

Скачкообразная деформация и импульсная акустическая эмиссия при нагружении алюминиево-магниевых сплавов*

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

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

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

Jump-like Deformation and Impulsed Acoustic Emission under Aluminum-Magnesium Alloys Loading

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

¹ Altai State University (Barnaul, Russia)

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

Проведены исследования деформационного поведения алюминиево-магниевых сплавов в условиях циклического термомеханического нагружения. В каждом цикле температура фиксировалась, а нагрузка линейно увеличивалась до максимального значения. Экспериментальная база данных формировалась по трем каналам: акустический — среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (мкВ); деформационный — величина деформации (%); механического напряжения — величина напряжения в (МПа). Алюминиево-магниевый сплав деформируется как монотонным образом, так и скачкообразным. При этом монотонное накопление деформации сопровождается монотонным ростом среднеквадратичного напряжения акустической эмиссией, в то время как скачкообразное накопление сопровождается единичными акустическими импульсами. 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.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, изотермические циклы, термомеханическое нагружение, пластическая деформация, механическая активация, деформационные скачки, импульсы акустической эмиссии.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.2-36

The paper presents investigations of aluminum-magnesium alloy deformation behavior under cyclic thermomechanical loading. In each cycle, the temperature is recorded, and the load is increased linearly to a maximum value. Real-time experimental data base is filled with data from three channels: acoustic — acoustic emission RMS voltage (μV); deformation—the value of deformation (%); strain — in tension value (MPa). Experimental data analysis demonstrates both monotonous and jump-like deformations of aluminum-magnesium alloy. At the same time, monotonous strain accumulation is accompanied by a monotonic increase of acoustic emission stress peak RMS values while jump-like accumulation is accompanied by single acoustic impulses. Deformation jumps indicate high correlation and localization of deformation bands on the macroscopic scale. The acoustic emission impulses characterize the high coherence of elementary acoustic signals from the system of deformation bands with interference that generates a single acoustic signal.

Key words: acoustic emission, isothermal cycles, thermomechanical loading, plastic deformation, mechanical activation, expansion racing impulses of acoustic emission.

* Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ (дог. № 02.//G//25.31.0063).

Введение. 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 проявляется на зависимости «напряжение — деформация» в виде скачков (зубцов) 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, коррелирующие с появлением полос деформации, т.е. каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [2]. Проявление закономерностей прерывистой текучести и акустической эмиссии есть следствие волновой природы деформации в алюминиево-магниевых сплавах. Волна деформации, распространяясь от концентратора напряжений, стимулирует образование полос деформации и акустическую эмиссию [3].

В данной работе проведено исследование деформации и акустической эмиссии в Al-Mg сплаве при нагружении в широком интервале температур вплоть до температуры плавления.

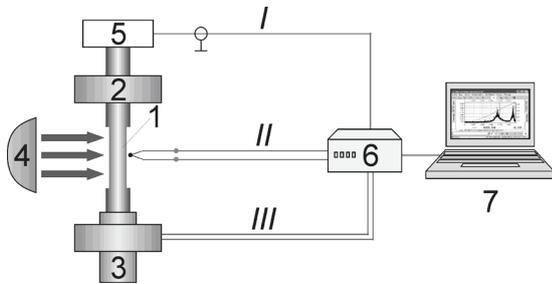


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — образец в виде стержня; 2 — неподвижный захват установки; 3 — подвижный захват установки с устройством нагружения и измерения деформации; 4 — нагревательный элемент; 5 — пьезопреобразователь сигналов акустической эмиссии; 6 — аналогоцифровой преобразователь;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

Методика экспериментов. Из пластины сплава AlMg5 вырезали образцы в виде стержней длиной 300 мм, в которых были сформированы области локализации деформации диаметром 4 мм и длиной 30 мм. Механическое нагружение, измерение дефор-

мации, температуры и среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии проводили с помощью установки, схематичное изображение которой приведено на рисунке 1. Как следует из схемы установки, образец нагружали сдвиговым напряжением и измеряли сдвиговую деформацию. Нагружение осуществляли в изотермических условиях (от 25 до 500°C включительно с шагом в 100°C).

Экспериментальные результаты. На рисунке 2 представлены результаты первого изотермического эксперимента при комнатной температуре.

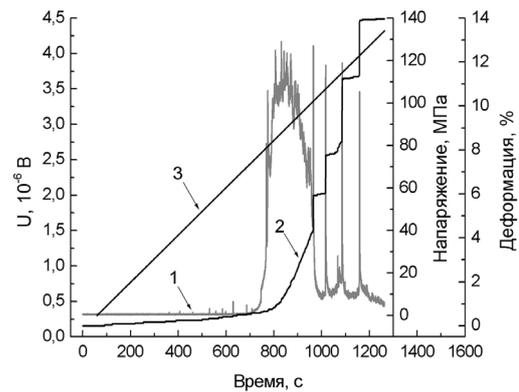


Рис. 2. Первый цикл изотермического нагружения образца при 25°C: 1 — среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии как функция времени цикла; 2 — накопление деформации в цикле; 3 — механическое напряжение в цикле. Все параметры синхронизированы в одном временном масштабе

Активное накопление деформации началось при достижении механического напряжения примерно в 70 МПа. Однако акустическая эмиссия свидетельствует, что уже при напряжении около 30 МПа наблюдаются отдельные акустические сигналы, характеризующие акты пластических сдвигов в образце в квазиупругой области. Монотонное накопление деформации до 4,5%, начавшееся при напряжении около 70 МПа, сопровождалось формированием пика акустической активности, затем, начиная от 100 МПа, последовали деформационные скачки, сопровождаемые высокоамплитудными сигналами акустической эмиссии. В таблице приведены данные по величине деформационных скачков и величине акустических сигналов. Первый скачок привел к приросту деформации на 1,5%, величина последующих деформационных скачков возрастала по мере увеличения напряжения. Общий прирост деформации за все время нагружения образца составил 14% (причем за счет деформационных скачков — примерно 10%), в то время как монотонное накопление деформации — 4%.

Таблица

Значения деформационных скачков и акустических сигналов в изотермическом цикле при 25°C

| Деформация | Величина деформационного скачка, % | Напряжение, МПа | Амплитуда сигналов акустической эмиссии, мкВ |
|------------|------------------------------------|-----------------|--|
| Полная | 13,9 | | |
| Упругая | 0,8 | | |
| Монотонная | 3,3 | 82–99 | 4,2 |
| Скачок 1 | 1,6 | 101 | 4,1 |
| Скачок 2 | 1,7 | 107 | 3,8 |
| Скачок 3 | 2,8 | 114 | 3,9 |
| Скачок 4 | 2,6 | 122 | 3,5 |

Последующие циклы изотермического нагружения при температуре 200 и 400°C приведены на рисунках 3 и 4. Как следует из приведенных на рисунке 3 данных, фактически монотонное и скачкообразное накопление деформации совпадают. Однако следует заметить, что квазиупругая область существенно расширилась, о чем свидетельствует акустическая эмиссия низкой интенсивности, причем монотонный прирост деформации до первого скачка составил примерно 2%. Как и в предыдущем случае, деформационные скачки сопровождаются высокоамплитудными сигналами акустической эмиссии. В основном весь прирост деформации величиной около 18% осуществлен за счет макроскопических деформационных скачков.

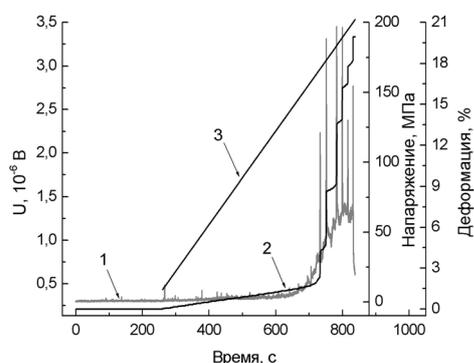


Рис. 3. Изотермический цикл нагружения при температуре 200°C: 1, 2, 3 аналогичны параметрам на рисунке 1

По мере увеличения температуры изотермического цикла нагружения наблюдалась деградация скачкообразного характера накопления деформации и, как показано на рисунке 4, при температуре 400°C наблюдали лишь монотонное накопление деформации, сопровождаемое формированием пика акустической эмиссии.

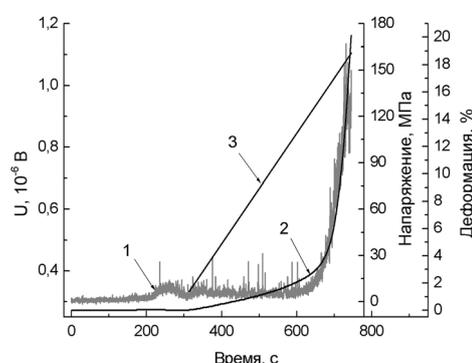


Рис. 4. Изотермический цикл нагружения при температуре 400 °C: 1, 2, 3 аналогичны параметрам на рисунках 2 и 3

Обсуждение результатов. Из приведенных экспериментальных данных следует, что процесс накопления деформации при изотермическом нагружении алюминиево-магниевого сплава АМг5 осуществляется двояким образом: монотонным путем и макроскопически скачкообразным путем. Эта особенность деформационного поведения алюминиево-магневых сплавов в цитируемых работах, к сожалению, не анализируется в связи с анализом зависимости «напряжение — деформация» в жесткой схеме нагружения при постоянной скорости деформирования образца.

В нашей экспериментальной установке исследуется деформационный отклик, что позволяет выявить двойственный характер накопления деформации в изотермических условиях. Итак, монотонное накопление деформации сопровождается монотонной акустической эмиссией, в то время как скачкообразное накопление сопровождается единичными акустическими импульсами.

Как уже было показано [4], низкоамплитудная монотонная акустическая эмиссия свидетельствует

о низкой корреляции элементарных деформационных актов, отвечающих за монотонный характер накопления деформации. Согласно публикациям [2–3], малоамплитудная акустическая эмиссия соответствует малым степеням деформации образца в пределах 1–4%. Высокоамплитудная акустическая эмиссия, для которой характерны единичные сигналы акустической эмиссии, характеризует повышение корреляции в системе элементарных деформационных актов, а макроскопический характер скачкообразного акта свидетельствует о макроскопическом масштабе корреляции элементарных деформационных актов [4, 5]. Приведенные на рисунке 4 данные показывают, что при достижении температуры 400°C 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.

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. Таким образом, эффект скачкообразной деформации и импульсной акустической эмиссии свидетельствуют как о высокой корреляции и макроскопической локализации элементарных деформационных актов (полос деформации), так и когерентности элементарных первичных сигналов акустической эмиссии.

Библиографический список

1. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ. — 1993. — Т. 75, №5.
2. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминиево-магниевого сплава // ФММ. — 1996. — Т. 81, №1.
3. 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.
4. Макаров С.В., Плотников В.А., Потеев А.И. Высокотемпературная пластическая деформация и акустическая эмиссия алюминия в слабоустойчивом состоянии // Известия вузов. Сер. Физика. — 2013. — Т. 56, №6.
5. Лепендин А.А., Поляков В.В. Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении // Журнал технической Физики. — 2014. — Т. 84, № 7