



УДК 669.71:539.3

<http://dx.doi.org/dopovidi2016.03.048>

И. И. Папилов, П. И. Стоев, А. И. Пикалов, Т. Г. Емлянинова

ННЦ “Харьковский физико-технический институт” НАН Украины

E-mail: stoev@kipt.kharkov.ua

## Влияние вида деформации на акустическую эмиссию сплава магния

(Представлено академиком НАН Украины А. С. Бакаем)

Приведены результаты сравнительного изучения спектров акустической эмиссии (АЭ) магниевого сплава WE43 при двух видах деформации: простом сжатии и сжатии с изгибом, т. е. с прямым вкладом в деформацию сдвиговой компоненты напряжений. Обнаружено существенное изменение спектров АЭ при деформации магниевого сплава WE43 при “включении” сдвиговой компоненты тензора напряжений. Выяснено, что при сжатии с изгибом наблюдаемый рост активности сигналов АЭ и количества высокоамплитудных импульсов АЭ связан с увеличением вклада процесса двойникования за счет сдвиговой деформации. Установлено, что изгибный (сдвиговой) компонент тензора напряжений при угловом равноканальном прессовании заготовок магниевого сплава WE43 способствует значительному повышению эффективности диспергирования структуры материала.

**Ключевые слова:** магниевый сплав, акустическая эмиссия, деформация изгибом, двойникование, структура.

В 1970 г. одним из авторов этой статьи был предложен новый метод интенсивной пластической деформации металлов, впервые позволивший получить ультрамелкозернистый (УМЗ) бериллий [1]. Метод заключался в проведении нескольких циклов выдавливания и осадки заготовок высокочистого бериллия при постепенно понижающихся температурах. Впервые в мире был получен сначала сверхпластичный бериллий, а затем большая группа других УМЗ материалов атомной техники.

Десятилетие спустя группа белорусских ученых во главе с В. М. Сегалом предложила альтернативный метод измельчения зерен путем равноканального углового прессования заготовок, реализующий деформацию заготовок сдвигом (изгибом) при многократном

© И. И. Папилов, П. И. Стоев, А. И. Пикалов, Т. Г. Емлянинова, 2016

выдавливании в угловой пресс-форме [2, 3]. Этот метод был развит в работах Р.З. Валиева с сотрудниками для получения структур с субмикроскопическим наноструктурным размером зерен (см. [4]).

Хотя к настоящему времени имеется обширная информация о механизмах измельчения зерен при интенсивной деформации металлических материалов, глубокое понимание природы происходящих при этом процессов все еще не достигнуто. Хорошо известно, что метод акустической эмиссии (АЭ) широко применяется как тонкий структурно-чувствительный метод исследования кинетических закономерностей процессов деформирования и разрушения различных конструкционных материалов [5]. То есть изменения акустических параметров можно связать с механизмами пластической деформации и тем самым определить особенности структурообразования при различных видах интенсивной деформации. Поэтому цель настоящей работы — сравнительное изучение спектров АЭ магниевых сплавов WE43 при двух видах деформации: простом сжатии и сжатии с изгибом (т. е. при значительном вкладе в деформацию сдвиговой компоненты напряжений).

**Методика исследования.** В качестве исследованного материала были использованы полученные экструзией цилиндрические образцы магниевых сплавов WE43. После горячего выдавливания образцы подвергали рекристаллизационному отжигу при 280 °С в течение 1 ч. Размер зерна в таких заготовках варьировался в интервале 2–5 мкм. Испытанные цилиндрические заготовки имели диаметр 4 мм и высоту 6–12 мм. Короткие заготовки при сжатии на 10% принимали бочкообразную форму, а длинные после деформации в несколько процентов изгибались, т. е. к осевым нагрузкам добавлялись сдвиговые напряжения. Испытания на сжатие образцов проводили на универсальной испытательной машине 1958 У10–1 со скоростью деформации 0,17 мм/мин ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) при комнатной температуре. При испытании образцов синхронно регистрировали параметры деформирования (кривую деформации) и спектры акустической эмиссии. Для регистрации акустической эмиссии использовали многоканальный акустический комплекс М400, позволяющий регистрировать и разделять сигналы АЭ в зависимости от их амплитуды. Амплитудное значение шумов, приведенное к входу предварительного усилителя, составляло 5 мкВ. Уровни амплитудной дискриминации каналов составляли 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 100 мкВ относительно этого значения. В качестве датчика-регистратора АЭ использовали пьезокерамический преобразователь из керамики ЦТС-19 с резонансной частотой 180 кГц. Датчик крепили к исследуемому образцу через слой акустической смазки специальным держателем, который обеспечивал одинаковое усилие прижатия. Сбор, обработку и анализ результатов, включавших информацию об акустической эмиссии и параметрах деформирования, проводили с помощью ЭВМ и специально разработанных программ обработки данных.

**Экспериментальные результаты.** На рис. 1 приведены диаграммы сжатия двух образцов: простое сжатие (а) и сжатие с изгибом (б). На диаграммы нанесены кривые интегральной активности АЭ по всем 8 амплитудным каналам в процессе деформации. На рис. 2 проиллюстрированы зависимости суммы зарегистрированных импульсов АЭ при простом сжатии и сжатии с изгибом.

Из рис. 1 и 2 видно, что

при обоих видах сжатия АЭ начинается при напряжениях значительно ниже макроскопического предела текучести;

пик АЭ в обоих случаях совпадает с макроскопическим пределом текучести;

на установившейся стадии пластического течения активность АЭ падает практически до нуля;

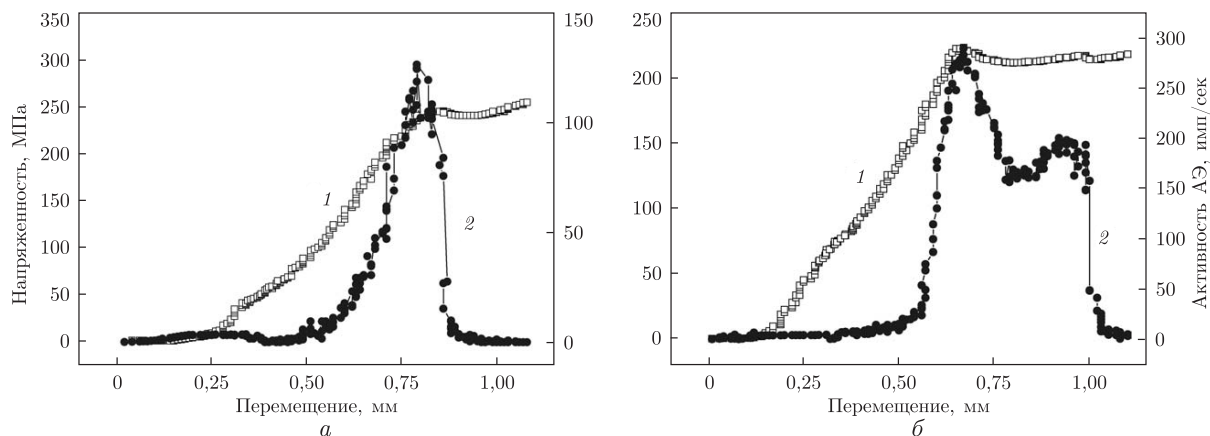


Рис. 1. Диаграммы сжатия (кривая 1) и активности АЭ (кривая 2) при простом сжатии (а) и сжатии с изгибом (б)

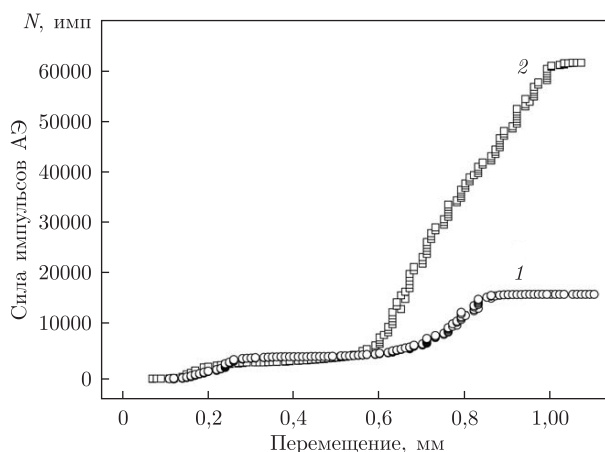


Рис. 2. Сравнительные данные о сумме регистрируемых импульсов АЭ при простом сжатии (кривая 1) и сжатии с изгибом (кривая 2)

величина общей суммы зарегистрированных сигналов в двух указанных случаях отличается более чем в 3 раза;

при сжатии с изгибом начало изгиба приводит к появлению второго пика на кривой суммарной активности АЭ (рис. 1, б).

Начало заметной АЭ при напряжениях гораздо ниже предела текучести связано с тем, что из-за хаотического распределения зерен по ориентациям пластическое течение в благоприятно ориентированных для дислокационного скольжения зернах начинается задолго до макроскопического предела текучести, т.е. в области микродеформаций, что мы и наблюдали на многих металлах, а в этой работе — на магниевом сплаве.

По достижении макроскопического предела текучести наблюдается процесс коллективного движения дислокаций, а на кривой активности АЭ, как правило, возникает максимум (см. рис. 1). Дальнейший спад активности АЭ обусловлен стационарным движением дислокаций, при котором не возникают волны напряжений, ответственные за появление АЭ [5]. На стадии установившегося дислокационного движения при растяжении или сжатии материала АЭ падает до нуля (см. рис. 1).

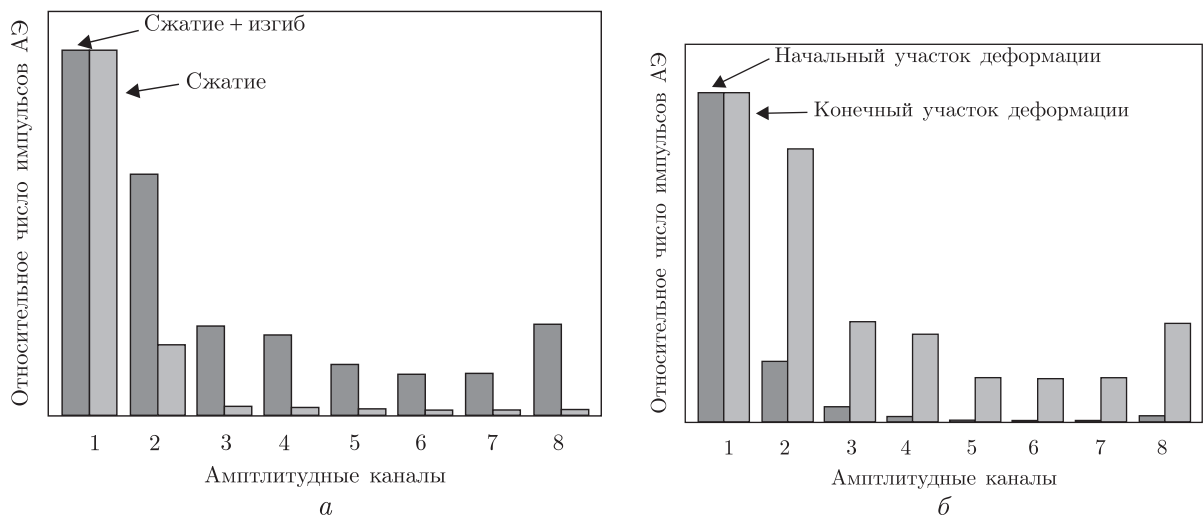


Рис. 3. Гистограмма распределения импульсов АЭ по 8 амплитудным каналам: *a* — колонки слева — сжатие с изгибом; справа — чистое сжатие; *b* — для случая сжатия с изгибом: колонки слева — начальный участок деформации, отвечающий сжатию; справа — конечный участок деформации, отвечающий изгибу (сдвигу)

Важнейшим новым результатом, полученным в настоящей работе, является обнаружение эффекта заметного влияния вида деформации на особенности изменения кривых зависимости интенсивности АЭ и на вид распределения сигналов АЭ по амplitудам. Как видно из рис. 1, активность АЭ при сжатии с изгибом значительно возрастает по сравнению с простым сжатием, а на зависимости активности от деформации возникает второй максимум, отвечающий началу изгиба образца (сдвига) (рис. 1, *б*).

Физику происходящих при этом процессов позволяет прояснить амплитудный анализ спектров АЭ в указанных двух случаях деформации. Известно, что амплитуда акустической эмиссии определяется мощностью деформационной волны, возникающей при дислокационном движении или двойниковании: чем больше дислокаций или двойников участвует в элементарном сдвиге, тем больше амплитуда соответствующих импульсов АЭ.

На рис. 3 представлено распределение импульсов АЭ по 8 вышеуказанным амплитудным каналам при чистом сжатии и сжатии с изгибом.

Мы видим радикальное различие спектров АЭ в двух изучаемых случаях. При чистом сжатии основной вклад в интегральную величину активности АЭ вносят низкоамплитудные импульсы (первый и второй каналы спектрального анализатора), а на долю импульсов с более высокими амплитудами приходится лишь несколько процентов АЭ. А вот при деформации сжатием с изгибом (сдвигом) количество высокоамплитудных импульсов не просто резко возрастает (рис. 3, *a*), но особенно выделяется высокоамплитудный пик 8-го канала, составляющий 25% низкоамплитудного. Это является ярким свидетельством изменения механизма деформации при “включении” изгиба (сдвига).

Из рис. 3, *б* следует еще один любопытный факт: при сжатии с изгибом на начальной стадии деформации, когда доминирует скольжение, амплитудное распределение импульсов АЭ практически не отличается от опытов с чистым сжатием (ср. рис. 3, *a* и 3, *б*). Но на конечной стадии, когда доминирует изгиб, на кривой активности АЭ появляется второй пик и резко возрастает количество высокоамплитудных импульсов, что позволяет однозначно заключить: к изменению спектров АЭ ведет рост сдвиговой компоненты деформации.

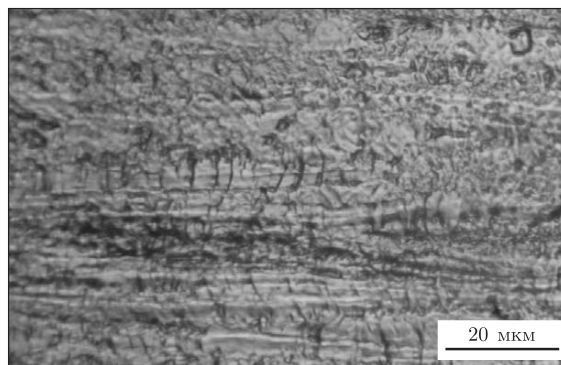


Рис. 4. Микрофотография структуры магниевого сплава WE43 после деформации сжатием с изгибом (степень деформации 12%; двойники указаны стрелками)

Как показали наши предыдущие исследования, высокоамплитудные импульсы АЭ, как правило, связаны не с дислокационным скольжением в зерне, а с двойникованием или зарождением трещин. Поэтому мы исследовали структуру деформированных образцов после сжатия с изгибом и действительно обнаружили интенсивное двойникование в зернах большей величины (рис. 4).

Полученные данные однозначно указывают на то, что характер пластического течения исследованного материала существенно зависит от вида деформации и что появление касательной компоненты нагрузки значительно увеличивает вклад двойникования в диспергирование зеренной структуры. Именно этим объясняется более высокая эффективность интенсивной деформации в условиях углового прессования.

Еще одним ярким свидетельством изменения механизма деформации при появлении касательных напряжений является разное акустическое поведение заготовок в процессе сжатия – выдавливания и при угловом прессовании: мы обнаружили сильный звуковой эффект при угловом прессовании магниевых заготовок, отсутствующий при сжатии – выдавливании, а именно “пение” обрабатываемого образца в процессе деформации в угловой пресс-форме. Как известно, интенсивное двойникование при деформации сопровождается таким “пением” на частотах, доступных человеческому уху.

**Обсуждение результатов.** Полученные авторами результаты позволяют прояснить одну из причин существенного диспергирования структуры деформируемых заготовок при интенсивной деформации в условиях увеличения сдвиговой компоненты тензора напряжения. Одноосное сжатие исследованного сплава магния происходит, в основном, за счет стационарного дислокационного скольжения и сопровождается ростом плотности дислокаций леса. Наличие сдвиговой компоненты деформации при угловом равноканальном прессовании сопровождается интенсивным двойникованием. Это подтверждается как измеренными в настоящей работе спектрами АЭ при сжатии с изгибом, так и обнаруженным авторами эффектом мощной звуковой эмиссии в слышимом диапазоне частот при угловом равноканальном прессовании. Наши исследования также показали, что эффективность диспергирования зеренной структуры магниевого сплава WE43 после 4–5 циклов углового равноканального прессования увеличивается в несколько раз по сравнению с таким же количеством циклов выдавливания и осадки.

**Выводы.** 1. Обнаружено существенное изменение спектров АЭ при деформации магниевого сплава WE43 при “включении” сдвиговой компоненты тензора напряжений.

2. Вияснено, що рост інтегральної активності АЕ і вклада в неї високоамплітудних імпульсів АЕ зв'язані з увеличенням вклада процесу двійниковання за рахунок сдвигової деформації.

3. Изгибовый (сдвиговой) компонент тензора напряжений при угловом равноканальном прессовании заготовок магниевого сплава WE43 способствует существенному повышению эффективности диспергирования структуры материала.

### Цитированная литература

1. Папиров И. И., Тихинский Г. Ф. Структура и механические свойства мелкозернистого деформированного бериллия // Физика металлов и металловедения. – 1970. – **29**. – С. 1057–1060.
2. Segal V. M. Materials processing by simple shear // Mater. Sci. Eng. A. – 1995. – **197**, Is. 2. – P. 157–164.
3. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.
4. Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – Москва: ИКЦ “Академкнига”, 2007. – 398 с.
5. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.

### References

1. Papirov I. I., Tikhinskij G. F. Physica of Metals and Metallography, 1970, **29**: 1057–1060 (in Russian).
2. Segal V. M. Mater. Sci. Eng. A., 2002, **197**, Is. 2: 157–164.
3. Segal V. M., Reznikov V. I., Kopilov V. I. Plastic structure formation processes of metals, Minsk: Science and Technology, 1994 (in Russian).
4. Valiev RZ, Alexandrov I. V. Bulk nanostructured metal materials, Moscow: ICC “Akademkniga”, 2007 (in Russian).
5. Greshnikov V. A., Drobot Y. B. Acoustic emission, Moscow: Publishing House of Standards, 1976 (in Russian).

Поступило в редакцию 18.08.2015

**І. І. Папіров, П. І. Стоєв, О. І. Пікалов, Т. Г. Ємлянінова**

ННЦ “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України

E-mail: stoev@kipt.kharkov.ua

### Вплив виду деформації на акустичну емісію сплаву магнію

Наведено результати порівняльного вивчення спектрів акустичної емісії (АЕ) магнієвого сплаву WE43 при двох видах деформації: простому стиску і стиску з вигином, тобто з прямим внеском у деформацію зсувної компоненти напруження. Виявлено істотну зміну спектрів АЕ при деформації магнієвого сплаву WE43 при “включенні” зсувної компоненти тензора напруження. З'ясовано, що при стиску з вигином спостережуване зростання активності сигналів АЕ та кількості високоамплітудних імпульсів АЕ пов'язане зі збільшенням вклада процесу двійниковання за рахунок зсувної деформації. Встановлено, що згинальна (зсувна) компонента тензора напруження при кутовому рівноканальному пресуванні заготовок магнієвого сплаву WE43 сприяє значному підвищенню ефективності диспергування структури матеріалу.

**Ключові слова:** магнієвий сплав, акустична емісія, деформація вигином, двійниковання, структура.

I. I. Papirov, P. I. Stoev, A. I. Pikalov, T. G. Emlyaninova

NCS “Kharkiv Institute of Physics and Tecnology”

*E-mail:* stoev@kipt.kharkov.ua

### **Influence of the type of deformation on the acoustic emission of a magnesium alloy**

*The results of a comparative study of the spectra of acoustic emission (AE) of WE43 magnesium alloy with two types of deformation: simple compression and compression with bending, i. e., with the direct contribution of the shear stress components to a deformation are presented. A substantial change in the spectra of AE during a deformation of WE43 magnesium alloy with “switched on” shear stress tensor components is discovered. It is found out that, under the compression with bending, the observed increase in the activity of AE signals and the number of high-amplitude AE pulses is associated with an increase in the contribution of the twinning process due to a shear deformation. It is established that the flexural stress tensor component at the equal-channel angular pressing of blanks of WE43 magnesium alloy significantly contributes to the dispersion of the material structure.*

**Keywords:** magnesium alloy, acoustic emission, bending deformation, twinning, structure.