

Влияние структуры свинцового сплава на акустическую эмиссию при пластической деформации и разрушении

Д.С. Салита¹, В.В. Поляков^{1,2}

¹Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Influence of Lead Alloy Structure on Acoustic Emission During Plastic Deformation and Fracture

D.S. Salita¹, V.V. Polyakov^{1,2}

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

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

Проведено исследование акустической эмиссии, развивающейся при статическом растяжении свинцового сплава. Образцы для испытаний изготавливались с различной дендритной структурой, характеризовавшейся разными размерами кристаллитов. В результате экспериментов были измерены изменения среднеквадратичных напряжений акустической эмиссии в процессе пластической деформации и разрушения. Обнаружены и описаны максимумы этой величины, возникавшие при смене стадий деформационного упрочнения. Выявлено существенное влияние структуры материала на характеристики акустического излучения, проявившееся в изменении вида акустико-эмиссионных кривых при переходе от крупнозернистой структуры к мелкозернистой. Установленные различия могут быть связаны со сменой вкладов доминирующих механизмов пластической деформации при изменении размера кристаллитов, формирующих дендритную структуру.

Полученные результаты могут быть использованы для исследования эволюции процессов пластической деформации и разрушения в сплавах на основе свинца. Они также создают научные предпосылки для применения метода акустической эмиссии при диагностике структуры свинцовых сплавов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, диагностика материалов, структура, разрушение, пластическая деформация, свинцовые сплавы.

DOI 10.14258/izvasu(2017)1-09

Введение. Пластическая деформация и разрушение структурно-неоднородных материалов сопровождается генерацией акустического излучения. Физические механизмы этого излучения

A study of acoustic emission during static stretching of lead alloy samples is presented. Test samples with various dendritic structures characterized by different sizes of the crystallites have been prepared. The values of RMS acoustic emission voltage during the process of plastic deformation and fracture are measured. Peak values occurred during the changing of strain hardening stages are discovered and analyzed. A significant influence of a sample structure on acoustic emission parameters manifests in changes of forms of acoustic emission curves for a set of samples with coarse-grained to fine-grained structures. Revealed differences may be associated with the change of plastic deformation dominant mechanisms and their contribution due to changes of dendritic structure crystallites sizes.

The obtained results can be further utilized in a study of plastic deformation and failure processes evolutions in the lead-based alloys. They also provide a scientific background for application of acoustic emission technique for investigating of lead alloys structure.

Key words: acoustic emission, diagnostic materials, structure, fracture, plastic deformation, lead alloys.

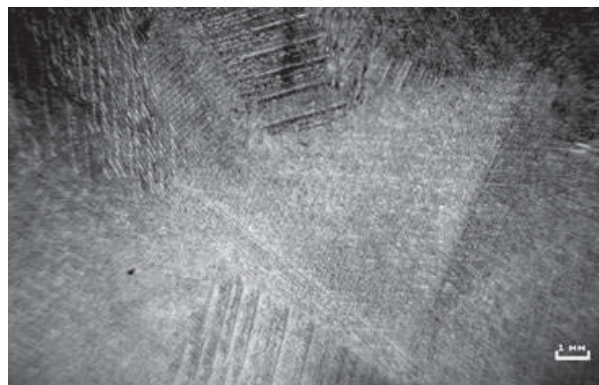
связаны с динамической локальной перестройкой внутренней структуры материала за счет формирования и движения ансамблей различных дефектов — выходящих на границы раздела потоков дис-

локаций, скачков микротрещин и т.д. Выявление зависимостей между регистрируемыми в эксперименте характеристиками акустической эмиссии и развивающимися деформационными процессами представляет фундаментальный интерес и позволяет создать эффективный метод диагностики процессов структурной перестройки, прежде всего — предразрушения и разрушения [1-3]. В то же время одновременное действие различных конкурирующих механизмов, обуславливающих акустическую эмиссию, и разных источников излучения значительно затрудняет идентификацию происходящих при нагружении материала процессов [4-6]. Значительный интерес в этой связи представляет изучение особенностей акустической эмиссии в свинце и сплавах на его основе. Эти материалы могут рассматриваться в качестве удобных модельных объектов, поскольку низкая температура плавления и ряд других свойств обеспечивают формирование в диапазоне комнатных температур механизмов деформации, возникающих в других металлах и сплавах только при высоких температурах. Основные физические закономерности пластической деформации свинцовых сплавов с различной структурой и разным химическим составом подробно изучены в работах В.Е. Панина и Н.Ф. Елсуковой с сотрудниками [7-9]. В работе проводится исследование особенностей акустической эмиссии при пластической деформации свинцового сплава.

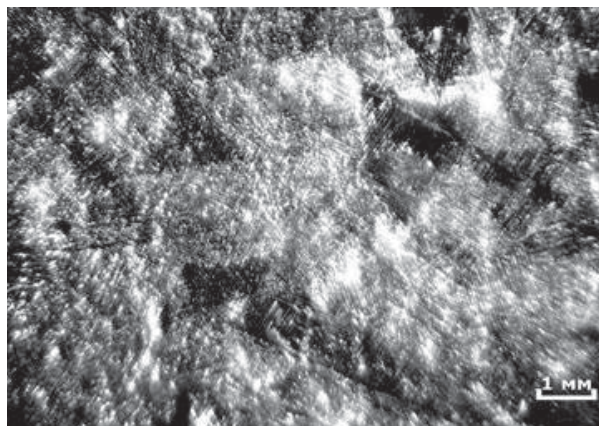
Материалы и эксперимент. В качестве материалов для исследований использовались образцы свинцового сплава с различной структурой, которая специально задавалась путем изготовления при разных термических условиях рекристаллизации из расплава за счет варьирования температуры и времени рекристаллизации. Химический состав сплава, контролировавшийся с помощью рентгено-флуоресцентной спектроскопии, представлен в таблице. Относительно высокое процентное содержание легирующих добавок обеспечивало значительный рост механических свойств и расширяло области практического использования материала. Полученная микроструктура имела характерный дендритный вид, количественные значения размеров дендритных зерен оценивались с помощью оптической микроскопии. Испытания непосредственно проводились для двух групп образцов с разными средними размерами кристаллитов R : с относительно малыми значениями $R \sim 0,1 \dots 1$ мм и с большими зернами с $R \sim 5 \dots 10$ мм. Типичные изображения структуры образцов, полученные на оптическом микроскопе, приведены на рисунке 1а, б. На рисунке 1а хорошо просматриваются плоские границы раздела, на рисунке 1б поверхность этих границ искажена.

Химический состав свинцового сплава

Элемент	Концентрация
Pb	89,1%
Sb	5,1%
Cd	3,2%
Ga	1,8%
Cu	0,3%
Fe	0,3%



а



б

Рис. 1. Структура свинцового сплава:

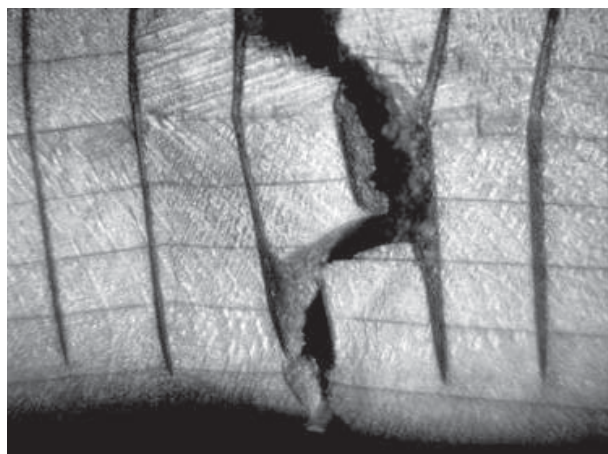
а — крупнозернистый материал,

б — мелкозернистый материал

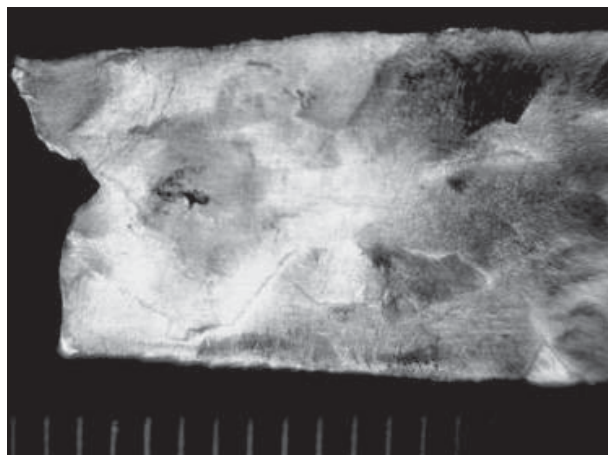
Полученные образцы имели стандартную форму для испытаний на растяжение с размером рабочей части $8 \times 12 \times 55$ мм. Они подвергались нагружению на установке механических испытаний с регистрацией приложенной нагрузки F и абсолютной деформации. Одновременно по методике [10, 11] проводились измерения среднеквадратичного значения напряжения U , характеризовавшего энергию акустической эмиссии. Результаты измерений представлялись в виде зависимостей нагрузки F и напряжения U от времени t . Кроме того, для отдельных образцов на поверхность процарапыванием наносилась сетка с шагом ~ 1 мм. На характерных участках кривой деформационного

упрочнения растяжение этих образцов прерывалось и осуществлялись измерения параметров деформационной структуры.

Результаты эксперимента. Растяжение образцов проводилось в интервале вплоть до полного разрушения. Образование и вид магистральных трещин, распространение которых вызывает разрушение, иллюстрирует рисунок 2а (крупнозернистый материал). Из данного рисунка следует, что нанесенная сетка отчетливо изгибается на границах между отдельными кристаллитами, что свидетельствует о движении зерен друг относительно друга как целого. Трещина распространяется по сложной поверхности, проходящей преимущественно по внутренним границам раздела, но на отдельных участках захватывающих объем кристаллита. Типичный вид образца с крупными зернами после разделения на две части приведен на рисунке 2б. Видно, что поверхность разрушения имеет достаточно сложный вид, характерный скорее для вязкого разрушения, при этом на рабочей части образца за счет прошедшей деформации выделились участки с крупными зернами.



а



б

Рис. 2. Деформация свинцового сплава при растяжении:
а – магистральные трещины,
б – образец после разрушения

Результаты измерений характеристик акустической эмиссии в сопоставлении с кривыми нагружения приведены на рисунке 3 (мелкозернистая структура) и рисунке 4 (крупнозернистая структура). Из рисунков 3 и 4 следует, что кривые нагружения $F(t)$ имеют качественно одинаковый вид, отражающий двухстадийный характер растяжения. Отчетливо выделяются два участка с существенно разными значениями коэффициента деформационного упрочнения, разделяемые при значениях деформации, соответствующей пределу текучести. Видно также, что материал с мелкозернистым строением обладает более высокими механическими характеристиками – пределом прочности и предельно достижимой деформацией.

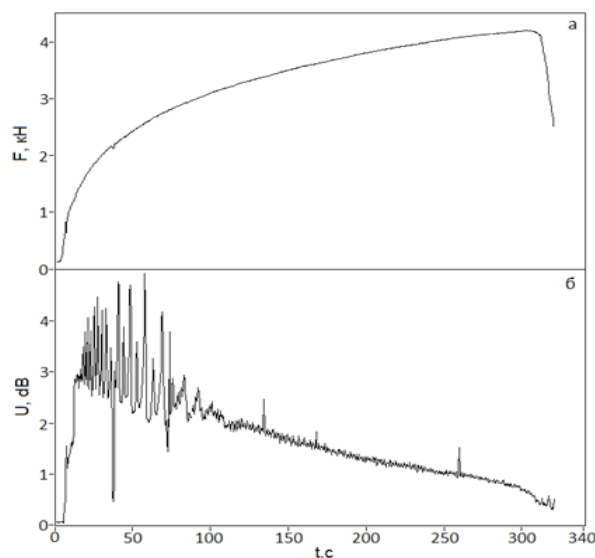


Рис. 3. Акустическая эмиссия
в крупнозернистом свинцовом сплаве:
а – кривая нагружения, б – акустической эмиссии

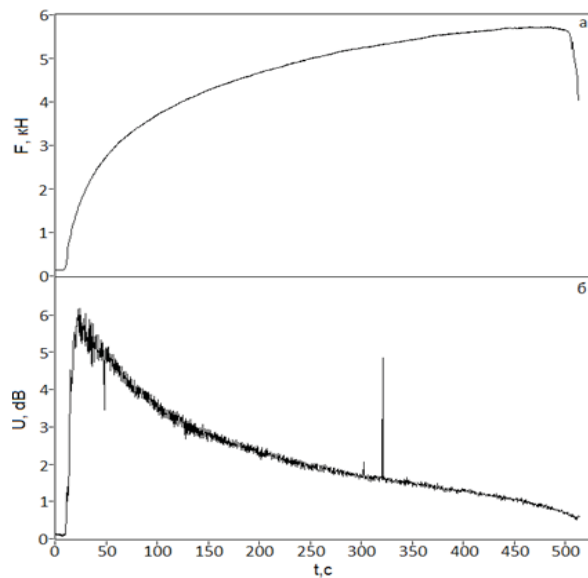


Рис. 4. Акустическая эмиссия
в мелкозернистом свинцовом сплаве:
а – кривая нагружения, б – акустической эмиссии

Для кривых акустической эмиссии $U(t)$, приведенных на нижних частях рисунков 3 и 4, характерны максимумы на участке, соответствующем пределу текучести. После прохождения этого участка кривые монотонно спадают. Как видно на рисунках 3 и 4, выявляется существенное влияние структуры материала на вид акустического излучения. То есть переходу от одной стадии упрочнения к другой в случае крупнозернистого материала соответствует группа мощных максимумов, медленно спадающих с ростом деформации. В случае мелкозернистого материала максимумы слабо выражены и при росте деформации быстро исчезают. Такое различие в поведении акустического излучения может быть обусловлено разным вкладом зернограничного проскальзывания в деформацию свинцового сплава. Этот вклад, согласно [8, 9], является доминирующим на начальной стадии пластической деформации и постепенно уменьшается с ее ростом. Максимумы акустической эмиссии могут быть связаны с выходом на границы раздела зернограничных дислокаций. В случае мелких зерен плотность тройных стыков относительно велика, а поскольку именно эти стыки являются основными барьерами при движении зернограничных дислокаций, то это движение затруднено и сопровождается слабыми максимумами

акустического излучения. Для крупных зерен плотность тройных стыков мала, в связи с чем величина зернограничного проскальзывания выше, движение зернограничных дислокаций проходит более интенсивно и сопровождается более мощными максимумами акустической эмиссии. Отметим, что эта ситуация качественно аналогична поведению акустической эмиссии при росте пористости в пористом металле, в котором залегание пор в местах расположения тройных стыков сопровождается уменьшением их плотности и ростом акустической эмиссии [10]. Спад акустической эмиссии при дальнейшем росте пластической деформации может быть обусловлен увеличением относительного вклада в пластическую деформацию внутриверных процессов [12], не сопровождающихся мощным акустическим излучением.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии параметров дендритной структуры свинцового сплава на характеристики акустической эмиссии. Анализ измеряемых параметров акустического излучения создает возможности для контроля структуры, а также исследования эволюции процессов пластической деформации и разрушения в сплавах на основе свинца.

Библиографический список

1. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М., 2008.
2. Yang L., Zhou Y.C., Mao W. G., Lu C. Real-time acoustic emission testing based on wavelet transform for the failure process of thermal barrier coatings // *Applied Physics Letters*. — 2008. — Vol. 93. — Issue 23.
3. Ferreira D.B.B., Da Silva R.R., Rebello J.M.A., Siqueira M.H.S. Failure mechanism characterisation in composite materials using spectral analysis and the wavelet transform of acoustic emission signals // *Insight*. — 2004. — Vol. 46. — Issue 5.
4. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. — Ростов н/Д, 2008.
5. Егоров А.В., Поляков В.В. Применение метода акустической эмиссии к исследованию деформационного поведения структурно-неоднородных материалов. — Барнаул, 2008.
6. Shahri M.N., Jalal Yousefi J., Fotouhi M., Najfabad M.A. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // *Journal of Composite Materials*. — 2015. — Vol. 50. — Issue 14.
7. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Елсукова Т.Ф. Физическая мезомеханика зернограничного скольжения в деформируемом поликристалле // *Физическая мезомеханика*. — 2011. — Т. 14.
8. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Панин А.В., Кузина О.Ю., Кузнецов П.В. Мезоскопические структурные уровни деформации в поверхностных слоях и характер усталостного разрушения поликристаллов при знакопеременном изгибе. Часть I. Мезоскопическая субструктура // *Физическая мезомеханика*. — 2004. — Т. 7.
9. Елсукова Т.Ф., Новоселова Е.М., Караваева В.В., Ангелова Г.В. Стадии высокотемпературной ползучести поликристаллов свинца как эволюция структурных уровней пластической деформации // *Физическая мезомеханика*. — 2000. — Т. 3.
10. Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н. Исследование особенностей акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении пористых металлов // *Дефектоскопия*. — 2001. — № 9.
11. Поляков В.В., Егоров А.В., Салита Д.С., Колубаев Е.А. Методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах. Часть 2. Акустическая эмиссия // *Известия АлтГУ*. — 2015. — Вып. 1/1. DOI:10.14258/izvasu(2015)1.1-08
12. Lependin A.A., Polyakov V.V. Scaling of the Acoustic Emission Characteristics during Plastic Deformation and Fracture. *Technical Physics*. — 2014. — Vol. 59, № 7.