

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Аглетдинова Эйнара Альбертовича на тему «Исследование процесса деформации металлических материалов с применением статистического подхода к анализу временных рядов акустической эмиссии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Представленная Аглетдиновым Э.А. диссертационная работа посвящена усовершенствованию экспериментальных методов исследования процессов пластической деформации материалов за счет разработки статистического подхода к анализу временных рядов акустической эмиссии и применению разработанных методов к изучению механизмов деформации металлических материалов.

Актуальность темы диссертационной работы

Акустическая эмиссия (АЭ) сопровождает все элементарные акты эволюции дефектной структуры материалов в процессе их деформации, поэтому детектирование и анализ параметров акустической эмиссии предоставляет исследователю уникальную возможность тонкого и глубокого исследования механизмов пластической деформации и разрушения. Хотя первые исследования этого явления появились почти век назад, метод акустической эмиссии все еще не дает возможности на приемлемом уровне описать динамику ансамбля разномасштабных дефектов кристаллической решетки. Это связано с тем, что коллективная динамика дефектов кристаллического строения при пластическом течении создает сложный акустоэмиссионный отклик, который невозможно верно интерпретировать, опираясь на устаревшие методы обработки и анализа сигналов акустической эмиссии. В частности, практически повсеместно используемый метод порогового детектирования сигнала акустической эмиссии может приводить к существенной потере полезной информации при низком уровне сигнала по отношению к шуму, и, как следствие, к ложной интерпретации результатов. Поэтому усовершенствование методов исследования материалов за счет разработки статистического подхода к анализу временных рядов акустической эмиссии является необходимым шагом на пути к пониманию процессов деформации и упрочнения в физике прочности и пластичности. В связи с этим, рассматриваемая диссертационная работа является безусловно актуальным научным исследованием.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация изложена на 143 страницах машинописного текста, включает 50 рисунков и 5 таблиц. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 266 наименований, и приложения.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются фундаментальные механизмы генерации сигналов акустической эмиссии и методы детектирования и анализа сигналов. Сделан обзор работ, посвященных АЭ при дислокационном скольжении и двойниковании кристаллов. В достаточной степени подробно изложены способы описания сигналов АЭ во временной и частотной областях, методы анализа, как-то вейвлет анализ, кластерный анализ, методы выделения полезного сигнала из шума, элементы теории случайных процессов. Сделан

вывод, что до сих пор в основном применяется традиционный способ детектирования сигналов пороговым методом с последующей оценкой классических параметров сигнала АЭ, который становится крайне неэффективным при обработке сигналов с низким отношением сигнал/шум. В выводах главы обоснована необходимость развития и улучшения методов обработки и анализа АЭ сигналов для обеспечения более глубокого и полного понимания механизмов пластической деформации и их сложного взаимодействия в процессе нагружения.

Вторая глава посвящена разработке статистических методов анализа временных рядов АЭ. Основу подхода, который развивается в работе, составляет новый метод детектирования сигналов малых амплитуд во временных рядах акустической эмиссии с низким отношением сигнал-шум, состоящий в вычислении и анализе функции эволюции источников АЭ (ф- параметра). Этот метод, вытекающий из формализма передаточной функции, позволяет выделить из шума полезные сигналы, даже имеющие малую амплитуду на фоне этого шума. В проведенных автором сравнительных тестах с популярными методами детектирования метод ф-параметра продемонстрировал наибольшую эффективность в пределах наблюдаемых отношений сигнал-шум (от -6 до -8 дБ). Описан новый метод обнаружения критических переходов в сигналах акустической эмиссии, основанный на байесовской статистике.

В третьей главе предложенный байесовский подход к анализу АЭ применен для определения момента инициации растрескивания покрытия при испытании на контролируемое царапание металла. Испытание проводилось на титановом сплаве BT20, покрытом тонким слоем ZrO_2 и сопровождалось непрерывной записью сигналов АЭ. Суть испытания заключается в том, что при линейном увеличении нагрузки при царапании покрытие постепенно разрушается, и индентор переходит с покрытия на подложку. Момент этого перехода, рассчитанный из анализа сигналов АЭ по байесовской схеме, совпадает с появлением металлического блеска в русле царапины на металлографических снимках, что доказывает работоспособность разработанного подхода. Далее разработанный статистический подход применен к исследованию основных механизмов деформации - дислокационного скольжения и механического двойникования. Для этого в первой серии экспериментов выбраны монокристаллы чистого магния, для которых определены схемы нагружения, позволяющие по отдельности «запускать» один из двух механизмов деформации, и изучить их акустоэмиссионный отклик. Для тех же схем деформаций также исследованы сопутствующие изменения микроструктуры. Во второй серии экспериментов аналогичный анализ проведен для поликристаллов магниевых сплавов ZK60 и чистого α -Fe, первый из которых является активно двойникующимся материалом, а второй - деформируемым только скольжением. На основе применения созданных алгоритмов обработки сигналов АЭ выявлен важный факт, что дислокационное скольжение проявляется как процесс, состоящий из случайных и независимых друг от друга элементарных актов, а механическое двойникование, напротив, относится к коррелированному процессу, который может быть адекватно описан моделью самовозбуждающегося процесса Хокса.

В четвертой главе развивается мотивированная результатами проведенных исследований феноменологическая модель деформационного упрочнения материалов, учитывающая взаимодействие двух основных механизмов деформации - дислокационного скольжения и двойникования. Модель основана на модификации уравнения Кокса-Мекинга-Эстрина для кинетики дислокаций путем введения дополнительного члена, учитывающего скорость изменения плотности дислокаций за счет поглощения границами двойников. Получена система кинетических уравнений, параметры которых оптимизированы в

сопоставлении с результатами экспериментально полученных кривых деформирования магния и его сплава в различных исходных состояниях. Получено хорошее согласие между экспериментальными наблюдениями (кривыми нагружения) и модельными решениями, что подтверждает правильность предлагаемого феноменологического подхода и постулатов, лежащих в его основе. Описаны особенности изменения объемной доли двойников, скоростей деформации, вызванной дислокационным скольжением и двойникованием, которые также хорошо согласуются с экспериментом.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная ценность работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Предложен и апробирован новый эффективный метод детектирования сигналов малых амплитуд во временных рядах АЭ с низким отношением сигнал-шум, на основе этого метода и методов статического анализа построен новый алгоритм обработки акустоэмиссионных сигналов.

2. На основе статистического анализа сигналов АЭ установлено, что дислокационное скольжение проявляется как процесс, состоящий из случайных и независимых друг от друга элементарных актов, а механическое двойникование, напротив, относится к коррелированным процессам. При этом наблюдаемые корреляции могут быть адекватно описаны моделью самовозбуждающегося процесса Хокса.

3. Разработана феноменологическая модель деформационного упрочнения, управляемого взаимодействием механизмов дислокационного скольжения и механического двойникования, учитывающая структурные характеристики материала (толщину двойниковой прослойки, распределение размеров зерен) и верно описывающая деформационное поведение магния и его сплавов со всеми его особенностями.

Практическая значимость работы

Разработанные методы статистического анализа сигналов АЭ, а именно метод детектирования, основанный на параметре эволюции источников, метод обнаружения критических переходов в сигналах АЭ, основанный на байесовской статистике, метод анализа потока событий на основе элементов теории точечных процессов, могут найти широкое применение как для исследования процессов пластической деформации при решении задач в области физики прочности и пластичности, так и в практических задачах неразрушающего контроля.

Достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации обеспечивается проверкой ключевых методов на примерах процессов, которые могут быть однозначно идентифицированы другими методами. Например, метод детектирования сигналов, основанный на ф-параметре, проверен на анализе искусственного потока, состоящего из известных событий АЭ. Метод идентификации смены механизмов проверен на исследовании АЭ при царапании покрытия, стадии которого идентифицируются визуально. Акустоэмиссионные исследования пластической деформации сопровождаются микроструктурными исследованиями. В совокупности с использованием известных теоретических и апробированных экспериментальных методов исследования, отсутствием противоречий с литературными источниками, совпадением результатов моделирования с экспериментальными данными, все это обеспечивает полную достоверность результатов диссертации.

Полнота изложения результатов в публикациях, апробация результатов, соответствие содержаний диссертации и автореферата

Результаты работы изложены в 21 работе, из которых 6 статей опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в системы индексирования Web of Science и Scopus, причем 5 из этих статей – в изданиях квартиля Q1 базы данных Web of Science. Получен 1 патент РФ. Результаты также обсуждены на ряде всероссийских и международных конференций, семинаров. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания к диссертации

Замечания к работе в основном относятся к стилю изложения, к некоторым формулировкам и к оформлению.

1. В выводах из результатов четвертой главы отмечается, что разработанная феноменологическая модель «учитывает структурные характеристики материала и *точно* восстанавливает деформационное поведение магния и его сплавов». Слово «точно» в данном случае представляется не вполне уместным, поскольку речь не идет о математически точном описании кривой деформирования и остальных зависимостей. В частности, рассчитанная зависимость объемной доли двойников от деформации количественно значительно отличается от экспериментально наблюдаемой, чему в диссертации есть вполне разумное объяснение. Вместе с тем, модель *верно* описывает все основные особенности деформационного процесса и структурных изменений.

2. Одним из важнейших элементов развиваемой модели деформационного упрочнения является третий член уравнения (4.10), определяющий скорость изменения плотности дислокаций за счет взаимодействия с двойниковыми границами. Обоснование вида и знака этого члена в тексте, следующем за уравнением, представляется несколько запутанным и неполным. Первоначально говорится в поддержку положительного знака, то есть, накопления дислокаций за счет границ, но в итоге делается вывод, что двойниковые границы приводят к снижению плотности дислокаций. В действительности, вклад границ в накопление, как следует из уравнений, учитывается их влиянием на среднюю длину пробега дислокаций, а отрицательный знак перед третьим членом вполне ожидаем. Что касается вида зависимости, можно было бы ожидать, что скорость убывания плотности дислокаций пропорциональна не производной по времени объемной доли двойников, а самой этой величине, поскольку скорость поглощения дислокаций должна быть пропорциональна текущей плотности двойниковых границ. Поэтому в этой части требуется большее обоснование выбранной зависимости. В этом пункте также использован неудачный термин «динамическое восстановление дислокаций», понимание которого может быть двусмысленным. По-видимому, это связано с неудачным переводом термина “dynamic recovery” – «динамический возврат».

3. На рис. 4.5 совмещены изображения зависимостей от степени деформации нескольких величин, полученных расчетом и экспериментально, теоретические кривые приведены кривыми одного и того же цвета, что создает затруднения в «чтении» этих графиков.

4. Для лучшей демонстрации возможностей модели было бы гораздо интереснее не оптимизировать все параметры модели для всех рассмотренных состояний материалов, а рассчитать независимые от структурного и текстурного состояния параметры оптимизацией для одного состояния и попытаться рассчитать уже с этими параметрами кривые деформации и сопутствующие кривые для другого состояния.

Отмеченные недостатки не снижают очевидных достоинств диссертационной работы Аглетдинова Э.А. и в основном являются пожеланиями для дальнейшего развития работы.

Общая оценка диссертационной работы

Работа написана грамотно, хорошо оформлена, в ней, подобно хорошей монографии, предмет изложен очень последовательно, начиная с азов теории обработки сигналов и заканчивая научно обоснованными четко сформулированными выводами. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки методов обработки временных рядов сигналов акустической эмиссии и исследования с их помощью механизмов пластической деформации и деформационного поведения материалов.

В заключение, диссертационная работа относится к областям исследований 1 и 6 по паспорту специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния и по актуальности, научной значимости, практической ценности и другим показателям полностью соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Аглетдинов Эйнар Альбертович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник,
заместитель директора по научной работе
Института проблем сверхпластичности
металлов РАН,
доктор физико-математических наук



А.А. Назаров

27 апреля 2021 г.

Адрес: 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук

Тел. +7 (347) 282-37-50, e-mail: aanazarov@imsp.ru

Подпись и контактные данные Назарова Айрата Ахметовича удостоверяю:

Нач. отдела кадров ИПСМ РАН



Т.П. Соседкина