

Накопление деформации в алюминиево-магниевом сплаве в условиях деформационного структурного перехода

С.В. Макаров, М.В. Лысиков

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Strain Accumulation in an Aluminum-Magnesium Alloy under Structural Transition

S.V. Makarov, M.V. Lysikov

Altai State University (Barnaul, Russia)

Проведены исследования накопления деформации и акустической эмиссии в образце алюминиево-магниевого сплава, при нагружении в интервале температур от комнатной температуры и до 500°C. Накопление деформации в образце представлено как двухстадийный процесс: низкотемпературный процесс (область I), контролируемый дислокационным переползанием и высокотемпературный процесс (область II), контролируемый зернограничным проскальзыванием. Переход от низкотемпературной к высокотемпературной области деформации характеризуется граничной температурой $T_{гр}$, при которой и происходит деформационный структурный переход. В высокотемпературной области параметр акустической эмиссии $J_{область II}$ растет с увеличением механической нагрузки в цикле, что свидетельствует о повышении концентрации колебательной энергии в деформированной части образца, способствуя активации деформационных процессов. Также показано, что температурная точка структурного перехода смещается в область низких температур с возрастанием нагрузки в термоциклах, указывая на обратно пропорциональную зависимость температуры от механического напряжения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, накопление, текучесть, пластическая деформация, деформационный структурный переход.

DOI 10.14258/izvasu(2017)1-03

Введение. Эффект прерывистой текучести есть характерный отклик алюминиево-магневых сплавов на механическое нагружение, являющийся следствием эффекта Портевена — Ле Шателье [1], реализующийся на микроструктурном уровне в виде формирования деформационных полос, которые представляют собой области локализации пластической деформации [2]. Прерывистая текучесть

The conducted research demonstrates the accumulation of strain and acoustic emission in an aluminum-magnesium alloy sample under loading within the temperature range from room temperature to 500°C. Strain accumulation is presented as a two-step process with a low-temperature dislocation creep step (region I) and a high-temperature grain boundary sliding step (region II). The transition from low-temperature strain region to high-temperature strain region is described by the value of boundary temperature when deformation and structural transition occur. For the high-temperature region, the acoustic emission parameter $J_{region II}$ increases as the mechanical loading in the cycle increases. It indicates the increase of vibrational energy concentration in the strained part of the sample that contributes to activation of strain processes. It is also shown that the temperature point of structural transition shifts to low-temperature area due to loading increase in cycles, indicating the inverse relationship of temperature and mechanical stress.

Key words: acoustic emission, accumulation, the fluidity, plastic deformation, structural transition deformation.

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 из сплава АМг6 обнаружено два типа полос деформации: пространственно неорганизованные поло-

сы и пространственно организованные. Каждый акт прерывистой текучести связан с появлением одной полосы деформации. Прерывистая текучесть сопровождается импульсами акустической эмиссии, коррелирующими с появлением полос деформации, то есть каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [3]. Проявление закономерностей прерывистой текучести и акустической эмиссии есть следствие волновой природы деформации в алюминий-магние-вых сплавах, волна деформации, распространяясь от концентратора напряжений, стимулирует образование полос деформации и акустическую эмиссию [4]. Другим проявлением прерывистой текучести является прерывистая ползучесть (или эффект Савара-Массона), проявляющаяся в сплавах на кривых ползучести в виде последовательности скачков деформации величиной до $1 \mu\text{m}$ [5]. Прерывистая ползучесть при комнатной температуре развивается как спонтанная, потеря механической устойчивости происходит путем зарождения и распространения по поверхности образца полос макролокализации деформации, сопровождающейся формированием деформационного скачка.

Структурно локализацию деформации можно представить как последовательное зарождение и рост деформационных полос и деформационный скачок, представляющий собой пространственную и временную организацию, характеризующую пластическую неустойчивость нагруженного материала [5]. Эстафетная передача деформации от одной полосы к другой является главным структурным признаком прерывистой текучести, распространяющейся по образцу в виде области локализации деформации [6]. Характерным является осциллирующий вид силового отклика системы машина — образец в ответ на скачкообразный прирост деформации нагруженного образца величиной 1–4%. Анализ области локализации деформации свидетельствует, что она представляет собой пространственно-временную структуру. Рост одной полосы сопровождается одной силовой осцилляцией, продолжительностью 1–3 мс, осциллирующий силовой отклик является отображением пространственно-временной структуры деформационных полос, спонтанное зарождение которых создает макроскопический скачкообразный прирост деформации [5, 6].

Спектральный и динамический анализ прерывистой текучести обнаруживает наличие дальнедействующих долговременных корреляций в деформируемом материале [7]. Природа пространственной и временной корреляции согласно [5] связана с каскадным механизмом размножения деформационных полос. Однако фактором корреляции выступает локализованное на фронте границы деформацион-

ной полосы напряжения, а также дальнедействующие напряжения изгиба. На основе спектрального и динамического анализа утверждается, что фликер-шумовая структура и монофрактальность силового отклика свидетельствуют о состоянии самоорганизующейся критичности деформируемого материала.

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-магниевый сплав AMg6. Из пластины сплава вырезали образцы в виде стержней длиной 300 мм, в которых были сформированы области локализации деформации диаметром 4 мм и длиной 30 мм. Образцы предварительно отжигали при температуре 500°C в течение 1 часа и охлаждали с печью. Исследование проводили с помощью установки, схематичное описание которой приведено на рисунке 1. В цикле нагрев — охлаждение в температурном интервале $25\text{--}500^\circ\text{C}$ нагрузка образца постоянна (образец нагружали сдвиговым напряжением и измеряли сдвиговую деформацию). В экспериментах анализировали и интегральный энергетический параметр акустической эмиссии $J = \sum U^2 \Delta t_i$, пропорциональный энергии акустической эмиссии, где Δt_i — шаг разбиения временного интервала процесса.

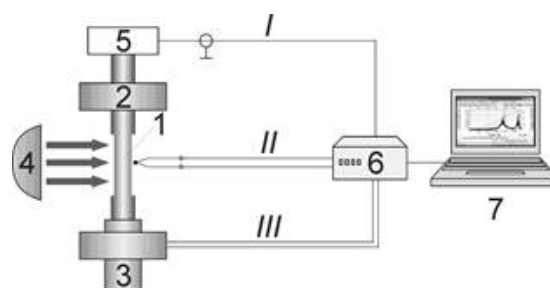


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — образец в виде стержня, 2 — неподвижный захват установки, 3 — подвижный захват установки с устройством нагружения и измерения деформации, 4 — нагревательный элемент, 5 — пьезопреобразователь, 6 — АЦП, 7 — компьютер, символы I — акустический канал, II — термопара, III — канал измерения деформации

Экспериментальные результаты. Как показано на рисунке 2, накопление деформации при монотонном нагреве до 500°C и действии нагрузки 100 МПа осуществляется двояким образом: до критической температуры монотонным путем, а затем — квазискачкообразным.

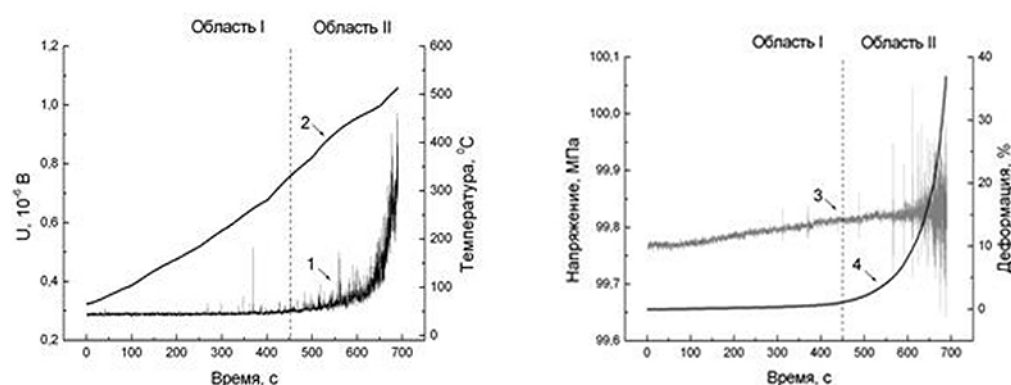


Рис. 2. Акустическая эмиссия (1), температура (2), накопление деформации (3), механическое напряжение (4) при нагрузке 100 МПа и нагреве образца

Такой характер накопления деформации сопровождается монотонным нарастанием среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии и осциллирующим механическим напряжением при переходе к квазискачкообразной области II. При достижении некоторой деформации (критической температуры перехода от области I к области II) механическое напряжение начинает осциллировать, причем по мере повышения температуры амплитуда осцилляций растет, переход к осцилляции механического напряжения

может свидетельствовать о существенном изменении микромеханизма накопления деформации, а увеличение амплитуды акустических импульсов по мере повышения температуры характеризует увеличение колебательной энергии акустической эмиссии в объеме деформируемого материала.

Анализ экспериментальных результатов. Для всего диапазона напряжений в таблице 1 приведены данные по температурным интервалам областей I и II и накопленной за цикл деформации.

Таблица 1
Накопление деформации в ходе термомеханического нагружения алюминивно-магниевого сплава

Нагрузка, МПа	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \%$	$\varepsilon_{\text{область I}}, \%$	$\varepsilon_{\text{область II}}, \%$
40	40 - 354	354 - 501	0,95	0,01	0,94
60	40 - 379	379 - 501	1,39	0,22	1,17
80	40 - 412	412 - 501	39,44	4,50	34,94
100	60 - 430	430 - 511	36,90	3,92	32,98
120	50 - 441	441 - 503	36,61	6,62	29,99
140	50 - 375	375 - 464	33,94	4,47	29,47

Как следует из данных таблицы 1, существенный прирост деформации наблюдается лишь в циклах при механическом напряжении не ниже 80 МПа (здесь 80 МПа есть сдвиговой предел текучести сплава при комнатной температуре). В области I величина накопленной деформации мала, основной

вклад в накопление деформации осуществлен в области II.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{01} \exp(v_1 t) + \varepsilon_{02} \exp(v_2 t). \quad (1)$$

Здесь параметры $\varepsilon_0, \varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$ — деформационные константы, а параметры v_1 и v_2 — скорости накопления деформации в области I и области II соответственно.

Таблица 2
Значения параметров аппроксимации деформационной зависимости в условиях неизотермического нагружения для двух температурных интервалов

Нагрузка, МПа	Тгр, °C	Энергетический параметр J, 10 ⁻¹² В ² ·с		Параметры аппроксимации					
		Область I	Область II	Область I			Область II		
				A	$\alpha, 1/\text{с}$	R ²	A	$\alpha, 1/\text{с}$	R ²
40	354	8,19±0,003	10,24±0,003	(9±1)·10 ⁻³	(1±0,29)·10 ⁻³	0,954	(0,2±0,01)·10 ⁻³	(10±0,098)·10 ⁻³	0,967
60	379	8,12±0,003	26,87±0,003	(9±1)·10 ⁻³	(1±0,014)·10 ⁻³	0,942	(0,2±0,01)·10 ⁻³	(12±0,072)·10 ⁻³	0,969
80	412	8,05±0,003	49,04±0,003	(14±1)·10 ⁻³	(2±0,05)·10 ⁻³	0,967	(0,3±0,01)·10 ⁻³	(19±0,094)·10 ⁻³	0,974

Нагрузка, МПа	Тгр, °С	Энергетический параметр $J, 10^{-12} В^2 \cdot с$		Параметры аппроксимации					
		Область I	Область II	Область I			Область II		
				A	$\alpha, 1/c$	R^2	A	$\alpha, 1/c$	R^2
100	430	$8,26 \pm 0,003$	$61,35 \pm 0,003$	$(17 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 0,013) \cdot 10^{-3}$	0,978	$(0,4 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(19 \pm 0,087) \cdot 10^{-3}$	0,991
120	441	$8,01 \pm 0,003$	$70,62 \pm 0,003$	$(16 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$	0,981	$(0,3 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(18 \pm 0,062) \cdot 10^{-3}$	0,986
140	421	$7,77 \pm 0,003$	$112,83 \pm 0,003$	$(16 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 0,036) \cdot 10^{-3}$	0,963	$(0,4 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(20 \pm 0,073) \cdot 10^{-3}$	0,989

Из данных таблицы 2 следует, что граничная температура перехода зависит от механического напряжения как функция с максимумом, как показано на рисунке 3.

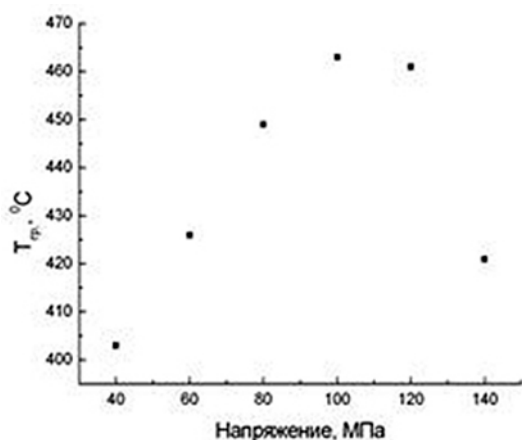


Рис. 3. Зависимость граничной температуры деформационного структурного перехода от механического напряжения в циклах

Обсуждение. Совокупность полученных данных по осцилляциям механического напряжения в области II, граничным температурно-силовым параметрам процесса, изменение скорости накопления деформации при переходе из области I в область II, увеличение колебательной энергии акустической эмиссии в области II свидетельствуют о деформационном структурном переходе в ходе термомеханического нагружения материала. Как было показано ранее [8, 9], двоякий характер накопления деформации обусловлен деформационным структурным переходом кристаллической среды образца, находящегося в условиях термомеханического нагружения. Деформационный структурный переход представляет собой переход от накопления деформации, контролируемой термически активируемым переползанием дислокаций [10], к накоплению деформации, контролируемой зернограничными процессами производства полных (решеточных) дислокаций на тройных зернограничных стыках [11], и происходит при достижении механическим напряжением, температурой и энергией акустической эмиссии некоторых критических значений. Деформационный структурный переход есть результат совместного действия тепловых флукту-

аций, статических смещений поля напряжений и динамических смещений поля стоячих акустических волн, сформированных первичными сигналами акустической эмиссии на естественных резонаторах деформируемого образца. Макроскопическим проявлением деформационного структурного перехода является величина накапливаемой деформации и, главное, скорости накопления деформации в разных структурных состояниях, поэтому накопление деформации в высокотемпературной области было определено как квазискачкообразное. Сопоставляя накопление деформации в высокотемпературной области и осциллирующий характер напряжения, можем утверждать, что термин «квазискачкообразный» действительно отображает реальный скачкообразный процесс накопления деформации. Как известно, в публикациях [3, 4], ставших классическими, процесс деформирования структурно неоднородных материалов сопровождается скачками напряжений (зубцы напряжения), обусловленные релаксацией напряжений при преодолении (прорыве) стопоров дислокационными скоплениями. Структурно релаксация напряжений проявляется в формировании деформационных полос. Каждый релаксационный акт сопровождается появлением одной деформационной полосы [4].

Анализ области локализации деформации свидетельствует, что она представляет собой пространственно-временную структуру, эстафетно передающую деформацию от одной полосы к другой, осциллирующий силовой отклик является отображением пространственно-временной структуры деформационных полос, спонтанное зарождение которых создает макроскопический скачкообразный прирост деформации [5, 6]. Природа пространственной и временной корреляции согласно [7] связана каскадным механизмом размножения деформационных полос, фактором корреляции выступает локализованное на фронте границы деформационной полосы напряжение, а также дальнедействующие напряжения изгиба. Осциллирующий вид силового отклика свидетельствует о макроскопической корреляции элементарных деформационных актах, однако фактором корреляции выступают не только механические напряжения, но и тепловые флуктуации и акустическая эмиссия, колебательная энергия которой накапливается в объеме деформируемого материала в виде

акустических стоячих волн. Накопление деформации в области II после деформационного структурного перехода представляет собой квазипериодический процесс скачкообразной деформации, сопровождаемый снижением и восстановлением приложенного механического напряжения, управляемого одновременным действием тепловых флуктуаций, механических напряжений и акустической эмиссией, формирующей акустические стоячие волны в области локализации деформации. Периодичность процесса обусловлена протекающими с высокой скоростью при температурах выше критической процессами упрочнения-разупрочнения структуры деформируемого материала.

Заключение. Анализ осциллирующего характера силового отклика после деформационного струк-

турного перехода, то есть при достижении температурно-силовых параметров и колебательной энергии акустической эмиссии критических значений, свидетельствует о скачкообразном процессе накопления деформации в высокотемпературной области. Периодичность (квазипериодичность) процесса накопления обусловлена быстрыми процессами упрочнения-разупрочнения структуры деформируемого материала. Эффект корреляции элементарных деформационных актов (зарождение и расширение деформационных полос) связан с совместным действием тепловых флуктуаций, статических смещений поля механических напряжений и динамических смещений стоячих акустических волн в объеме деформируемого материала.

Библиографический список

1. Portevin A., Le Chatelier F. Effect of geometrical stress concentrators on the band formation and the serrated deformation in aluminum-magnesium alloys // Acad Sci Paris. — 1923. — Vol. 176.
2. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ. — 1993. — Т. 75, № 5.
3. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминивно-магниевых 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., Гасанов М.Ф., Денисов А.А. Макролокализация пластической деформации при прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6 // ЖТФ. — 2014. — Т. 84, № 4.
6. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Гасанов М.Ф. Прерывистая ползучесть и пространственно-временные структуры макролокализованной пластической деформации // ФТТ. — 2014. — Т. 58, № 5.
7. 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-магниевого сплава // ФТТ. — 2014. — Т. 58, № 5.
8. Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В. Деформационный структурный переход и акустическая эмиссия в алюминивно-магниевых сплавах в условиях термомеханического нагружения // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2016. — № 3.
9. Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.Ю., Колубаев Е.А. Накопление деформации и акустическая эмиссия в алюминивно-магниевом образце, полученном сваркой трением с перемешиванием // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2016. — № 1. DOI:10.14258/izvasu(2016)1-05
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.