

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА АМг6

Макаров С.В.^{1,2}

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)

Проведены исследования и приведены результаты анализа акустических и деформационных эффектов в алюминий-магниевого сплавах при высоких температурах. Обнаружено, что при нагреве нагруженных образцов наблюдается монотонное накопление деформации, сопровождающееся монотонной акустической эмиссией. При достижении температуры 400 °С скорость деформации резко возрастает, что приводит к возрастанию амплитуд акустических сигналов. Установлено, что при механическом нагружении (55 МПа) сплава АМг6 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). Такое поведение сплава может свидетельствовать о протекании частичного распада пересыщенного твердого раствора, диффузионный механизм которого реализуется в условия механической активации.

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

REGULARITIES OF ACOUSTIC EMISSION AT HIGH-TEMPERATURE DEFORMATION OF THE ALLOY AMg6

Makarov S.V.^{1,2}

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)

The investigations were carried out and the results of analysis of deformation and acoustic effects in aluminum-magnesium alloys at high temperatures were shown. It was found that heating of the loaded samples leads to monotonically accumulation of deformation, accompanied by monotonous acoustic emission. Upon reaching a temperature of 400 °C strain rate increases dramatically, which leads to an increase in the amplitude of acoustic signals. It was found that during mechanical loading (55 MPa) of AMg6 alloy at temperatures from 100 up to 350 °C RMS peak of acoustic emission is formed. Subsequent loading RMS peak of acoustic emission is observed only in the cycle in which the load is increased relative to the previous cycle (e.g., 65 MPa). This behavior of the alloy may indicate the flow of partial decomposition of the supersaturated solid solution, the diffusion mechanism is implemented in terms of mechanical activation.

Keywords: acoustic emission, thermomechanical loading, mechanical activation.

Введение

В физике металлов пластическое течение связано с локальной потерей сдвиговой устойчивости в зоне действия концентраторов напряжений на различных масштабных структурных уровнях, начиная с кристаллической решетки в объеме материала [4]. В настоящее время считается очевидным, что пластическое течение контролируется дислокациями, осуществляющими элементарный сдвиг в плоскости скольжения [8].

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

напряжений и положительной флуктуации энергии, локализованных в малом коллективе взаимодействующих атомов [7]. Моделирование таких флуктуаций в атомной системе позволило установить, что сильная флуктуация энергии атомов может представлять собой достаточно устойчивое, динамическое состояние, являющееся результатом интерференции фононов [9].

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 [10]. 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 [1, 10].

Экспериментальные результаты по деформированию моно- и поликристаллов алюминия и других металлов свидетельствуют [2], 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 масштаба до мезоскопического и макроскопического масштабов. Локализация неустойчивости кристаллической структуры при пластической деформации кристаллов для классической трехстадийной зависимости $\sigma - \epsilon$ (здесь σ – механическое напряжение, ϵ – относительная деформация) связывается с процессом самоорганизации дислокаций [3]. 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 [3].

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

Методика экспериментов

Исследование деформационного поведения сплава АМгб проводили на лабораторной установке. Методика измерения на установке описана в работе [5]. 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 рис. 1. Из приведенных данных следует, что при нагреве нагруженного образца наблюдается монотонное накопление деформации (рис. 1, б). 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. 1, а), 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. 2, а). 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.2, а, 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.

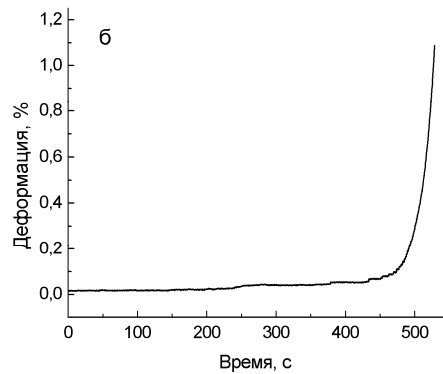
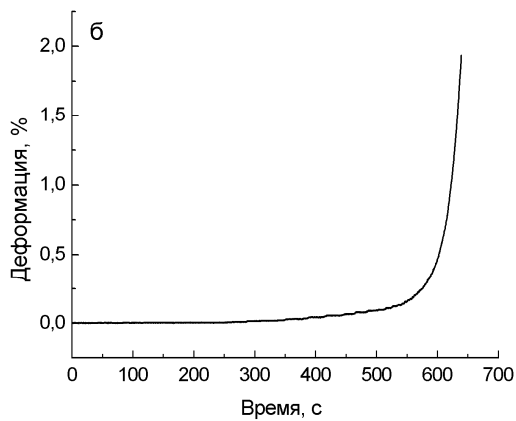
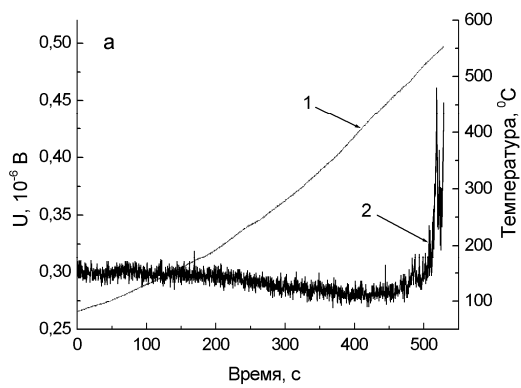
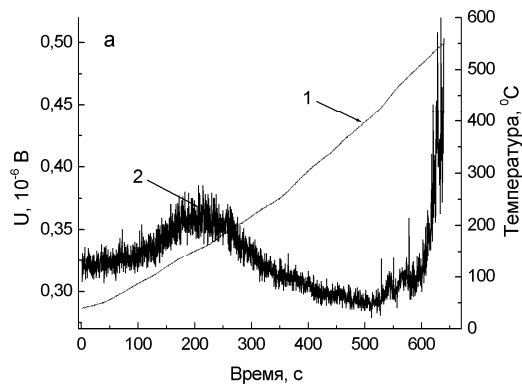


Рис. 1. Монотонный характер накопления деформации (б) и немонотонный рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (а) при механическом напряжении 55 МПа (0,7 предела текучести) в неизотермическом термомеханическом цикле (первый цикл) для сплава АМгб.

Рис. 2. Монотонный характер накопления деформации (б) и монотонное изменение среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (а) при механическом напряжении 55 МПа (0,7 предела текучести) в неизотермическом термомеханическом цикле (второй цикл) для сплава АМгб.

1 – температурная кривая, 2 – зависимость среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии.

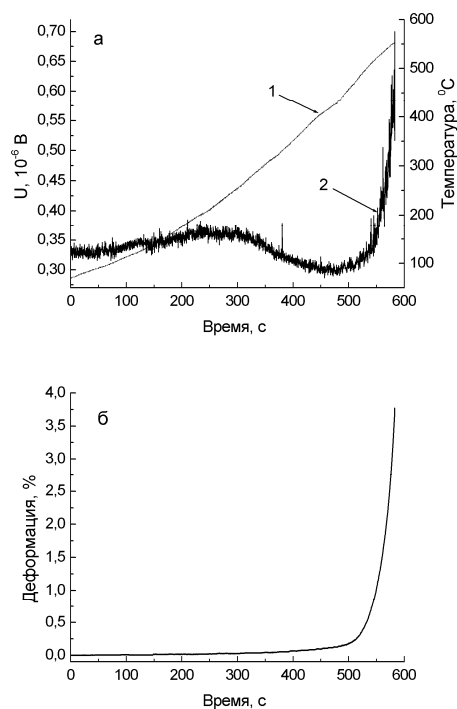


Рис. 3. Монотонный характер накопления деформации (б) и формирование пика среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (а) при увеличении нагрузки до 65 МПа в неизотермическом термомеханическом цикле для сплава АМг6.

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 решётке алюминия, определяющей частичный распад пересыщенного твёрдого 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 среднеквадратичного 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.

В цикле при увеличении нагрузки до 65 МПа вновь наблюдается пик среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии в этом же температурном интервале

(100 – 350 °С), обусловленный механической активацией диффузии магния. 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 разрушения) от механического напряжения и температуры подчиняется экспоненциальному выражению [7]

$$\tau(\sigma, T) = \tau \exp[U(\sigma)/kT], \quad (1)$$

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 которого осуществляется термofлуктуационным 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 меняется вплоть до нуля. Потенциальный барьер не исчезает, но система переходит в иное надбарьерное состояние, когда движение дислокационного сегмента осуществляется надбарьерно атермическим путем.

Заключение

При нагреве нагруженных образцов из алюминиево-магниевых сплавов 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.

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

Список литературы

1. Аксенов М.С., Исследование самодиффузии в одноосно деформированных двумерных металлах / М.С. Аксенов, Г.М. Полетаев, Р.Ю. Ракитин, М.Д. Старостенков // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2005. - № 2. – С. 64-67.
2. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Горбатенко В.В. Автоволны локализованной пластической деформации / Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, В.В. Горбатенко // *ЖТФ*. – 1995. – Т. 65. - № 5. – С. 91-103.
3. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов / Г.А. Малыгин // *УФН*. – 1999. – Т. 169. - № 9. – С. 979-1010.
4. Панин В.Е. Природа локализации пластической деформации твердых тел/ В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко // *ЖТФ*. – 2007. – Т. 77. - № 8. – С. 62-69.
5. Плотников В.А. Акустическая эмиссия и деформационные процессы в алюминии при высоких температурах / В.А. Плотников, С.В. Макаров // *Изв. вузов. Физика*. – 2005. - № 11. – С. 33-38.
6. Полетаев Г.М, Старостенков М.Д. Динамические коллективные смещения атомов в металлах и их роль в вакансионном механизме диффузии / Г.М. Полетаев, М.Д. Старостенков // *ФТТ*. – 2009. – Т. 51. - № 4. – С. 686-691.
7. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. –560 с.
8. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
9. Слуцкер А.И. Микроскопика флуктуаций энергии атомов в твердых телах/ А.И. Слуцкер, А.И. Михайлин, И.А. Слуцкер // *УФН*. –1994. – Т. 164. - № 4. – С. 357-366.
10. Self-Diffusion in (111) Plane of Ni During 2D Deformation/ G.M. Poletaev, J.V. Patzeva, N.M. Gurova, M.D. Starostenkov // *Engineering Mechanics*. – 2004. – V. 11. - № 5. – P. 335-339.

Рецензенты:

Тарасов С.Ю., д.т.н., ведущий научный сотрудник Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Сизова О.В., д.т.н., главный научный сотрудник Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.