

05.1

Нарушение эффекта Кайзера при нагружении эвтектических сплавов системы Pb—Sn

© Д.С. Салита¹, В.В. Поляков^{1,2}¹ Алтайский государственный университет,
Барнаул, Россия² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томск, Россия
E-mail: d.s.salita@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 марта 2020 г.

В окончательной редакции 10 марта 2020 г.

Принято к публикации 10 июня 2020 г.

Исследована акустическая эмиссия при механическом нагружении сплавов системы Pb—Sn. Выявлено, что при концентрациях компонентов, приводящих к формированию эвтектической структуры, эффект Кайзера при повторном нагружении материала не наблюдается. Предложено объяснение отсутствия акустоэмиссионной памяти в эвтектических сплавах на основе свинца, основанное на специфическом характере пластического течения, осуществляющегося за счет движения как целого колоний эвтектических α - и β -фаз по общим границам раздела.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, эффект Кайзера, эвтектические сплавы.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.18.49994.18278

При повторном нагружении различных материалов наблюдается явление, согласно которому акустическая эмиссия, формирующаяся при локальных перестройках структуры, регистрируется только после превышения уровня предыдущей нагрузки. Это явление получило название эффекта Кайзера [1]. В случае металлических материалов этот эффект отражает необратимость процесса пластического течения. Существенный интерес представляет изучение акустоэмиссионного эффекта памяти для такого специфического класса материалов, как эвтектические сплавы на основе свинца. Соединения системы Pb—Sn с различными концентрациями компонентов активно используются в качестве припоев в электронных устройствах, в том числе в космической и авиационной технике, где в процессе эксплуатации подвергаются значительным переменным нагрузкам [2–4]. Изменение концентрации компонентов приводит к качественным изменениям в структуре и, как следствие, влияет на механические свойства [5]. Исследование эффекта Кайзера позволяет выявить предысторию деформационного поведения материалов и элементов конструкций на основе эвтектических свинцовых сплавов при циклических нагрузках и установить особенности формирования их упругих и пластических свойств. Цель настоящей работы — исследование акустической эмиссии при повторном нагружении свинцово-оловянных эвтектических сплавов.

В качестве материалов для испытаний применялись образцы, полученные путем рекристаллизации из расплава свинец—олово. Полученный расплав отливался в разогретую до 200°C форму и охлаждался со скоростью $\sim 8^\circ\text{C}/\text{h}$. После охлаждения проводилась гомогениза-

ция материала при температуре 160°C в течение 48 h. Образцы имели стандартную форму для испытаний на статическое растяжение с размером рабочей части $50 \times 10 \times 5 \text{ mm}$. Концентрации компонентов задавались таким образом, чтобы отразить основные области диаграммы состояния системы Pb—Sn, а именно были исследованы сплавы со следующим составом (в весовых процентах): 99% Pb—1% Sn, имевшие структуру α -фазы; 50% Pb—50% Sn, обладавшие доэвтектическим строением; 38.1% Pb—61.9% Sn, соответствовавшие концентрациям в точке эвтектики.

Нагружение образцов проводилось на установке для механических испытаний при комнатной температуре по „жесткой“ схеме. Скорость растяжения составляла 4.5%/min, что исключало влияние ползучести, проявлявшейся у данных материалов уже при комнатной температуре [2,3]. В процессе испытаний регистрировались приложенная нагрузка, по которой рассчитывались условные напряжения σ , и перемещение захватов, по которому рассчитывалась условная деформация образца ϵ . При достижении определенных нагрузок процесс растяжения прерывался и исследовалась деформационная микроструктура материала. Для ее анализа на поверхность образца наносилась процарапыванием реперная сетка. Акустико-эмиссионные сигналы регистрировались на автоматизированной установке с частотой дискретизации 2.5 MHz в частотном интервале от 50 до 500 kHz по методике [6,7]. В качестве информативного параметра, характеризующего акустическую эмиссию, применялось среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии U . Полученные экспериментальные данные

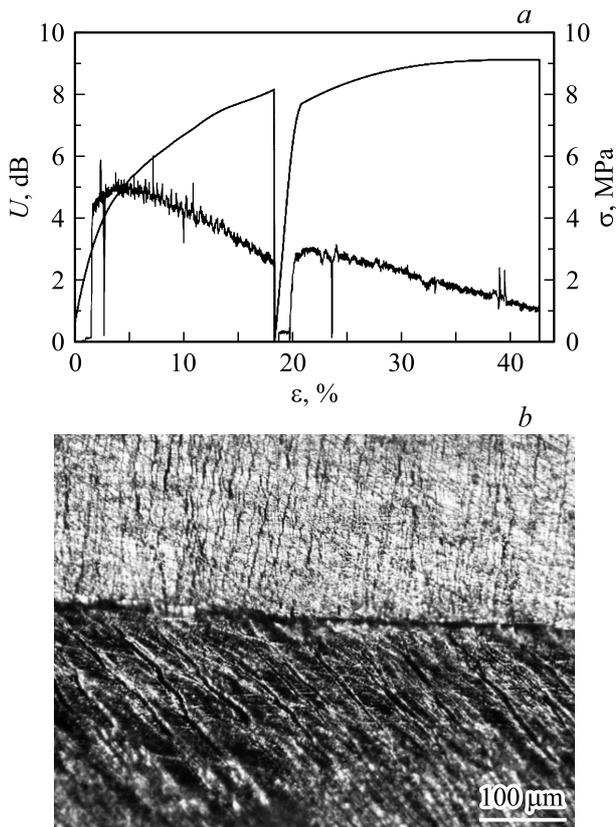


Рис. 1. Акустическая эмиссия при пластической деформации сплава 99% Pb–1% Sn. *a* — акустическая эмиссия и кривые нагружения, *b* — деформационная структура, $\epsilon = 18\%$.

представлялись в виде зависимостей величин σ и U от деформации ϵ .

На рис. 1, *a* приведены кривые нагружения и акустическая эмиссия сплава 99% Pb–1% Sn. При деформации $\epsilon = 18\%$ нагружение прерывалось и проводилась разгрузка, после чего растяжение продолжалось вплоть до разрушения образца. Из рис. 1, *a* следует, что на стадии повторного нагружения акустическое излучение фиксируется только после достижения предшествующего максимального напряжения σ , т.е. наблюдается эффект Кайзера. Это обусловлено тем, что пластическая деформация осуществляется за счет движения дислокаций в объеме зерен. Как показывает рис. 1, *b*, во внутризеренных областях происходит интенсивное скольжение дислокаций. При высоких деформациях плотность дислокаций резко возрастает, и они начинают тормозить друг друга. В силу этого акустическая эмиссия на начальном участке повторного нагружения не регистрируется до тех пор, пока упругие напряжения внутри материала не позволят преодолеть тормозящее действие возникших дислокационных барьеров [8].

На рис. 2 представлены экспериментальные данные для сплава 50% Pb–50% Sn с доэвтектоидной структурой. Как следует из рис. 2, *a*, наблюдается качественно иной вид акустического излучения: после каждой из по-

следовательных разгрузок при $\epsilon = 9$ и 22% наблюдается мощная акустическая эмиссия на начальном этапе повторного нагружения задолго до достижения уровня предшествующей нагрузки. Это означает, что эффект Кайзера для данного материала нарушается. С целью выяснения физической природы такого нарушения была исследована деформационная микроструктура образцов. Как видно из рис. 2, *b*, эта микроструктура представлена колониями эвтектических прослоек [9,10], образованных α - и β -фазами, с изолированными включениями α -фазы. Существенно, что линия реперной сетки внутри эвтектических колоний практически не искривляется, в то же время наблюдается разрыв линии на границе раздела между соседними колониями. Это означает, что в отличие от случая сплава 99% Pb–1% Sn пластическое течение осуществляется не за счет движения дислокаций в объеме зерен, а за счет движения эвтектических колоний как целого по границам раздела между этими колониями. В силу отсутствия дислокационного торможения такое движение возобновляется сразу же после повышения нагрузки и проявляется в виде акустического излучения на начальной стадии повторного нагружения. Полученный результат качественно аналогичен извест-

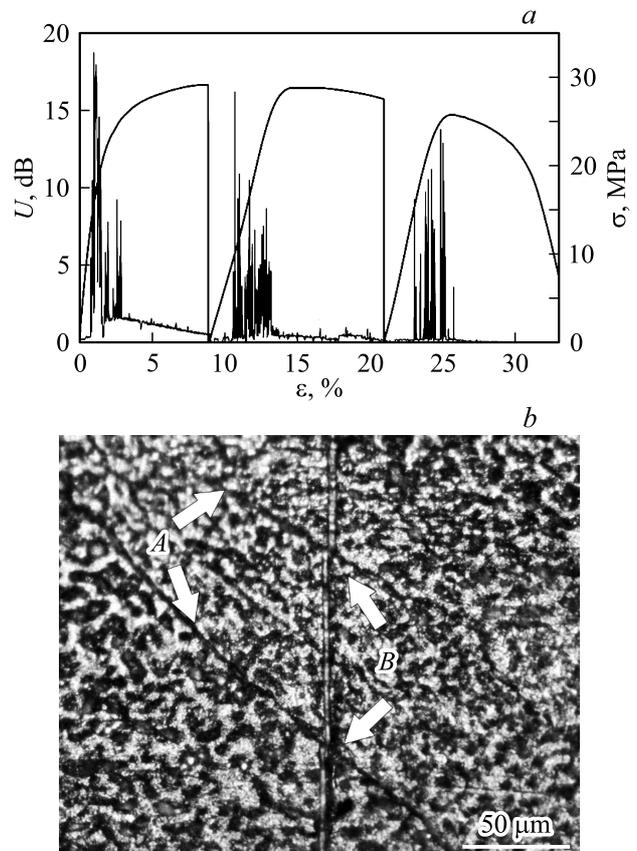


Рис. 2. Акустическая эмиссия при пластической деформации сплава 50% Pb–50% Sn. *a* — акустическая эмиссия и кривые нагружения, *b* — деформационная структура, $\epsilon = 9\%$. *A* — границы между эвтектическими колониями, *B* — разрыв реперной линии.

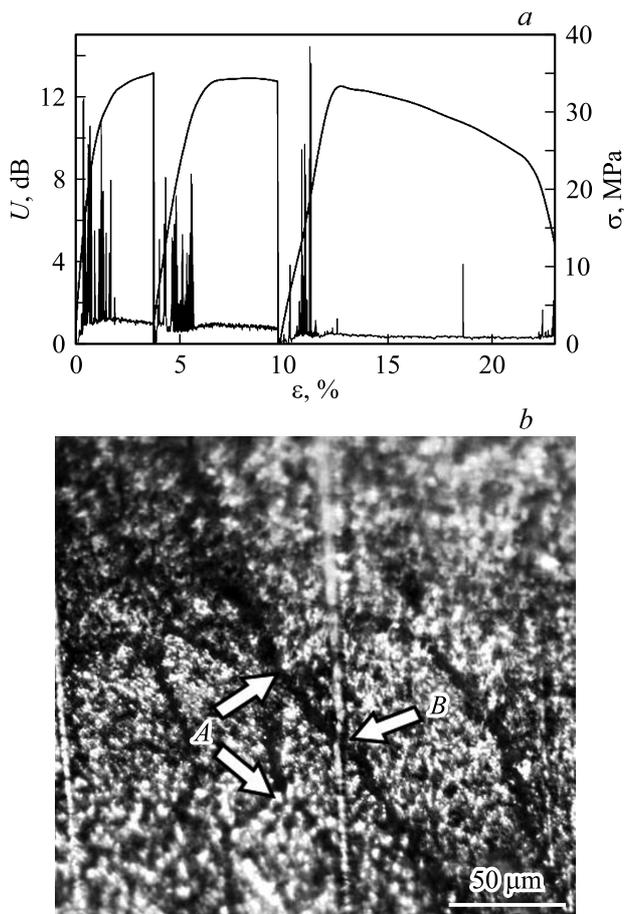


Рис. 3. Акустическая эмиссия при пластической деформации сплава 38.1% Pb–61.9% Sn. *a* — акустическая эмиссия и кривые нагружения, *b* — деформационная структура, $\epsilon = 10\%$. *A* — границы между эвтектическими колониями, *B* — разрыв реперной линии.

ному нарушению эффекта Кайзера при трещинообразовании [11], когда повторное повышение нагрузки сразу же сопровождается акустической эмиссией, поскольку сразу происходят новые скачки микротрещин, генерирующие акустические импульсы.

Акустическая эмиссия при деформировании сплава эвтектического состава 38.1% Pb–61.9% Sn приведена на рис. 3. Видно, что экспериментальные результаты на рис. 3, *a* аналогичны представленным на рис. 2, *a* и свидетельствуют о наличии акустического излучения, формирующегося сразу же после повторного нагружения. Это означает, что для сплава с эвтектической структурой также имеет место нарушение эффекта Кайзера. Анализ деформационной микроструктуры, изображенной на рис. 3, *b*, подтверждает отсутствие пластического течения внутри эвтектических колоний из прослоек α - и β -фаз и показывает, что имеет место, как и в предыдущем случае, их скольжение как целого по границам раздела.

Таким образом, формирование в сплавах системы Pb–Sn фаз эвтектического состава приводит к наруше-

нию эффекта Кайзера. Такое нарушение может быть обусловлено особенностью пластического течения эвтектических сплавов, выражающейся в движении как целого колоний из эвтектических прослоек α - и β -фаз по границам раздела между колониями.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Бакай А.С., Бакай С.А., Михайловский И.М., Неклюдов И.М., Стоев П.И., Махт М.-П. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 76. В. 4. С. 254–257.
- [2] Liu Y.-C., Wang W.-W., Jia F.-R., Zhu Z.-H., Long X. // Int. Conf. on computational, modeling, simulation and mathematical statistics (CMSMS 2018). Xi'an, China, 2018. P. 370–374.
- [3] Long X., Liu Y., Yao Y., Jia F., Zhou C., Fu Y., Wu Y. // AIP Adv. 2018. V. 8. P. 085001 (1–12).
- [4] Çadirli E., Kaya H., Şahin M. // J. Electron. Mater. 2001. V. 40. P. 1903–1911.
- [5] Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Елсукова Т.Ф. // Физ. мезомеханика. 2011. Т. 14. № 6. С. 15–22.
- [6] Лепендин А.А., Поляков В.В., Салита Д.С. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 9. С. 1–5.
- [7] Salita D.S., Polyakov V.V. // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2051. P. 020263 (1–4).
- [8] Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 276 с.
- [9] Lugon L.P., Figueiredo R.B., Cetlin P.R. // J. Mater. Res. Technol. 2014. V. 3. P. 327–330.
- [10] Lahiri A., Tiwary C., Chattopadhyay K., Choudhury A. // Comput. Mater. Sci. 2017. V. 130. P. 109–120.
- [11] Баранов В.М., Гриценко А.И., Карасевич А.М., Кудрявцев Е.М., Ремизов В.В., Сарычев Г.А. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. М.: Наука, 1998. 304 с.