

Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов

© К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.И. Русаков, А.А. Семенов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: abramova.mhd@pop.ioffe.rssi.ru

Использование современных физических методов исследования позволяет установить, что разрушение и пластическая деформация металлов сопровождаются эмиссионными процессами, в частности, люминесценцией и эмиссией электронов.

Все исследованные металлы обладают способностью люминесцировать. Интенсивность, длительность и спектр механолюминесценции различаются для разных металлов. Интенсивность определяется механическими и тепловыми характеристиками. Для одного и того же металла интенсивность зависит от количества дислокаций в структуре и скорости нагружения образца. Спектр благородных металлов определяется электронной структурой поверхностных состояний. Динамика механолюминесценции и электронной эмиссии (экзоэмиссии) зависит от скорости изменения напряжений в исследуемых образцах.

Все это позволяет рассматривать механолюминесценцию и экзоэмиссию не только в качестве физических характеристик, но также в качестве возможного метода исследования поверхностных состояний в металлах и кинетики выхода мобильных дислокаций на поверхность, обладающего высоким временным разрешением.

Деформация и разрушение всех твердых тел, диэлектриков, полупроводников, металлов возбуждает в них ряд неравновесных процессов — эмиссию электронов и ионов, излучение света (механолюминесценцию), излучение звука, электромагнитное излучение в радиочастотном диапазоне; есть публикации, в которых сообщается о рентгеновском излучении [1–7]. Наименее изучены эти процессы в металлах, однако накоплены экспериментальные факты и предложено их объяснение. Предлагаемый механизм механолюминесценции металлов заключается в следующем [8,9]. При разрушении вблизи вершины трещины образуются пластические зоны с высокой концентрацией дислокаций. После снятия нагрузки происходит дислокационный возврат деформируемого слоя, связанный с аннигиляцией пар дислокаций противоположного знака и с выходом подвижных дислокаций на поверхность. Реальные дислокации в металлах имеют сложную структуру и поэтому их полная аннигиляция маловероятна. В каждой дислокационной реакции возможна аннигиляция только отдельных параллельных отрезков. Аннигиляция таких отрезков сопровождается выделением значительной энергии, достигающей нескольких электронвольт на одно межатомное расстояние вдоль оси. При аннигиляции дислокаций в благородных металлах возможно пересечение термов внутренних d -электронов, локализованных в области ядра дислокаций, с состояниями свободных s - p зон. Неадиабатические переходы, возникающие при пересечении, приводят к появлению дырок в квазилокальных d -состояниях вблизи дислокаций, образующихся в результате дислокационных реакций. Отсюда следует, что интенсивность люминесценции должна быть связана с концентрацией дислокаций в приповерхностном деформируемом слое, а ее динамика — с динамикой движения дислокаций или напряжений.

Для экспериментальной проверки существования таких зависимостей были использованы образцы, имеющие исходно различную микроструктуру, т.е. концентрацию дислокаций и два различных способа деформации образцов: 1) облучение импульсом лазера с заданной и достаточной энергией; 2) пропускание импульса электрического тока с заданной и достаточной энергией.

При облучении образцов импульсами лазеров обычно исследуются сопутствующие процессы, возбуждаемые непосредственно в облучаемом пятне и вокруг него. При этом участки мишени, не подвергшиеся непосредственному воздействию облучения, также подвергаются действию напряжений, распространяющихся от облучаемого пятна. Использование импульса лазера для исследования эмиссионных явлений, возбуждаемых на тыльной по отношению к облучению стороне, представляется и удобным экспериментально, и информативным. Взаимодействие лазерного импульса с поверхностью металлической мишени в широком диапазоне энергий, в том числе для энергий импульса, меньших порога загорания плазменного факела, исследовано, например, в [10,11]. Можно с хорошей точностью рассчитать в абсолютных величинах временное и пространственное распределения температуры и напряжений в облучаемой мишени и сопоставить их с возникновением импульсов люминесценции и экзоэмиссии, возбуждаемых на ее тыльной стороне, установить минимальные напряжения, возбуждающие люминесценцию, экзоэмиссию и подтвердить или установить корреляцию между нагружением и излучением [12].

Сопоставление величин, а также временных и пространственных распределений напряжений и температур с временными зависимостями эмиссии фотонов (механолюминесценции) и электронов (экзоэмиссии) в образцах, в которых они зарегистрированы с их тыльной стороны, позволяет сделать следующие заключения: 1) ди-

намика эмиссионных процессов связана с динамикой напряжений — чем больше скорость изменения напряжений, тем больше интенсивность механолюминесценции и экзоэмиссии; 2) механолюминесценция и экзоэмиссия начинаются тогда, когда напряжения в образце близки к пределу текучести материала.

В работе [13] установлена зависимость интенсивности механолюминесценции от исходной микроструктуры образца, подтверждающая ее дислокационный механизм. Однако регистрировалось и сравнивалось интегральное излучение. Спектральные измерения излучения ввиду его малой интенсивности не проводились. Для подтверждения положений дислокационной модели важно проверить существование зависимости спектра механолюминесценции от исходной микроструктуры образца.

Яркой световой вспышкой сопровождается процесс деформирования и разрушения проводников [14] в результате пропускания по проводникам токов большой плотности. Спектр излучения содержит ряд линий и полос, т.е. обширную информацию о системе и динамике электронных уровней металлического образца, как самого металла, так и отдельных его атомов. В работах [15,16] исследовался спектр излучения, возбуждающийся при разрушении медных проводников. Проведена идентификация наблюдаемых полос излучения. В частности, установлено, что наряду с возбуждением, вызванным энергичными электронами, при разрушении сильным током возникает свечение, связанное с самим процессом разрушения.

В описываемых в настоящей статье опытах разрушение медных проводников, имеющих исходно разную микроструктуру, осуществлялось при пропускании по ним электрического тока плотностью $(0.7-1.0) \cdot 10^7$ А/см². Разрушавшиеся проводники представляли собой отрезки технически чистой медной проволоки марки М0 длиной 70 и диаметром 0.5 мм. Источником энергии служила батарея конденсаторов емкостью 400 мкФ, заряженная до 1.5 кВ. Скорость разрушения составляла $V = 1 \cdot 10^3$ м/с, длительность излучения $t = 20$ мкс. Исследуемое излучение фокусировалось на входную щель дифракционного спектрометра, в фокальной плоскости которого располагался фотоэлектрический линейный преобразователь с самосканированием на принципе переноса заряда типа ФППЗ1Л, сигналы с него поступали в аналого-цифровой преобразователь и затем в ЭВМ. Это позволяло проводить измерения спектральных характеристик вспышки излучения в диапазоне 5400–8100 Å со спектральной разрешающей способностью 6 Å при разрушении одного образца.

Ранее измеренный непрерывный спектр излучения, сопровождающий МГД разрушение меди, был измерен в более широком диапазоне (4500–9000 Å). Однако измерения проводились лишь в 20 точках этого спектрального диапазона и для получения среднего значения величины интенсивности в каждой точке требовалось разрушить десять образцов.

Настоящие измерения выполнены более подробно и на качественно новом экспериментальном уровне. Во-первых, весь спектр излучения измерялся в одном опыте. Во-вторых, измерения проводились в пятистах точках спектрального диапазона 5400–8100 Å. В-третьих, измерялся не только непрерывный спектр излучения, но и линейчатый. Это позволило повысить точность и надежность получаемых результатов.

Известно, что дислокации с противоположно направленными векторами Бюргерса, лежащие в одной плоскости скольжения, при сближении уничтожают друг друга. Если такие дислокации лежат в разных плоскостях скольжения, то для их аннигиляции требуется переползание. Отжиг способствует переползанию дислокаций и таким образом понижается их концентрация. Фотографии микроструктуры отожженных и неотожженных образцов получены и приведены в работе [13].

Из сравнения спектров [16] отожженных и неотожженных медных образцов установлено, что интенсивности полосы катодолюминесценции и полосы фотолюминесценции меди повторяют друг друга. Это, по-видимому, связано с тем, что они возникают вследствие возбуждения объемных состояний, которые претерпевают малые изменения в процессе отжига. На других участках интенсивности спектров различаются, т.е. произошли изменения в относительной интенсивности полос люминесценции разной природы. Обсуждаемый в настоящей работе участок спектра — это полоса механолюминесценции. Как и ожидалось, интенсивность полосы механолюминесценции при разрушении отожженного образца оказалась меньше, чем в случае неотожженного. Эти результаты подтверждают дислокационную модель механолюминесценции: в процессе отжига уменьшилась концентрация дислокаций и уменьшилась интенсивность полосы, которая связана с возбуждением дырочных состояний при неадиабатических переходах, возникающих в момент аннигиляции дислокаций и при выходе дислокаций на поверхность.

Анализ полученных спектров излучения, возникающего при разрушении проводников током большой плотности, позволяет сделать следующие выводы. 1) Изменение микроструктуры в процессе отжига уменьшает вероятность возбуждения поверхностных электронных состояний, определяющих возникновение полосы механолюминесценции. 2) Изменение микроструктуры в процессе отжига не влияет на объемные электронные состояния, определяющие возникновение полос катодолюминесценции и фотолюминесценции.

Таким образом, результаты всех описанных экспериментов подтверждают дислокационный механизм механолюминесценции и позволяют предполагать аналогичную природу экзоэмиссии электронов при пластической деформации металлов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-02-18097) и ФЦП "Интеграция" (проект № К0854).

Список литературы

- [1] Н.А. Кротова, В.В. Карасев. ДАН СССР **92**, 607 (1953).
- [2] Н.Р. Валуев, В.И. Еременко, Н.Н. Никоненков, А.А. Тупик. Письма в ЖТФ **11**, 7, 401 (1985).
- [3] О.В. Гусев. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. Наука, М. (1982).
- [4] К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков. ЖТФ **64**, 9, 76 (1994).
- [5] A.J. Walton. Advances in Physics **26**, 6, 887 (1977).
- [6] В.А. Клюев, А.Г. Липсон, Ю.П. Топоров, А.Д. Алиев, А.Е. Чалых. Письма в ЖТФ **10**, 18, 1135 (1984).
- [7] Т.Я. Гораздовский. Письма в ЖЭТФ **5**, 3, 78 (1967).
- [8] М.И. Молоцкий. ФТТ **20**, 6, 1651 (1978).
- [9] M.I. Molotskii. Electronic Excitation During the Plastic Deformation and Fracture of Crystals. Chemistry Reviews. 13, part. 3, 1 (1989).
- [10] С.И. Анисимов, Я.О. Имас, П.С. Солонов, Ю.В. Ходыко. Действие излучения большой мощности на металлы. Наука, М. (1970). 270 с.
- [11] Дж. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. Мир, М. (1974). 486 с.
- [12] К.Б. Абрамова, А.И. Русаков, А.А. Семенов, И.П. Щербаков. ФТТ **40**, 6, 957 (1998).
- [13] К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, И.Я. Пухонто, А.М. Кондырев. ЖТФ **66**, 5, 190 (1996).
- [14] К.Б. Абрамова, Б.П. Перегуд. ЖТФ **41**, 10, 2216–2225 (1971).
- [15] К.Б. Абрамова, Б.П. Перегуд, Ю.Н. Перунов, В.А. Рейнгольд, И.П. Щербаков. Опт. и спектр. **58**, 4, 809 (1985).
- [16] М.И. Молоцкий, Б.П. Перегуд. ЖТФ **51**, 3, 618 (1981).