

PACS: 43.40.Le. 62.60.F. 81.05.Bx

STUDY OF ACOUSTIC EMISSION DURING DEFORMATION OF MAGNESIUM ALLOY**I.I. Papirov, P.I. Stoev, A.I. Pikalov, T.G. Emlyaninova***National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"**61108, Kharkov, Akademicheskaya st., 1**e-mail: stoev@kipt.kharkov.ua**Received March 30, 2015*

Acoustic emission (AE) of magnesium alloy WE 43 in process to compress was studied. Typical grain size of alloy was between 3-25 microns. AE parameters (activity, total number of impulses, average amplitude) were analyzed in correlation with deformation curves. It was shown that yield stress at compressing WE43 alloy with different grain size is in good agreement with Hall-Petch relationship. Acoustic emissions started at stress significantly lower than macroscopic yield stress. Maximum of curve activity AE coincide to the value of macroscopic yield stress. The increase of grain size leads to the both rise of AE activity so and average amplitude impulse. The increase of number of high-amplitude signals in spectrum AE was detected also. It was suggested that the rising share of high-amplitude impulses in spectrum AE with grain growth was associated with increase in the numbers of starts moving pile-ups of dislocations and twinning in individual grains.

KEYWORDS: magnesium alloys, compression, mechanical properties, acoustic emission, deformation mechanisms**ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ СПЛАВУ МАГНІЮ****І.І. Папіров, П.І. Стоєв, О.І. Пікалов, Т.Г. Ємлянінова***Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»**Україна, 61108, Академічна, 1*

Вивчена акустична емісія (АЕ) магнієвого сплаву WE43 з розміром зерна від 3 до 25 мкм при деформації тисненням. Проаналізовано особливості зміни параметрів АЕ (активності, загальної кількості імпульсів, середньої амплітуди імпульсів) у взаємозв'язку з кривими деформації матеріалу. Встановлено, що межа плинності сплаву WE43 з різним розміром зерна при випробуванні на тиснення підпорядковується співвідношенню Холла-Петча. Акустична емісія починається при напруженнях вдвічі нижчих за макроскопічної межі текучості, а пік АЕ збігається з макроскопічною межею плинності. При збільшенні розміру зерна спостерігається зростання активності і середньої амплітуди імпульсу АЕ, а також зростання кількості високоамплітудних сигналів в спектрі АЕ. Зроблено припущення, що зростання вкладу високоамплітудних імпульсів АЕ з ростом зерна пов'язано зі збільшенням кількості скупчень дислокацій, що стартують і дублюються в окремих зернах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сплави магнію, деформація тисненням, механічні характеристики, акустична емісія, механізми деформації**ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА МАГНИЯ****И.И. Папи́ров, П.И. Стоев, А.И. Пикалов, Т.Г. Емлянинова***Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»**Украина, 61108, Академическая, 1*

Изучена акустическая эмиссия (АЭ) магниевого сплава WE43 с размером зерна от 3 до 25 мкм при деформировании сжатием. Проанализированы особенности изменения параметров АЭ (активности, общего количества импульсов, средней амплитуды импульсов) во взаимосвязи с кривыми деформации материала. Установлено, что предел текучести сплава WE43 с разным размером зерна при испытании на сжатие подчиняется соотношению Холла-Петча. Акустическая эмиссия начинается при напряжениях вдвое ниже макроскопического предела текучести, а пик АЭ совпадает с макроскопическим пределом текучести. При увеличении размера зерна наблюдается рост активности и средней амплитуды импульса АЭ, а также рост количества высокоамплитудных сигналов в спектре АЭ. Сделано предположение, что рост вклада высокоамплитудных импульсов АЭ с ростом зерна связан с увеличением количества стартующих скоплений дислокаций и дублированием в отдельных зернах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сплавы магния, деформация сжатием, механические характеристики, акустическая эмиссия, механизмы деформации

Акустическая эмиссия при деформации магния изучена недостаточно. Между тем, ее исследование позволяет не только идентифицировать механизмы пластического течения и разрушения материала, но, как мы показали в работе [1], выявлять существенные особенности пластического течения при разных видах деформации, скажем, при простом сжатии или сжатии с изгибом. Целью настоящей работы было сравнительное изучение спектров АЭ магниевого сплава WE43 при сжатии образцов с различной величиной зерна.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исследованного материала были использованы полученные экструзией цилиндрические образцы магниевого сплава WE43. После горячего выдавливания (290°C) с обжатием 56:1 образцы подвергали рекристаллизационным отжигам в разных условиях (таблица). Размер зерна, d определяли микроскопически

методом секущей, варьировался в интервале 3-25 мкм. Испытанные цилиндрические заготовки имели диаметр 4мм и высоту 6мм. В таблице представлены данные о параметрах термообработки, размере зерна сплава и пределе текучести на сжатие.

Таблица

Условия отжига, средний размер зерна и предел текучести исследованных образцов				
Температура отжига, °С	280	340	405	430
Продолжительность отжига, ч	1	1	1	1
Средний размер зерна, мкм	3,0	5,7	11,4	25,0
Предел текучести, МПа	220	145	114	90

Испытания образцов на сжатие 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 5мкВ. Уровни амплитудной дискриминации каналов составляли 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прежде всего выяснено, что предел текучести исследованных материалов (таблица) удовлетворительно описывается соотношением Холла-Петча (рис. 1):

$$\sigma_T = \sigma_{от} + K_T \cdot d^{-1/2},$$

где $\sigma_{от}$ и K_T — постоянные материала: $\sigma_{от} = 2,35 \text{ МПа}$, $K_T = 379,27 \text{ МПа} \cdot \text{мкм}^{1/2}$.

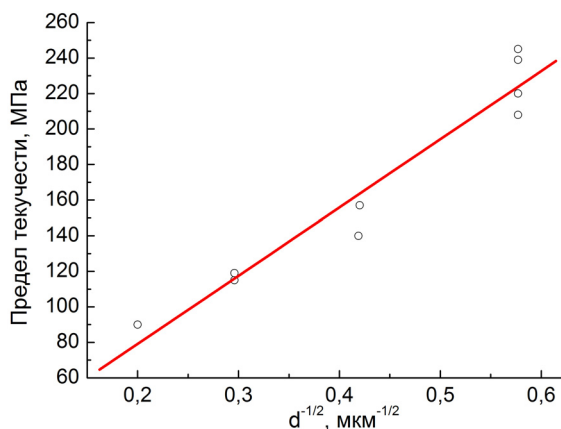


Рис. 1. Зависимость предела текучести исследованных материалов от размера зерна

На рис. 2. в качестве примера представлены кривая деформации и активность АЭ при сжатии образцов сплава WE43 с размером зерна 5,7 мкм. Видно, что АЭ начинается при напряжениях ниже (приблизительно в два раза) макроскопического предела текучести, а пик АЭ совпадает с макроскопическим пределом текучести. При этом на установившейся стадии пластического течения активность АЭ падает практически до нуля. 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, то есть в области микродеформаций. Подобный эффект мы неоднократно наблюдали на многих металлах, а в этой работе — на магниевом сплаве.

При достижении макроскопического предела текучести наблюдается процесс коллективного движения дислокаций, а на кривой активности АЭ, как правило, возникает максимум (рис. 2). Дальнейший спад активности АЭ обусловлен стационарным движением дислокаций, при котором не возникают волны

напряжений, ответственные за появление АЭ [2]. На стадии установившегося дислокационного движения при растяжении или сжатии материала АЭ падает до нуля (рис. 2).

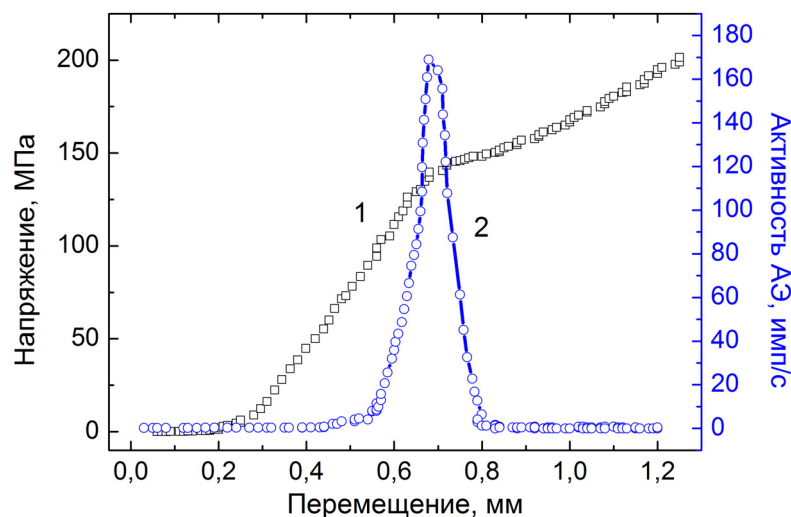


Рис. 2. Кривая деформации (1) интегральная активность АЭ (2) при сжатии образцов сплава WE43 с размером зерна 5,7 мкм

Хотя характер зависимостей активности АЭ при сжатии образцов с разным размером зерна сохраняется подобным показанному на рис. 2, количественные характеристики АЭ существенно зависят от размера зерна. Для иллюстрации этого на рис. 3-5 показаны зависимости активности сигналов АЭ различной амплитуды (канал 2 – низкая, канал 4 – средняя и канал 8 – высокая амплитуда) для образцов с размером зерен соответственно 3, 11,4 и 25 мкм.

Обращаем внимание на следующие отличительные особенности спектров АЭ при испытании образцов с разным размером зерна:

1. Активность АЭ возрастает с ростом размера зерна от 3 до 25 мкм в 6 раз — от ~10.000 до ~60.000 импульсов;

2. В зависимости от размера зерна существенно меняется соотношение низко- и высокоамплитудных импульсов: в частности, соотношение активности по 2, 4 и 8 каналам АЭ составляет, соответственно:

>650:240:30 для образцов с $d=25$ мкм,

450:40:5 для образцов с $d=11,4$ мкм,

40:10:3 для образцов с $d=3$ мкм.

3. Наблюдается тенденция роста абсолютных величин регистрируемой активности АЭ и средней амплитуды импульсов АЭ с увеличением размера зерна (см. рис. 6, на котором приведена средняя амплитуда импульсов АЭ для образцов с указанными размерами зерна).

Иными словами, структура спектров и, следовательно, доминирующих процессов во многом определяется структурой материала. Фактически наблюдаются две тенденции, проявляемые с ростом зерна исследованного материала:

1. Рост интегральной активности АЭ;

2. Рост вклада высокоамплитудных импульсов АЭ с ростом зерна.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как мы уже отмечали [1], спектры АЭ, регистрируемые при пластической деформации, помогают разобраться с механизмами протекающих при этом процессов. В частности, рост вклада высокоамплитудных импульсов с ростом зерна связан с тем, что стартующие скопления дислокаций, приводящие к образованию АЭ, тем больше, чем больше размер зерна, и поэтому в крупнозернистых материалах средняя амплитуда сигнала должна увеличиваться (рис. 6). Но, как оказывается, это не единственная причина увеличения вклада высокоамплитудных импульсов: исследование микроструктуры деформированных образцов с размером зерна 25 мкм выявило наличие двойникования в отдельных благоприятно ориентированных для двойникования зернах, причем, как видно из микрофотографии рис. 7, двойникование часто локализовано в пределах одного зерна.

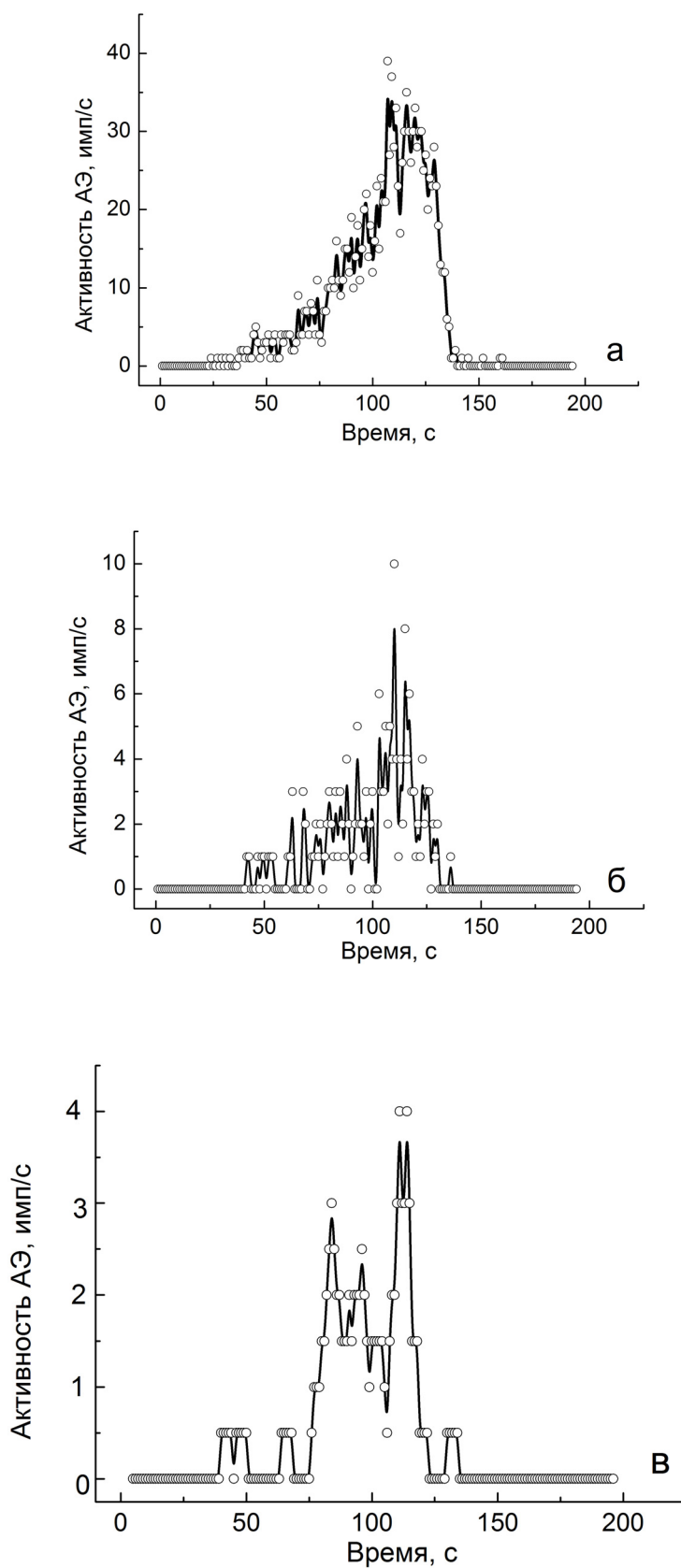


Рис. 3. Спектры активности АЭ при сжатии сплава WE43 с размером зерна 3 мкм
а - низкоамплитудные, б – среднеамплитудные и в – высокоамплитудные импульсы АЭ (2, 4 и 8 каналы спектрометра соответственно)

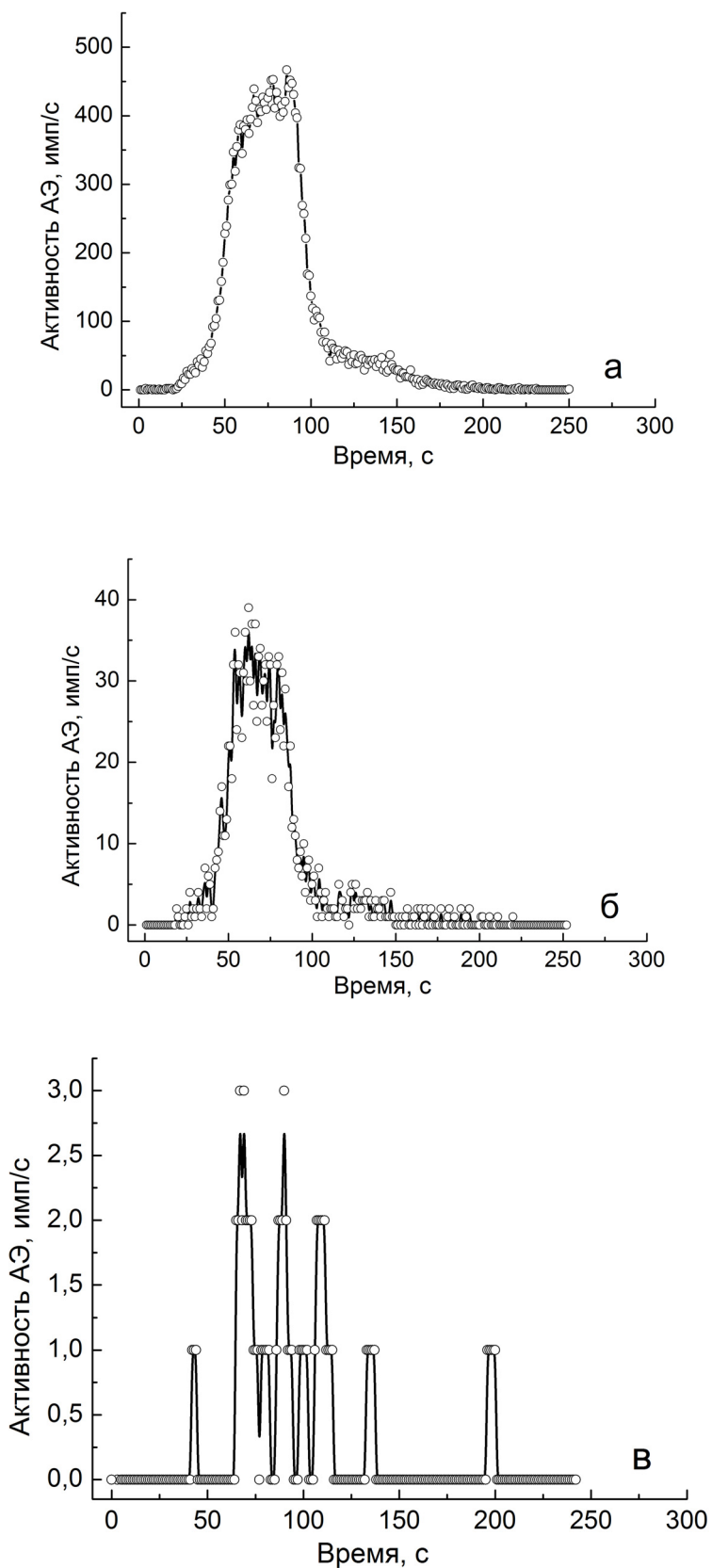


Рис. 4. Спектры активности АЭ при сжатии сплава WE43 с размером зерна 11,4 мкм
 а - низкоамплитудные, б – среднеамплитудные и в – высокоамплитудные импульсы АЭ (2, 4 и 8 каналы спектрометра соответственно)

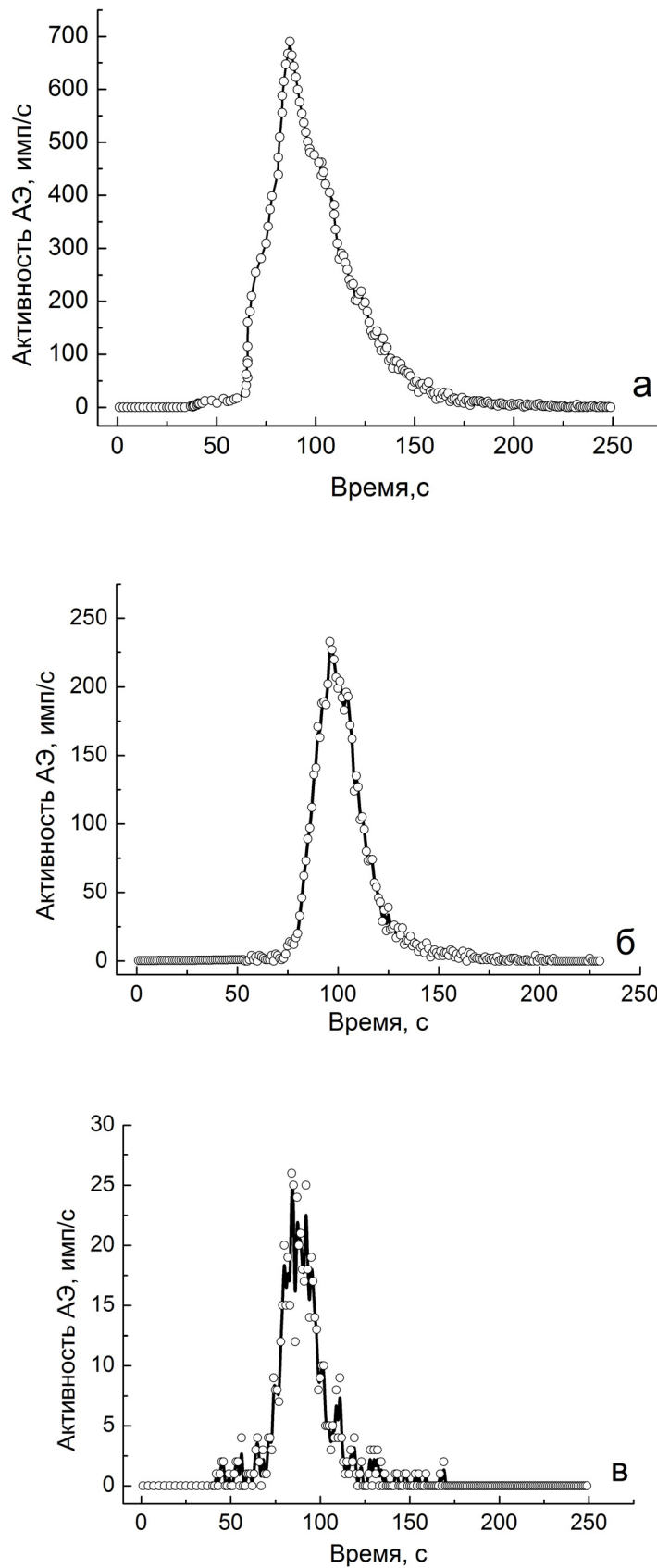


Рис. 5. Спектры активности АЭ при сжатии сплава WE43 с размером зерна 25 мкм
а - низкоамплитудные, б – среднеамплитудные и в – высокоамплитудные импульсы АЭ (2, 4 и 8 каналы спектрометра соответственно)

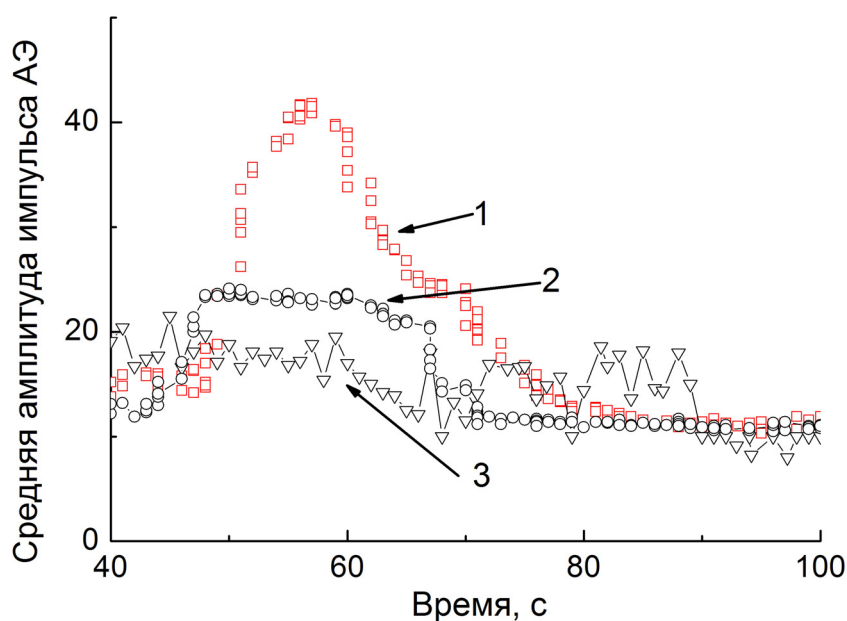


Рис. 6. Средняя амплитуда импульсов АЭ при сжатии образцов сплава WE43 с разным размером зерна: кривая 1 — $d=25,0$ мкм, кривая 2 — $d=11,4$ мкм, кривая 3 — $d=3,0$ мкм

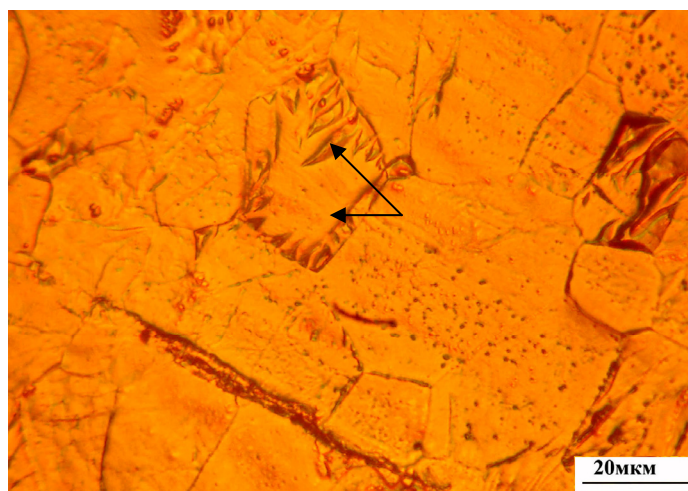


Рис. 7. Микрофотография структуры образца с $d=25$ мкм после сжатия на 10% при комнатной температуре (стрелками показаны двойники в отдельном благоприятно ориентированном для двойникования зерне)

Двойники же, как макроскопические образования, обычно приводят к появлению именно высокоамплитудных импульсов АЭ.

Что касается роста интегральной активности АЭ по мере увеличения размера зерна, то мы не исключаем, что это связано с инструментальным эффектом. Ранее авторы показали, что при пластическом течении ультрамелкозернистых материалов АЭ исчезает, точнее — не регистрируется [3,4]. Это может быть связано с двумя факторами: во-первых, при малых размерах зерен амплитуда акустического сигнала становится ниже минимального порога регистрации; во-вторых, это может происходить из-за специфического механизма пластического течения при сверхпластичности, когда резко увеличивается вклад диффузионных процессов. Есть и другая инструментальная причина уменьшения активности низкоамплитудных импульсов АЭ по 1-му каналу акустического спектрометра: дело в том, что при очень высокой активности, превышающей разрешающую способность комплекса счетчик «захлебывается» и перестает регистрировать количество таких импульсов. Такой эффект мы нередко замечали именно при пластической деформации мелкозернистых материалов, когда удавалось зарегистрировать лишь восходящую и нисходящую ветви кривой, но не максимум на ней.

ВЫВОДЫ

1. Предел текучести сплава WE43 с разным размером зерна при испытании на сжатие подчиняется соотношению Холла-Петча.
2. При испытаниях сплава на сжатие АЭ начинается при напряжениях существенно ниже макроскопического предела текучести, а пик АЭ совпадает с макроскопическим пределом текучести.
3. Интегральная активность АЭ при испытаниях на сжатие сплава WE43 возрастает с ростом размера зерна от 3 до 25 мкм в 6 раз — от ~10.000 до ~60.000 импульсов. Увеличивается также средняя амплитуда импульсов АЭ.
4. При увеличении размера зерна у испытываемых сжатием образцов сплава магния WE43 существенно растут абсолютные значения активности регистрируемых сигналов АЭ и величина средней амплитуды импульсов АЭ. Чем больше размер зерна у материала, тем больше наблюдается высокоамплитудных импульсов в амплитудном спектре АЭ.
5. Предполагается, что рост вклада высокоамплитудных импульсов АЭ с ростом зерна связан с увеличением стартовых скоплений дислокацией и двойникованием в отдельных зернах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Papirov I.I., Stoev P.I., Pikalov A.I., Emljaninova T.G. Vliyaniye vida deformatsii na akusticheskuyu emissiyu magniya // DAN Ukrainy.– 2015.–No. 3.– S.36-43.
2. Greshnikov V.A., Drobot Ju. B. Akusticheskaya emissiya. - M.: Izd-vo standartov, 1976.– 272 s.
3. Papirov I.I., Karpov E.A., Mileshekin M.B., Palatnik M.I. Ischeznovenie akusticheskoy emissii pri sverhplastichnosti // DAN SSSR.– 1981.– T. 256. – No.2.– s.392–394.
4. Papirov I.I., Karpov E.A., Mileshekin M.B., Palatnik M.I. Ischeznovenie akusticheskoy emissii pri sverhplasticheskoy deformatsii splavov Zn—0,4%Al i Pb—38%Sn // FMM.–1982.– T. 53. – No. 2.– S.581–586.