

Накопление деформации и акустическая эмиссия в алюминиево-магниевом образце, полученном сваркой трением с перемешиванием*

С.В. Макаров¹, В.А. Плотников^{1,2}, М.В. Лысиков¹, Е.А. Колубаев²

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

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

Accumulated Strain and Acoustic Emission in Aluminum-Magnesium Sample Obtained by Friction Stir Welding

S.V. Makarov¹, V.A. Plotnikov^{1,2}, M.V. Lysikov¹, E.A. Kolubaev²

¹ Altai State University (Barnaul, Russia)

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

Проведены исследования накопления деформации и акустической эмиссии в образце алюминиево-магниевого сплава со сварным швом, полученным сваркой трением с перемешиванием, при нагружении в интервале температур от комнатной до 500 °С.

Накопление деформации в образце со сварной зоной представлен как двухстадийный процесс: низкотемпературный (область I), контролируемый дислокационным переползанием, и высокотемпературный (область II), контролируемый зернограницным проскальзыванием. Переход от низкотемпературной области к высокотемпературной характеризуется граничной температурой $T_{гр}$, при которой происходит деформационный структурный переход. В высокотемпературной области энергетический параметр $J_{область II}$ растет с увеличением механической нагрузки в цикле, что свидетельствует о повышении концентрации колебательной энергии в деформированной части образца, способствуя активации деформационных процессов.

Показано, что температурная точка деформационного структурного перехода смещается в область низких температур с возрастанием нагрузки в циклах, указывая на обратно пропорциональную зависимость температуры от напряжения.

Пластический ресурс образца со сварной зоной при циклическом термомеханическом нагружении почти в семь раз ниже ресурса образца, вырезанного из листового проката сплава АМг6.

The paper deals with accumulation of strain and acoustic emission in a welded sample of aluminum-magnesium alloy obtained by friction stir welding under loading at temperatures in the range from room temperature to 500 °C.

The accumulation of strain in a welded sample is demonstrated as a two-step process: a low-temperature (Area I) step controlled by dislocation climb, and a high-temperature (Area II) step controlled by grain boundary sliding. Transition from low-temperature area to high-temperature area is characterized by the boundary temperature T_l at which structural transition occurs. In the high-temperature area the energy parameter $J_{Region II}$ grows with increase of mechanical loading in the cycle. This fact indicates an increase of vibrational energy concentration in a deformed part of the sample that contributes to the activation of deformation processes.

It is shown that the temperature of the structural transition point is shifted to lower temperatures with increase of loading in cycles, complying to inversely proportional dependence of the temperature from the voltage.

Plastic resource of the welded sample under cyclic thermomechanical loading is almost seven times lower than the plastic resource of a sample cut from metal alloy АМg6 flat-rolled product.

* 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».

Ключевые слова: акустическая эмиссия, алюминий-магний-магний сплав, сварной шов, сварка трением с перемешиванием, пластическая деформация.

Key words: acoustic emission, aluminum-magnesium alloy, a weld, friction stir welding, plastic deformation.

DOI 10.14258/izvasu(2016)1-05

Введение. Алюминиевые сплавы являются основой для изготовления сложных технологических изделий, которые должны эксплуатироваться в условиях знакопеременных термомеханических нагрузок. Особой зоной в таких изделиях являются места соединения материалов, структурное состояние которых характеризуется повышенной плотностью внутренних дефектов и, как следствие, изменением физико-механических свойств, что уменьшает эксплуатационный ресурс всего изделия [1].

В свою очередь, при деформировании алюминий-магний-магний сплавов в широком интервале температур накопление деформации, сопровождаемой акустической эмиссией [2], представляет собой двоякий монотонный и скачкообразный процессы. Известно, что деформационные скачки, которые называют эффектом прерывистой текучести при механическом нагружении алюминий-магний-магний сплавов, представляют собой процесс формирования полос деформации, являющиеся областями локализации пластической деформации [3]. 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 [4]. Наблюдаются два типа полос деформации: пространственно неорганизованные полосы и пространственно организованные. Каждый акт прерывистой текучести связан с появлением одной полосы деформации [5].

Эксперименты по деформированию моно- и поликристаллов алюминия и других металлов и сплавов в интервале температур также 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, ког-

да на этой зависимости наблюдаются макроскопические деформационные скачки [6]. 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 [2, 6].

Целью работы является исследование пластических свойств алюминий-магний-магний образцов со сварным швом при нагружении в интервале температур от комнатной до температуры плавления.

Методика экспериментов. В работе исследовалось сварное соединение двух пластин, полученное по технологии сварки трением с перемешиванием, из термически неупрочняемого деформированного алюминий-магний-магний сплава АМг5. Образец вырезали из сваренных пластин в форме квадратной балки размером 5×5×150 мм, в которой была сформирована область локализации деформации диаметром 4 мм и длиной 40 мм, при этом сварной шов находился в центральной части проточки (рис. 1).

Механическое нагружение, измерение деформации, температуры и среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии проводили с помощью аналого-цифрового преобразователя, соединенного с датчиками и компьютером. Образец нагружали сдвиговым напряжением при постоянной нагрузке в циклах и измеряли сдвиговую деформацию. В ходе нагружения осуществляли нагрев образца с постоянной скоростью от 25°С 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 Δt_i — шаг разбиения временного интервала процесса.

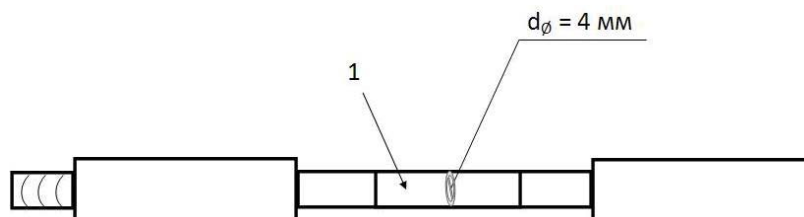


Рис. 1. Образец сплава АМг5. Зона сварного шва (1) расположена в центральной части области локализации деформации. 1 — область сварного шва

Экспериментальные результаты. Первый неизотермический термомеханический цикл был проведен при нагрузке 40 МПа (рис. 2), что соответствует половине предела текучести сплава АМг5. Экспериментальные данные по накоплению деформации и акустической эмиссии при нагреве от комнатной температуры до 500°C приведены на рисунке 2. Зависимость накопленной деформации от времени процесса носит нелинейный, монотонный характер, полная деформация за цикл составила 7,2%. В низкотемпературной области, примерно до 400°C, прирост деформации равен 2,2%, в то время как в высокотемпературной области накопление деформации — 5,0%.

Монотонному накоплению деформации соответствует монотонный рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии до 0,39 мкВ, с формированием акустического максимума величиной 0,35 мкВ при температуре около 350°C, связанного с релаксационными процессами — диффузии атомов магния в решетке алюминия.

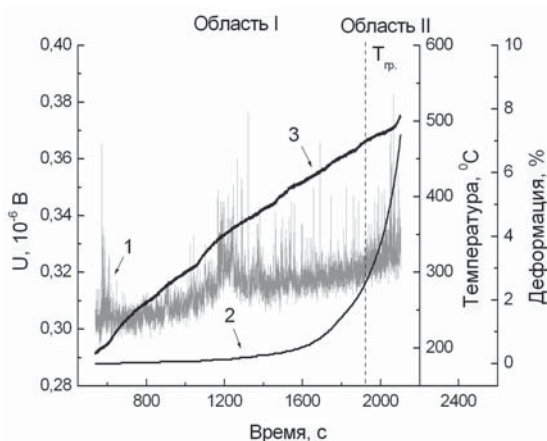


Рис. 2. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в образце сплава АМг5 со сварным швом при нагрузке 40 МПа в неизотермическом цикле: 3 — температура в ходе нагрева. Области: I — низкотемпературная, II — высокотемпературная

Накопление деформации во втором цикле при напряжении 50 МПа (рис. 3) протекает, как и в первом цикле, монотонно в двух температурных интервалах.

Если в низкотемпературной области I (25–400°C) прирост деформации составил 8,7%, то в высокотемпературной области II (400–440°C) накопленная деформация достигает 25%. В цикле при нагрузке 50 МПа скорость накопления деформации как в области I, так и в области II возрастает по сравнению с первым циклом (40 МПа). Такой характер накопления деформации можно определить как квазискачкообразный глобальный [2].

В условиях низких температур монотонному накоплению деформации соответствует монотонный

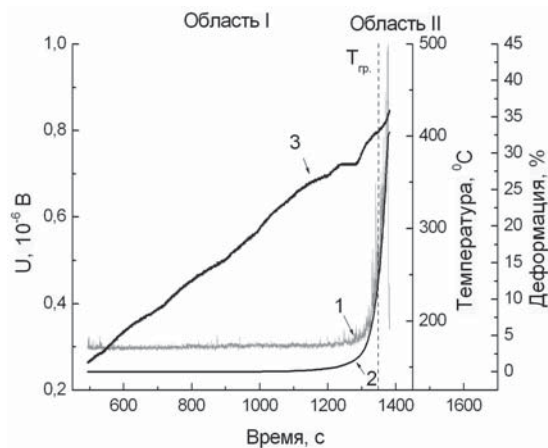


Рис. 3. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в образце сплава АМг5 со сварным швом при нагрузке 50 МПа в неизотермическом цикле: 3 — температура в ходе нагрева. Области: I — низкотемпературная, II — высокотемпературная

рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии от уровня шума 0,3 до 0,35 мкВ. При высоких температурах активному (квазискачкообразному) накоплению деформации соответствуют высокоамплитудные импульсы акустической эмиссии.

При механическом напряжении 60 МПа (третий цикл) (рис. 4) активное накопление деформации началось в области высоких температур, при этом скорость деформации на высокотемпературном участке существенно выше скорости деформации в том же температурном интервале во втором цикле (50 МПа).

Активному накоплению деформации соответствует быстрый рост среднеквадратичного напря-

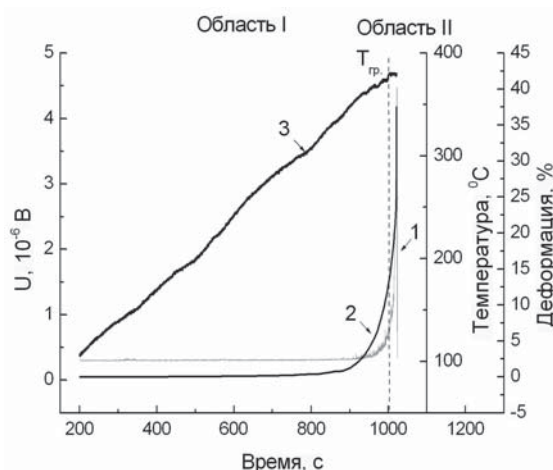


Рис. 4. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в образце сплава АМг5 со сварным швом при нагрузке 60 МПа в неизотермическом цикле: 3 — температура в ходе нагрева. Области: I — низкотемпературная, II — высокотемпературная

жения акустической эмиссии и формирование высокоамплитудного сигнала акустической эмиссии. При температуре в цикле, равной 380°C, происходит разрушение образца. Максимальные значения среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии и накопленной деформации в цикле равны 4,1 мкВ и 37% соответственно.

Обсуждение результатов. Нелинейный характер накопления деформации (рис. 2–4, зависимость 2) от температуры в алюминиево-магниевом образце со сварной зоной может свидетельствовать, по аналогии с деформированием монолитных алюминиево-магниевых образцов [2], о различных механизмах, ответственных за накопление деформации в интервалах низких (область I) и высоких (область II) температур.

Исходя из различия природы физических механизмов, ответственных за накопление деформации на двух температурных интервалах, был проведен анализ деформационной зависимости с помощью двойной экспоненциальной функции вида [2]:

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

где ε_{01} , ε_{02} — начальные деформации, v_1 , v_2 — скорости деформации на двух температурных интервалах (области I и II). Данные аппроксимации зависимости деформации от времени в неизотермических циклах при разных механических нагрузках приведены в таблице 1. Для двух температурных интервалов (области I — высокотемпературная, область II — низкотемпературная) найдены коэффициенты скорости деформации v_1 и v_2 .

Для низкотемпературного интервала (область I) среднее значение коэффициента скорости деформации v_1 , для всех циклов нагружения составляет $v_1 = (3,00 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$, в то время как для высокотемпературного (область II) — $v_2 = (20,70 \pm 0,04) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. Среднее значение коэффициента — скорость деформации — в высокотемпературной области II приблизительно в шесть раз выше средней скорости дефор-

мации в низкотемпературной области I. Существенное увеличение коэффициента в показателе экспоненты (в области II), имеющем размерность скорости накопления деформации на высокотемпературном интервале, может свидетельствовать о повышении роли границ зерен в корреляционных эффектах в системе элементарных деформационных актов.

В таблице 2 приведены значения накопленной деформации и энергетического параметра акустической эмиссии J для двух температурных интервалов. Интегральный параметр акустической эмиссии J пропорционален энергии акустической эмиссии и характеризует активность элементарных деформационных процессов, ответственных за формирование акустических сигналов. Характерно, что в низкотемпературной области для всех циклов значение энергетического параметра $J_{\text{область I}}$ находится в интервале $20\text{--}30 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$, а в высокотемпературной области $J_{\text{область II}}$ — растет с увеличением механической нагрузки в цикле. Значительный рост $J_{\text{область II}}$ от номера цикла может свидетельствовать о повышении концентрации колебательной энергии в деформированной части образца, что способствует активации зернограничных процессов.

Общая деформация образца со сварным швом за три неизотермических цикла (при нагрузках 40, 50, 60 МПа) до разрушения составила 79%, что значительно ниже деформационного ресурса (535% — полная деформация до разрушения) образца, изготовленного из листового сплава АМг6 [2].

По-видимому, область сварного шва, полученная сваркой трением с перемешиванием, может характеризоваться неоднородным строением и высокой плотностью различных дефектов, значительно снижающих деформационный ресурс материала. Можно считать, что в последнем цикле при механическом напряжении 60 МПа с ростом температуры возросла корреляция в системе элементарных деформационных актов, что привело к формированию глобального макро-

Таблица 1
Значения параметров аппроксимации деформационной зависимости в условиях неизотермического нагружения для двух температурных интервалов

Нагрузка, МПа	Температура, °С		Параметр J, $10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$		Параметры аппроксимации					
	область I	область II	область I	область II	область I			область II		
					$\varepsilon_{01} \cdot 10^{-3}$	$\alpha_1, \text{ c}^{-1}$	R_1^2	$\varepsilon_{02} \cdot 10^{-3}$	$\alpha_2, \text{ c}^{-1}$	R_2^2
40	190–470	470–510	26,60±0,003	100,32±0,003	(18±1)	$(2 \pm 0,016) \cdot 10^{-3}$	0,999	(0,3±0,01)	$(15 \pm 0,019) \cdot 10^{-3}$	0,931
50	150–400	400–440	19,93±0,003	128,65±0,003	(26±1)	$(4 \pm 0,023) \cdot 10^{-3}$	0,973	(0,4±0,01)	$(20 \pm 0,034) \cdot 10^{-3}$	0,974
60	110–370	370–380	27,03±0,004	196,78±0,004	(14±1)	$(3 \pm 0,021) \cdot 10^{-3}$	0,974	(0,2±0,02)	$(27 \pm 0,052) \cdot 10^{-3}$	0,963

Таблица 2

Энергетический параметр акустической эмиссии и накопление деформации на двух температурных интервалах

Нагрузка, МПа	$J_{\text{общ.}}$, $10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$	$J_{\text{область I}}$, $10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$	$J_{\text{область II}}$, $10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$	ΔT_1 , °C	$T_{\text{гр.}}$, °C	ΔT_2 , °C	ϵ , %	$\epsilon_{\text{область I}}$, %	$\epsilon_{\text{область II}}$, %
40	126,32±0,003	26,58±0,003	100,32±0,003	192–467	467	467–512	7,2	2,2	5,0
50	148,58±0,003	19,93±0,003	128,65±0,003	155–403	403	403–438	33,2	8,7	24,5
60	223,81±0,004	27,03±0,004	196,78±0,004	105–373	373	373–381	26,6	1,4	25,2

скачка и разрушению материала. Процесс активной пластической деформации вплоть до разрушения материала рассматривается как процесс глобальной самоорганизации [7].

Изменение граничной температуры в серии циклов. Деформационный структурный переход. Температурная точка перехода от низкотемпературной области I к высокотемпературной области II определяет смену механизма накопления деформации от дислокационного скольжения к зернограничному проскальзыванию и может характеризоваться как температура структурного перехода ($T_{\text{гр.}}$) (табл. 2) [8].

Проведем анализ изменения граничной температуры $T_{\text{гр.}}$ (температуры структурного перехода) от механического напряжения в циклах. Из таблицы 2 следует, что значения граничной температуры снижаются с возрастанием механической нагрузки в цикле (рис. 5).

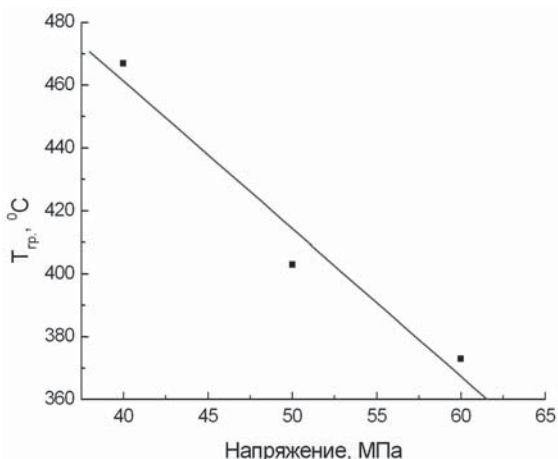


Рис. 5. Снижение граничной температуры с увеличением напряжения в цикле

В качестве аппроксимирующей зависимости была выбрана линейная функция, параметры которой приведены в таблице 3. Анализ приведенных в таблице данных свидетельствует об особых состояниях сплава в условиях термического и механического нагружения. В условиях, когда материал находится в слабонагруженном состоянии ($\sigma \sim 0$), граничная температура близка к температуре плавления алюминиево-магниевого сплава и составляет $T_{\text{гр.}} = 640^\circ\text{C}$.

Это может свидетельствовать о том, что высокотемпературный интервал, в котором активная роль в генерации дислокаций принадлежит границам зерен, отсутствует. Зернограничный механизм деформации будет превалировать в процессе пластической деформации от комнатной температуры, если внешняя нагрузка в цикле составит около 140 МПа.

Заключение. Исследования пластического ресурса алюминиево-магниевых образцов со сварной зоной проводили в условиях термомеханических циклов, когда нагрузка постоянна, а температура меняется от комнатной до 500°C .

На деформационной зависимости выделены два температурных интервала монотонного накопления деформации: низкотемпературный и высокотемпературный (квазискачкообразный), для которых значения коэффициентов в показателе экспоненты (скорости накопления деформации), соответственно, равны $v_1 = (3,00 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $v_2 = (20,70 \pm 0,04) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Накопление деформации в области I контролируется дислокационными процессами, в области II — зернограничными. Смена механизма пластической деформации происходит при критической температуре $T_{\text{гр.}}$, которую можно определить как температуру деформационного структурного перехода.

Показано, что пластический ресурс образца со сварной зоной, при циклическом термомехани-

Таблица 3

Значения параметров аппроксимирующей функции $T = T_0 + b\sigma$ для линейной зависимости (рис. 5)

Интервал напряжений, МПа	Параметр T_0 , °C	Параметр b , °C/МПа	Коэффициент корреляции, r
40 – 60	649 ± 50	$-4,7 \pm 1,0$	0,979

ческом нагружении, почти в семь раз ниже ресурса образца, вырезанного из листового проката сплава АМг6. По-видимому, такое деформационное поведе-

ние материала со сварным швом определяется высокой плотностью различных дефектов, образующихся в процессе сварки трением с перемешиванием.

Библиографический список

1. Поляков В.В., Егоров А.В., Салита Д.С., Колубаев Е.А. Физические методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2015. — № 1/1 (85).
2. Plotnikov V.A., Makarov S.V., Lysikov M.V., Kolubaev E.A. Acoustic emission and effect of stepwise deformation in aluminum-magnesium alloy // Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures AIP Conf. Proc. — 2015. — 1683, 020138–1–020138–5.
3. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ. — 1993. — Т. 75, № 5.
4. Кришталл М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть I. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7, № 1.
5. Криштал М.М., Меерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминиево-магниевых сплавов // ФММ. — 1996. — Т. 81, № 1.
6. Макаров С.В., Плотников В.А., Потехаев А.И. Высокотемпературная пластическая деформация и акустическая эмиссия алюминия в слабоустойчивом состоянии // Известия вузов. Физика. — 2013. — Т. 56, № 6.
7. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А. Деформационный хаос и самоорганизация на стадии предразрушения сплава // ФТТ. — 2011. — Т. 53, вып. 10.
8. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах / Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С. — М., 1986.