

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Салиты Даниила Сергеевича

**«Закономерности изменения акустической эмиссии при пластической деформации сплавов Pb-Sn в зависимости от их структуры»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

### Актуальность темы диссертации

Как известно, одним из наиболее эффективных методов исследования нестационарных процессов пластической деформации металлов и сплавов является метод акустической эмиссии. Основные характеристики акустической эмиссии определяются механизмами пластического течения и дают важную информацию об особенностях пластического течения и разрушения материалов. Особый интерес представляет исследование акустической эмиссии в сплавах с эвтектическим строением, характерным примером которых являются сплавы на основе свинца. Сплавы системы Pb-Sn являются удобными модельными объектами для исследования пластической деформации в силу их высокой пластичности, низкой температуры плавления и представляют практический интерес как материалы, широко используемые в современных электронных устройствах. Изменение концентрации компонентов в таких сплавах приводит к значительным качественным изменениям в структуре и, как следствие, в физических механизмах акустической эмиссии деформируемых материалов. В силу сложности и разнообразия этих механизмов закономерности акустического излучения при пластической деформации свинцовых сплавов остаются недостаточно изученными. Это определяет **актуальность** исследования закономерностей акустической эмиссии в сплавах системы Pb-Sn, представленного в диссертационной работе Д.С. Салиты.

### Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Содержание диссертации изложено на 125 страницах текста с 98 рисунками и одной таблицей. Библиографический список содержит 138 источников.

**Во введении** обоснована актуальность исследования, приведены цель и решаемые задачи, сформулированы научная новизна и защищаемые положения, отражена практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе** представлен обзор литературы, в котором рассмотрены основные физические механизмы пластической деформации металлических сплавов, определяющие характер и особенности акустического излучения при статическом нагружении. Описаны основные параметры сигналов акустической



эмиссии. Проанализирована специфика строения и пластической деформации сплавов на основе свинца с различными составами и концентрациями компонентов. На основе анализа литературных данных сформулирована постановка задачи исследования.

**Во второй главе** приведено описание измерительно-вычислительного комплекса для нагружения образцов по схеме одноосного растяжения, измерения механических характеристик и сигналов акустической эмиссии. Обоснована разработанная автором методика проведения испытаний и выбор измеряемых параметров акустической эмиссии. Предложена оригинальная методика обработки сигналов акустической эмиссии, основанная на использовании метода многомерного анализа данных, описан используемый математический аппарат метода главных компонент.

**Третья глава** посвящена описанию результатов исследования акустической эмиссии при деформировании образцов химически чистого свинца и легированного конструкционного свинцового сплава. Экспериментально апробирован предложенный метод обработки сигналов акустической эмиссии. Приведены результаты теоретических расчетов, которые позволили выявить связь между параметрами акустической эмиссии и основными стадиями пластической деформации, в том числе количественно оценить уровни деформации, соответствующих переходам между различными стадиями пластического течения.

**В четвертой главе** представлены результаты измерений акустической эмиссии и механических характеристик сплавов системы Pb-Sn с концентрациями компонентов, охватывающими их максимально возможный диапазон. Для физической интерпретации полученных результатов автором использовано разбиение диаграммы состояния бинарной системы «свинец-олово» на области, качественно различающиеся топологическими особенностями строения. Приведены и подробно проанализированы полученные экспериментальные данные по деформационной структуре свинцово-оловянных сплавов в интервале деформаций от исходного состояния до разрушения. Описаны характерные особенности акустической эмиссии в сплавах с различной структурой. В частности, приведены данные по немонотонному изменению амплитудно-частотных характеристик акустических сигналов при переходе от сплава с доэвтектической структурой к эвтектическому сплаву и далее – к сплаву с заэвтектической структурой. Предложены физические механизмы генерирования акустического излучения на различных стадиях пластического течения исследованных материалов.

**Пятая глава** посвящена исследованию акустико-эмиссионного эффекта памяти, известного в литературе как эффект Кайзера. Установлено, что при повторном нагружении свинцово-оловянных сплавов с эвтектическим строением сигналы акустической эмиссии регистрировались до достижения уровня предшествующей нагрузки в отличие от свинцовых сплавов с низкой

концентрацией олова. Предложен механизм обнаруженного нарушения эффекта Кайзера при повторном нагружении эвтектических сплавов, связанный с движением эвтектических колоний по границам раздела между ними, которое приводит к уменьшению вклада внутризеренных дислокационных процессов.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертации.

**Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Впервые установлено и систематически исследовано изменение акустической эмиссии при статическом нагружении сплавов системы Pb-Sn, состоящее в резком уменьшении сигналов при увеличении концентрации  $\beta$ -фазы для сплава с доэвтектическим строением, последующем росте сигналов при формировании эвтектической структуры и генерировании интенсивного акустического излучения при уменьшении доли  $\alpha$ -фазы в интервале концентраций компонентов, соответствующих заэвтектическому строению. Установлены физические механизмы обнаруженных изменений акустической эмиссии при варьировании структуры свинцовых сплавов. Обнаружено нарушение акустико-эмиссионного эффекта памяти (эффекта Кайзера) для сплавов с эвтектической структурой, связанное, как установлено, с движением эвтектических колоний по общим границам раздела. Разработан и апробирован новый способ обработки амплитудно-частотных характеристик акустической эмиссии на основе метода главных компонент.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью поставленной задачи, применением надежных и апробированных математических алгоритмов обработки экспериментальных данных, обоснованностью использованных физических представлений, соответствием результатов теоретического анализа и полученных данных, воспроизводимостью экспериментальных результатов. Результаты и выводы диссертации подтверждаются их соответствием с данными других авторов.

**Научная значимость и практическая ценность результатов работы**

Научная значимость диссертационной работы Салиты Д.С. состоит в установлении закономерностей изменения параметров акустической эмиссии при пластической деформации сплавов на основе свинца с различной структурой в широком диапазоне концентрации компонентов. Предложен метод математической обработки акустических сигналов, позволяющий выявлять границы стадий пластического течения исследуемых сплавов. Обнаружено нарушение эффекта Кайзера при повторном нагружении свинцовых сплавов с эвтектической структурой.

Полученные результаты могут практически использоваться при диагностике и контроле свинцовых сплавов с помощью метода акустической эмиссии. Предложенный алгоритм математической обработки сигналов может

быть применен для расширения возможностей акустико-эмиссионной диагностики и контроля функциональных материалов на основе свинца и изготовленных из этих материалов изделий.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы изложены в 30 публикациях, из которых 6 опубликовано в изданиях, индексируемых в системах W&S и Scopus, 6 публикаций в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, и 18 - в других изданиях. Получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

### **Замечания по диссертации**

1. В литературном обзоре, представленном в первой главе, не отражены современные тенденции использования метода акустической эмиссии в физическом материаловедении, связанные, в частности, со статистическим и фрактальным анализом дискретных сигналов для выявления степени кооперативности дислокационной динамики. Кроме того, среди возможных источников акустического излучения не отмечены известные из литературы нестационарные процессы локализации пластической деформации в полосах Чернова-Людерса, полосах Портевена-Ле Шателье, полосах локализованного сдвига и т.д.

2. В диссертации недостаточно ясно прослеживается связь между выбором параметров акустической эмиссии, их анализом и выводами работы. Не менее важным является анализ формы отдельных всплесков, их спектра мощности и суммы накопленных сигналов для сравнения с деформационной кривой и с оценкой количества структурных элементов, например, линий скольжений, а также анализ соотношения между дискретной и непрерывной составляющей для выявления механизмов эмиссии акустических сигналов.

3. Стадийность пластического течения для химически чистого свинца, определяемая в третьей главе работы по форме деформационной зависимости коэффициента упрочнения, представляется весьма условной.

4. В четвертой главе на микрофотографиях структуры на рисунках 4.11 и 4.16, затруднительно выделить отдельные структурные элементы.

5. В тексте диссертации присутствуют опечатки, например, в подписи к рисунку 4.30.

Сделанные замечания не снижают положительной оценки диссертации и не ставят под сомнение защищаемые положения и выводы.

Содержание диссертации соответствует пунктам 1 и 6 паспорта специальности 1.3.8. - Физика конденсированного состояния. Содержание **автореферата** соответствует содержанию диссертации.

## Заключение

Научный уровень решаемых задач, объем и актуальность выполненных исследований, обоснованность вынесенных на защиту положений, достоверность, научная новизна и значимость полученных результатов для науки и практики дают основание считать, что диссертация Салиты Д.С. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные результаты, доказывающие связь обнаруженных закономерностей акустической эмиссии с физическими механизмами пластической деформации сплавов на основе свинца с составом, близким к эвтектическому. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно п.11.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г (в редакции от 11.09.2021 г.). Автор диссертационной работы Салита Даниил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

### ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ:

профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р.  
Державина», доктор физико-математических наук, профессор



Шибков Александр Анатольевич



Адрес: Россия, 392036 г.Тамбов, ул. Интернациональная 33,  
ФГБОУ «Тамбовский государственный университет им. Г.Р.» Державина  
Тел.: +7-910-750-57-38 ,e-mail: shibkovaleks@mail.ru