деформационными скачками, которые, в свою очередь, 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 значения механических напряжений около 190-200 МПа. Что может свидетельствовать об особом, структурно-упрочненном состоянии материала. Анализ деформационных скачков и акустической эмиссии при монотонно-скачкообразной деформации в неизотермических циклах показал (Таблица 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.

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	$0,11 \pm 0,29$	0,003	0,18
2	305	$0,90 \pm 0,28$	0,011	1,61
3	320	$0,83 \pm 0,21$	0,013	1,45
4	345	$4,21 \pm 0,32$	0,623	2,45
5	365	$7,41 \pm 0,30$	1,275	2,53

Рост амплитуды единичного сигнала акустической эмиссии свидетельствует о возрастании корреляции в системе элементарных деформационных актов в условиях сложного термомеханического нагружения (табл. 1) [4]. При этом доля деформационных скачков в общей монотонной деформации за цикл не существенна 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. 2, рис. 3), отличающиеся скоростью накопления деформации, следовательно, скоростью элементарных деформационных процессов.

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{01} \exp(v_1 t) + \varepsilon_{02} \exp(v_2 t),$$

где ε_{01} , ε_{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 среднее значение скорости деформации v_1 составляет $0,0031 \pm 0,0017 \text{ с}^{-1}$, тогда как для высокотемпературного $v_2 = 0,0129 \pm 0,0021 \text{ с}^{-1}$. Т.е. средняя скорость деформации в высокотемпературной области приблизительно в четыре раза выше средней скорости деформации в низкотемпературной области. В области II температурный интервал составляет приблизительно $100 \text{ }^\circ\text{C}$ для всех механических нагрузок

(Таблица 2). При этом граничная температурная точка ($T_{гр}$) (рис. 1, рис. 2) между областями I и II смещается в область низких температур с ростом механического напряжения в циклах.

Таблица 2

Значения параметров аппроксимации деформационной зависимости в условиях неизотермического нагружения для двух температурных интервалов.

Напря- жение в цикле, МПа	Температура, °С		Энергетический параметр J, $10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$		Параметры аппроксимации				R
	Область 1	Область 2	Область 1	Область 2	Область 1		Область 2		
					$\varepsilon_1, \%$	$v_1, \text{ с}^{-1}$	$\varepsilon_2, \%$	$v_2, \text{ с}^{-1}$	
40	210-450	450-560	5,51	12,26	0,028	0,004	0,0004	0,016	0,940
50	190-440	440-560	8,23	18,11	0,031	0,004	0,0004	0,019	0,973
60	220-450	450-540	7,97	16,89	0,017	0,003	0,0001	0,016	0,993
70	190-430	430-540	15,49	35,29	0,017	0,003	0,0001	0,016	0,993
80	190-460	460-540	11,34	30,24	0,059	0,002	0,0005	0,019	0,997
90	200-480	480-520	11,79	19,49	0,003	0,004	0,0002	0,014	0,994
100	210-460	460-520	11,51	26,43	0,01	0,009	0,00006	0,013	0,998
110	120-460	460-510	16,89	43,13	1,12	0,007	0,00003	0,016	0,996
120	120-390	390-500	16,56	29,59	0,37	0,003	0,00081	0,019	0,998
130	130-370	370-470	13,15	36,17	0,15	0,003	0,0004	0,015	0,998
140	80-330	330-430	13,89	43,10	0,02	0,005	0,0024	0,015	0,999
150	200-350	350-470	9,84	37,14	0,08	0,002	0,00163	0,021	0,995
160	180-350	350-440	11,32	29,01	0,04	0,002	0,00006	0,017	0,996
170	170-300	300-420	6,93	40,73	0,06	0,002	0,00002	0,016	0,996
180	150-300	300-420	7,64	40,66	0,05	0,006	0,00005	0,019	0,997
190	170-240	240-410	4,52	58,02	0,24	0,007	0,00038	0,024	0,995
200	190-260	260-380	3,15	51,64	1,45	0,001	0,0010	0,019	0,998

Обсуждение результатов

Процесс накопления деформации в алюминиево-магниево-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 низкой скорости накопления деформации ($v_1=0,0031 \text{ с}^{-1}$) соответствует низкоамплитудная монотонная акустическая эмиссия, свидетельствующая о низкой корреляции элементарных деформационных актов [5]. Малоамплитудная акустическая эмиссия соответствует малым степеням деформации образца в пределах [2, 3]. 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 (в образце) корреляции деформационных актов.

Из данных рис. 2, 3 и таблицы 2 следует, что вблизи переходной температуры (между областями I и II) около T_{sp} стопоры (частицы фазы AlMg) растворяются и концентраторы напряжений исчезают. По-видимому, при более однородном упругом поле напряжений работает система элементарных деформационных актов, слабо коррелированная в объеме деформации. Рост механического напряжения в циклах приводит к уменьшению потенциального барьера концентраторов напряжений, и как следствие к смещению T_{sp} в область низких температур.

Кроме того, в условиях высоких механических нагрузок (190-200 МПа) в областях I, II формируются единичные деформационные скачки различной амплитуды в температурном интервале 265-365 °С, которые соответствуют высокоамплитудным сигналам акустической эмиссии (рис.3, таблица 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 [1-3]. Очевидно, монотонное накопление деформации обусловлено слабой корреляцией в формирующейся системе деформационных полос. В то же время деформационные скачки свидетельствуют о высокой корреляции и локализации деформационных 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 алюминиево-магниевого сплава проявляется в двух температурных интервалах, характеризующиеся 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации проекта № 288.

Список литературы

1. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ. —1993. — Т. 75, №5, — С. 31-35.
2. Криштал М.М. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминивно-магниевого сплава / М.М. Криштал, Д.Л. Мерсон // ФММ. —1996. — Т. 81, № 1, — С. 156-162.
3. Криштал М.М. Влияние геометрических параметров образца на механические свойства и акустическую эмиссию при прерывистой текучести в Al-Mg сплавах/ М.М. Криштал, Д.Л. Мерсон // ФММ. —1991. — Т.72, № 10. — С. 187-193.
4. Макаров С.В. Акустическая эмиссия и проявление неустойчивости кристаллической решетки алюминия при высокотемпературной деформации / С.В. Макаров, В.А. Плотников, А.И. Потехаев // Изв. Вузов. Физика. — 2011. —№ 3. — С. 43-54.
5. Макаров С.В. Высокотемпературная пластическая деформация и акустическая эмиссия алюминия в слабоустойчивом состоянии / С.В. Макаров, В.А. Плотников, А.И. Потехаев // Изв. Вузов. Физика. — 2013. —Т.56, № 6. — С. 23-30.

Рецензенты:

Тарасов С.Ю., д.т.н., ведущий научный сотрудник ИФПМ СО РАН, г.Томск;

Сизова О.В., д.т.н., главный научный сотрудник ИФПМ СО РАН, г.Томск.