

V. A. Plotnikov, S. V. Makarov, E. A. Kolubaev

Закономерности акустической эмиссии в условиях пластической деформации алюминиево-магниевого сплава при неизотермическом нагружении*

V. A. Plotnikov, S. V. Makarov, E. A. Kolubaev

Regularities of Acoustic Emission under Plastic Deformation of Aluminium-Magnesium Alloy due to Nonisothermal Loading

При механическом нагружении (55 МПа) сплава при температурах от 100 до 350 °С формируется пик среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. При последующем нагружении пик среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии наблюдается только в циклах, в которых нагрузка увеличивается по отношению к предыдущему циклу (например, до 65 МПа). При этом рост деформации в циклах отсутствует. При увеличении механического напряжения в цикле наблюдается рост интегрального энергетического параметра акустической эмиссии J , что свидетельствует о повышении диффузионной подвижности атомов магния в сплаве и, как следствие, протекание частичного распада пересыщенного твердого раствора, диффузионный механизм которого реализуется в условиях механической активации.

При температурах начиная от 400 °С и механическом напряжении выше 50 МПа высокотемпературная пластическая деформация протекает за счет активации зернограничных процессов, в которых доминирующим является зернограничное проскальзывание. Увеличение амплитуды среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии может свидетельствовать о возрастании интенсивности генерации дислокаций при зернограничных процессах, которые формируют полосы деформации.

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

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-56

Введение. В физике металлов пластическое течение связано с локальной потерей сдвиговой устойчивости в зоне действия концентраторов напряжений на различных масштабных уровнях начиная с кристаллической решетки в объеме материала [1,2]. В настоящее время считается очевидным, что пластическое течение контролируется дислокаци-

Root-mean-square (RMS) stress peak of acoustic emission is formed under mechanical loading (55 MPa) of alloy at temperatures from 100 °C up to 350 °C. Further loading causes the RMS stress peak to be observed only in cycles with loading increased relative to previous cycles (for example, up to 65 MPa) and without strain growth in cycles. Increasing stress leads to increasing of internal energy parameter of acoustic emission J , which indicates increasing of diffusion mobility of magnesium atoms in the alloy. That results in a partial breakdown of supersaturated solid solution with diffusion mechanism occurred under mechanical activation.

Plastic deformation proceeds at temperatures above 400 °C and mechanical stress above 50 MPa due to activation of grain-boundary processes with predominant grain boundary sliding. An increasing of RMS stress amplitude demonstrates an increasing of intensity of dislocation generation under grain-boundary processes forming bands of deformation.

Key words: acoustic emission, nonisothermal cycles, thermomechanical loading, mechanical activation.

ями, осуществляющими элементарный сдвиг в плоскости скольжения [3].

Для осуществления элементарного сдвига требуется разрыв атомных связей вдоль линии дислокационного сегмента. Осуществление элементарного акта разрыва связи, в том числе и при пластической деформации, возможно при совместном действии механических на-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №13-02-98026), а также в рамках проекта, поддержанного Министерством образования и науки РФ (дог. №02.G25.31.0063).

пряжений и положительной флуктуации энергии, локализованных в малом коллективе взаимодействующих атомов [4]. Моделирование таких флуктуаций в атомной системе позволило установить, что сильная флуктуация энергии атомов может представлять собой достаточно устойчивое, динамическое состояние, являющееся результатом интерференции фононов [5].

Действительно, исследованиями методами молекулярной динамики установлено, что особенностью тепловых колебаний атомов являются «динамические коллективные (кооперативные) атомные смещения», представляющие собой упорядоченные смещения групп атомов, появление которых обусловлено максвелловским распределением атомов по скоростям [6]. Внешнее механическое нагружение металлов с ГЦК решеткой (например, медь, никель, алюминий), приводящее к деформации растяжение — сжатие, сопровождалось увеличением концентрации динамических коллективных смещений и изменением энтальпии активации диффузионных процессов в кристалле [7]. Согласно такому подходу механизм возникновения сдвиговой неустойчивости связан с интенсивной генерацией и движением дислокационных диполей, зарождающихся в области точечного дефекта или вблизи флуктуации атомной плотности [7, 8].

Экспериментальные результаты по деформированию моно- и поликристаллов алюминия и других металлов свидетельствуют [9], что в ходе пластической деформации в направлении растяжения распространяются один или несколько очагов деформации в зависимости от стадии пластической деформации, в которых локализовано пластическое течение. Из этих экспериментов сделан вывод, что процесс деформации охватывает структурные уровни разного масштаба: от микроскопического до мезоскопического и макроскопического масштабов. Локализация неустойчивости кристаллической структуры при пластической деформации кристаллов для классической трехстадийной зависимости $\sigma - \varepsilon$ (здесь σ — механическое напряжение, ε — относительная деформация) связывается с процессом самоорганизации дислокаций [10]. Учет фактора самоорганизации позволяет сформулировать фундаментальный вывод о том, что наблюдаемое в экспериментах многообразие деформационного поведения и дислокационных структур есть результат эволюции дислокационного ансамбля путем развития коллективных и кооперативных явлений и их пространственной упорядоченности, проявляющейся в формировании линий и полос скольжения [10, 11].

В данной работе проделаны эксперименты и приведены результаты анализа акустических и деформационных эффектов в алюминий-магниевых сплавах при высоких температурах.

Методика экспериментов. Исследование деформационного поведения сплава АМг6 проводили на лабораторной установке. Методика измерения на установке

описана в работе [12]. Образцы изготавливались из листового проката в виде балочки (стержня) квадратного сечения (5,5 x 5,5 мм) и длиной 300 мм. На расстоянии 45 мм от края делалась проточка длиной 40 мм и диаметром 4 мм, главным образом, для локализации деформации. Другая часть образца использовалась в качестве волновода, торец которой шлифовался и полировался, для уменьшения потерь энергии упругой волны на границе образец — пьезодатчик. Перед испытаниями образцы отжигались при температуре 450 °С

Экспериментальные результаты. Экспериментальные результаты, полученные в условиях неизотермического цикла, при постоянном механическом напряжении величиной около 55 МПа представлены на рисунке 1. Из приведенных данных следует, что при нагреве нагруженного образца наблюдается монотонное накопление деформации (рис. 1б). При этом монотонный характер накопления деформации сохраняется вплоть до температуры 550 °С. В низкотемпературной области от 100 до 350 °С монотонному накоплению деформации соответствует монотонный рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (рис. 1а), с максимумом при 160 °С, а затем монотонный спад до уровня шума. При температуре около 400 °С характер деформации и акустической эмиссии меняется: резкому возрастанию скорости накопления деформации соответствует резкий рост амплитуды среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. Последующий цикл с нагрузкой 55 МПа (рис. 2) показал, что пик среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии в низкотемпературной области (100–350 °С) отсутствует (рис. 2а). В то же время в высокотемпературной области характер деформации и акустической эмиссии не меняется: возрастанию скорости накопления деформации соответствует возрастание амплитуды среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (рис. 2а — б).

При увеличении нагрузки в цикле до 65 МПа (рис. 3) вновь наблюдается пик среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии в интервале температур от 100 до 350 °С.

Обсуждение. Можно предположить, что в первом цикле (с нагрузкой 55 МПа) рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии в интервале температур от 100 до 350 °С обусловлен диффузией атомов магния в решетке алюминия, определяющей частичный распад пересыщенного твердого раствора, сформированного предварительной закалкой сплава. В этом температурном интервале накопление деформации величиной около 0,25% обусловлено активацией переползания дислокаций контролируемой диффузией.

Начиная с температуры 400 °С протекание высокотемпературной пластической деформации обусловлено активацией зернограничных процессов, в первую очередь зернограничного проскальзывания. Наблюдаемое увеличение амплитуды средне-

квадратичного напряжения акустической эмиссии, очевидно, связано с возрастанием интенсивности дислокационных процессов, формирующих полосы деформации.

В последующих циклах при той же нагрузке процессы распада отсутствуют, акустическая эмиссия связана только с высокотемпературной пластической деформацией.

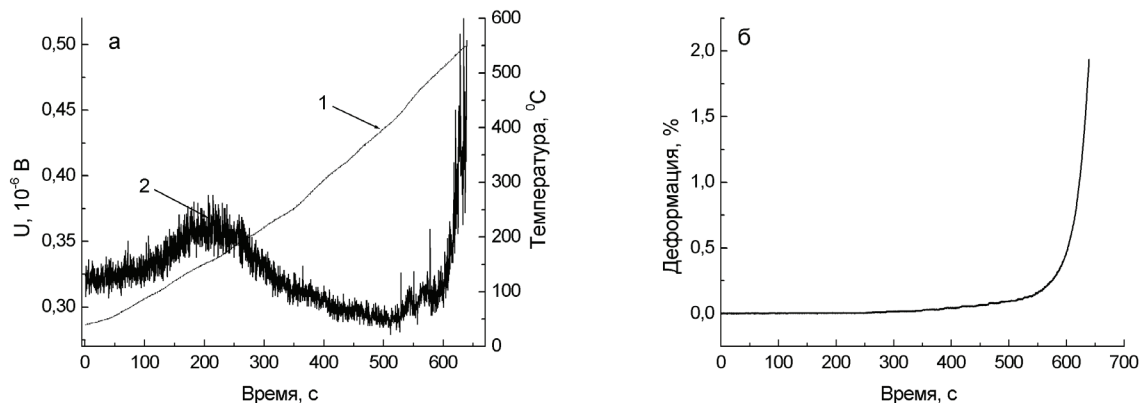


Рис. 1. Монотонный характер накопления деформации (б) и немонотонный рост средневквдратичного напряжения акустической эмиссии (а) в сплава АМг6 при механическом напряжении 55 МПа (0,7 предела текучести) в неизотермическом термомеханическом цикле (первый цикл).

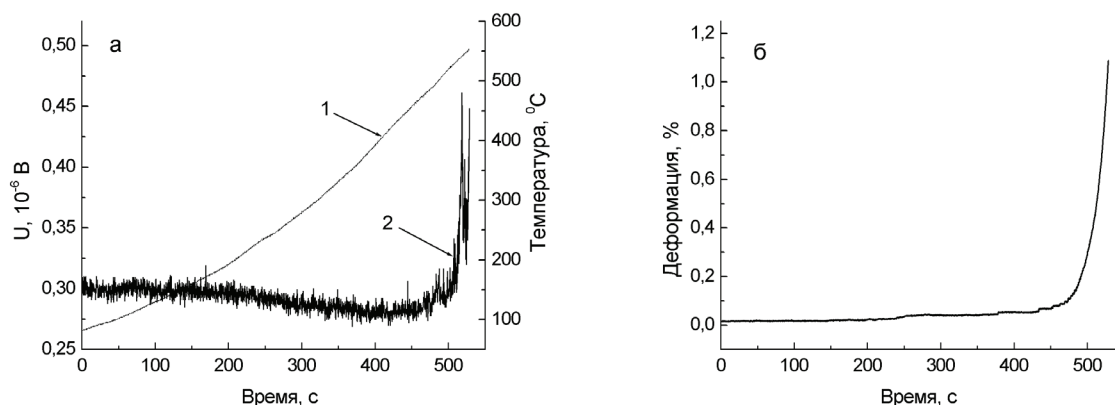


Рис. 2. Монотонный характер накопления деформации (б) и монотонное изменение средневквдратичного напряжения акустической эмиссии (а) в сплава АМг6 при механическом напряжении 55 МПа (0,7 предела текучести) в неизотермическом термомеханическом цикле (второй цикл): 1 – температурная кривая; 2 – зависимость средневквдратичного напряжения акустической эмиссии

В цикле при увеличении нагрузки от 55 до 85 МПа (рис. 4) вновь наблюдается пик средневквдратичного напряжения акустической эмиссии в этом же температурном интервале (100–350 °С), обусловленный механической активацией диффузии магния. На рисунке 4 приведена зависимость параметра акустической эмиссии J от величины механического напряжения в термомеханическом цикле, где $J = \sum U^2 \Delta t_i$ представляет собой интегральный параметр акустической эмиссии.

Из приведенного рисунка 4 следует, что при увеличении механического напряжения в цикле наблюдается рост параметра J , что, в свою очередь, свидетельствует об увеличении диффузионной подвижности атомов магния в сплаве. Такое поведение укладывается в современные представления об активации диффузионных процессов в условиях действия тепловых флуктуаций и механического напряжения, локализованного на структурном элементе. Для твердых тел (в том числе и для металлов) зависимость времени разрыва связи (время раз-

рушения) от механического напряжения и температуры подчиняется экспоненциальному выражению [3]

$$\tau(\sigma, T) = \tau \cdot \exp\left[\frac{U(\sigma)}{kT}\right], \quad (1)$$

согласно которому среднее время $\tau(\sigma, T)$ ожидания элементарного акта разрыва связи зависит от эффективной величины потенциального барьера

$$U(\sigma) = U_0 - \gamma\sigma. \quad (2)$$

Преодоление барьера осуществляется термофлуктуационным путем. Величина U_0 для данного металла является константой, в то время как величина γ

(активационный объем, связанный с некоторым элементарным атомным коллективом) может меняться в широких пределах. В этой связи слагаемое $\gamma\sigma$ (работа внешних сил, локализованных на малом атомном коллективе) может меняться также в широких пределах, свидетельствуя тем самым об изменении эффективного порога активации $U(\sigma)$. В зависимости от величины внешнего напряжения, локализованного на некоторой атомной конфигурации, превосходящей атомный объем на порядки величины, эффективная величина потенциального барьера может меняться вплоть до нуля. Потенциальный барьер не исчезает, но система переходит в иное надбарьерное состояние.

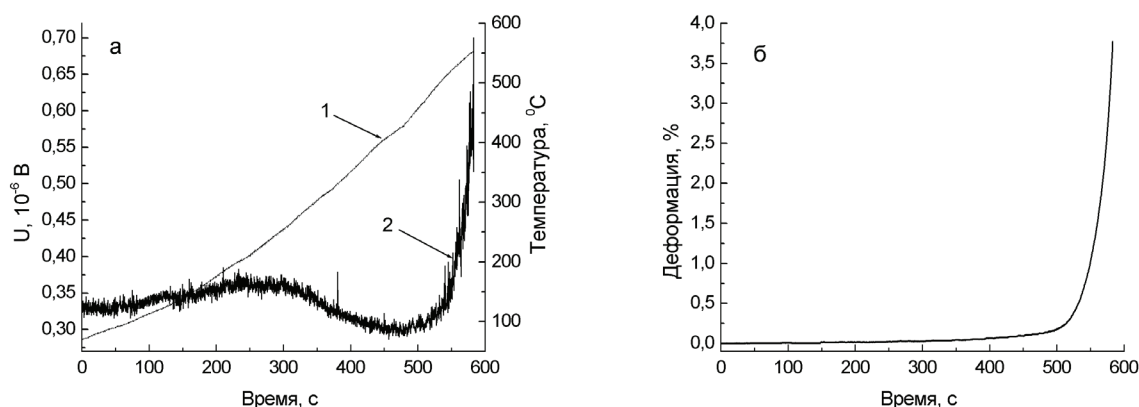


Рис. 3. Монотонный характер накопления деформации (б) и формирование пика среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (а) в сплава АМг6 при увеличении нагрузки до 65 МПа в неизотермическом термомеханическом цикле

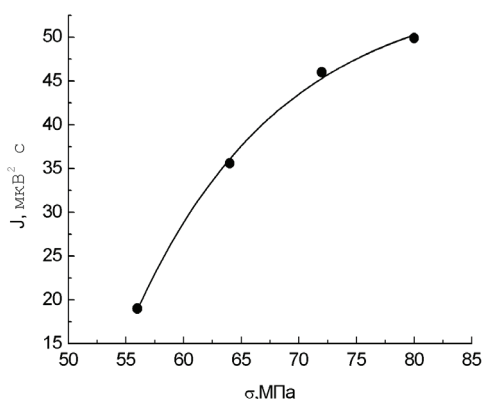


Рис. 4. Зависимость энергетического параметра J от механического напряжения в неизотермических циклах

Заключение. При нагреве нагруженных образцов из алюминий-магниевого сплава наблюдается монотонное накопление деформации, сопровождающееся монотонной акустической эмиссией. При достижении температуры 400 °С скорость деформации резко возрастает, что приводит к возрастанию амплитуд акустических сигналов. Такое деформационное

поведение, возможно, связано со сменой механизмов накопления деформации в высокотемпературной области. Низкотемпературная акустическая активность, наблюдаемая в первых циклах термомеханического нагружения, связана с механической активацией диффузии атомов магния из пересыщенного твердого раствора.

Библиографический список

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технической физики. — 2007. — Т. 77, № 8.
2. Панин В.Е., Поляков В.В., Сыров Г.В., Фадеев А.В. Эволюция механизмов пластической деформации в пористых металлах // Известия вузов. Физика. — 1996. — №1.
3. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М., 1986.
4. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М., 1974.
5. Слуцкер А.И., Михайлин А.И., Слуцкер И.А. Микроскопика флуктуаций энергии атомов в твердых телах // УФН. — 1994. — Т. 164, №4.
6. Полетаев Г.М., Старостенков М.Д. Динамические коллективные смещения атомов в металлах и их роль в вакансионном механизме диффузии // ФТТ. — 2009. — Т. 51, №4.
7. Poletaev G.M., Patzeva J.V., Gurova N.M., Starostenkov M.D. Self-Diffusion in (111) Plane of Ni During 2D Deformation // Engineering Mechanics. — 2004. — V. 11, № 5.
8. Аксенов М.С., Полетаев Г.М., Ракитин Р.Ю., Старостенков М.Д. Исследование самодиффузии в одноосно деформированных двумерных металлах // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2005. — № 2.
9. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Горбатенко В.В. Автоволны локализованной пластической деформации // ЖТФ. — 1995. — Т. 65, № 5.
10. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // УФН. — 1999. — Т. 169, №9.
11. Лепендин А.А., Поляков В.В. Скейлинг характеристик акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, №7.
12. Плотников В.А., Макаров С.В. Акустическая эмиссия и деформационные процессы в алюминии при высоких температурах // Известия вузов. Физика. — 2005. — № 11.