

05:07

©1994 г.

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, ВОЗБУЖДАЕМАЯ В МЕТАЛЛАХ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

*К.Б.Абрамова, И.П.Шербаков*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе,  
194021, Санкт-Петербург  
(Поступило в Редакцию 22 декабря 1993 г.)

Описаны исследования световой эмиссии, возбуждаемой при деформировании и разрушении металлических образцов. Показано, что при разрушении и пластическом деформировании металлов возбуждается их люминесценция. Основной вклад в люминесценцию благородных металлов вносит рекомбинация дырочных состояний, возбуждаемых в глубоких зонах в результате неадиабатических переходов при распаде на поверхности подвижных дислокаций. Излучение переходных металлов с позиций дислокационного механизма объяснено быть не может. Основной вклад в излучение переходных металлов при деформировании и разрушении вносят возбужденные атомы.

### Введение

Разрушение и деформирование твердых тел стимулирует ряд эмиссионных явлений и химических реакций. Открытие одних, например экзэмиссии электронов, или рассмотрение других, например акустоэмиссии, механолюминесценции, с современных позиций привело к возникновению новых направлений исследований. Каждое из этих направлений представляет собой самостоятельный интерес, весь комплекс исследований способствует созданию, в частности, полной картины деформируемого и разрушающегося твердого тела.

До недавнего времени считалось, что свойствами люминесцировать, в том числе при разрушении и деформировании, обладают лишь некоторые материалы, причем все они диэлектрики. Сначала во времена, когда детектором служили только глаза исследователя, это был просто экспериментальный факт. Позднее, когда появились чувствительные приемники света, люминесценцией металлов не занимались, так как она считалась невозможной (и это было бы действительно так, если бы электронная подсистема металла была бы бесструктурной ферми-жидкостью). В тех случаях, когда излучение при разрушении металла регистрировали, его объясняли либо триболюминесценцией

пленки окисла, существующей на поверхности, либо хемолюминесценцией при окислении чистой поверхности металла, образующейся при разрушении. И лишь в 1964 г. в работе, посвященной исследованию электрического взрыва, был сделан вывод о том, что излучение металлического образца, возникающее при электрическом взрыве, обладает признаками люминесценции [1-3]. В 1969 г. были поставлены опыты, в которых осуществлены возбуждение и регистрация фотолюминесценции меди и золота [4]. С 70-х годов началось исследование люминесценции металлов, возбуждаемых механическим воздействием, пучком заряженных частиц, светом [5-12].

Настоящая работа посвящена исследованию светового излучения, сопровождающего деформирование и разрушение металлов.

Механолюминесценция металлов есть уникальный метод исследования связи элементарных процессов деформации и разрушения вблизи дефектов с элементарными возбуждениями в электронной подсистеме металла. С другой стороны это есть перспективный метод исследования динамики самих элементарных механических процессов в металле. Механолюминесценция несет в себе информацию о физическом состоянии и особенностях деформации поверхностного слоя, о его структуре, плотности и движении дислокаций. Регистрация механолюминесценции — это новый бесконтактный метод контроля напряженного состояния металлических деталей, возможность определения наиболее напряженного участка детали без ее разрушения и какой-либо подготовки.

### Механолюминесценция благородных металлов

Первые опыты, в которых убедительно показано, что деформирование и разрушение металлов возбуждает их люминесценцию, осуществлены на баллистической установке, которая обеспечивала возможность осуществления тыльного откола. В трубе разгоняется боек и ударяет по массивному металлическому образцу — мишени, при этом разрушается не только поверхность, по которой наносится удар, но и тыльная (по отношению к удару) без нарушения сплошности образца. Разрушение тыльной поверхности, называемое тыльным отколом, бесконтактное, без осложняющих явлений, связанных с соударением тел. Скорость деформирования медных образцов в этих опытах  $\sim 100$  м/с, весь процесс разрушения и деформирования  $\sim 100$  мкс, площадь деформируемой поверхности  $\sim 1$  см<sup>2</sup>. Камера, в которой происходил тыльный откол, откачивалась до давления  $\sim 10^{-5}$ – $10^{-6}$  мм рт.ст., что исключало возбуждение газа при деформировании.

Фотоумножитель ФЭУ-38, обладавший чувствительностью  $10^{-12}$  Вт в диапазоне 3000–8200 Å, расположенный напротив разрушающейся поверхности на расстоянии 20 см, зарегистрировал излучение и при деформировании, и при разрушении поверхности медных (рис. 1), алюминиевых и дюралевых образцов [6]. Амплитуда сигнала фотоумножителя при деформировании поверхности медного образца без видимых разрывов в несколько раз меньше сигнала при деформировании с разрывами. Продолжительность излучения 1.5–3 мс, т.е. существенно больше продолжительности деформирования и разрушения. За это время происходит несколько ярких вспышек, как правило, не разре-  
шенных во времени.

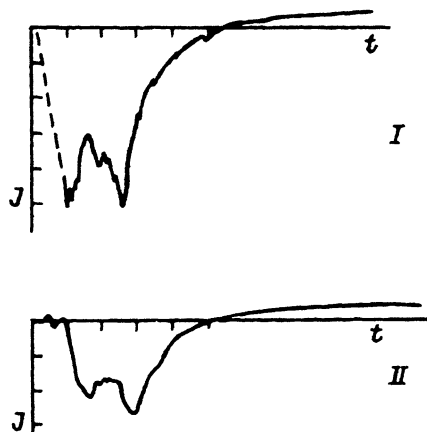


Рис. 1. Осциллограмма излучения меди.  $t_{\text{разв}} = 0.5$  мс/дел., чувствительность 150 мВ/дел.; I — разрыв, II — пластическая деформация без видимых разрывов. Толщина образца  $h = 27$  мм.

Фотографирование разрушающейся и деформируемой поверхности с помощью электронно-оптического преобразователя УМИ-93 показало, что излучение локализовано в областях трещин, наибольших деформаций, причем состоит из отдельных светящихся участков. Свечение возникает не одновременно, что соответствует отдельным пикам на осциллограммах.

Двумя независимыми методами измерена зависимость интенсивности излучения, сопровождающего разрушение медных образцов, от длины волны в спектральном диапазоне 350–820 нм. В одном случае использовался спектрограф ИСП-51, усилитель света УМИ-93 и фотопластинка; в другом — монохроматор УМ-2, фотоумножитель ФЭУ-38 и осциллограф. Обработывались данные 6 измерений на каждой длине волны. Результаты измерений приведены на рис. 2. Как следует из рисунка, кривые, полученные разными методами, хорошо совпадают. Зарегистрированное излучение состоит из двух полос  $\lambda_{\text{max}} \approx 720$  и 580 нм, причем  $J_{\lambda=720} \approx 4J_{\lambda=580}$ .

Для того чтобы убедиться в том, что поверхностная пленка окисла не вносит заметной доли в обнаруженное излучение, были проделаны специальные опыты. В результате тыльного откола отслаивалась и разрушалась часть поверхности образца, обнажая свежую и чистую поверхность. Образец оставался в камере, вакуум которой не нарушался и давление составляло  $5 \cdot 10^{-6}$  Тор. Через 2–3 мин удар повторялся, теперь деформировалась и разрушалась чистая поверхность, на которой пленка еще не успевала нарасти. Фотоумножитель регистрировал свет.

В следующей серии опытов образованная тыльным отколом поверхность образца в течение трех месяцев выдерживалась на воздухе при атмосферном давлении. За это время окисная пленка, конечно, образовывалась. Затем образец устанавливался в камеру и осуществлялся второй откол. Длительность и интенсивность импульса света остались такими же, как при разрушении чистой поверхности. Эти серии опытов позволяют утверждать, что если существует излучение, возникающее вследствие разрушения поверхности окисной пленки, то оно заметного вклада в регистрируемое излучение металла не вносит.

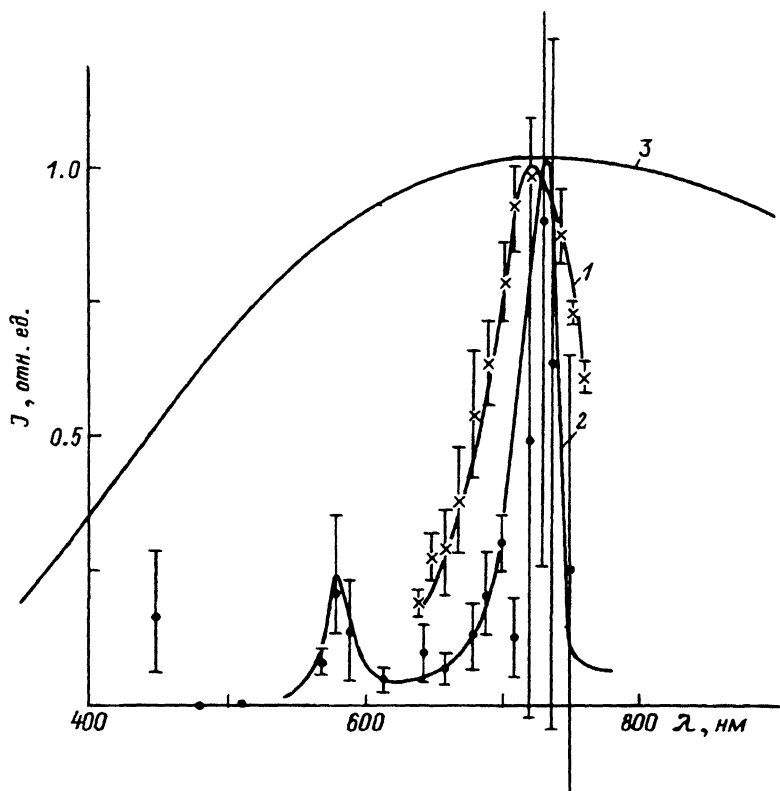


Рис. 2. Спектр излучения, возникающего при разрушении медного образца. 1 — результат обработки данных, полученных при помощи спектрографа и электронно-оптического преобразователя; 2 — результат обработки данных, полученных при помощи монохроматора и фотоумножителя; 3 — излучение абсолютно черного тела, нагретого до 4000 К. Поля ошибок определены по результатам обработки шести спектров. Приведены величины вероятных ошибок  $\rho = 2/3\sigma$ .

Интенсивность и продолжительность излучения, возникающего при втором тыльном отколе, существенно отличаются от интенсивности и продолжительности излучения, возникающего при первом отколе. Интенсивность на 2.5–3 порядка больше, а длительность примерно в 20 раз меньше. Спектр излучения второго тыльного откола, так же как первого, состоит из двух полос  $\lambda_{1\max} = 720$  и  $\lambda_{2\max} = 580$  нм,  $J_{\lambda=720} \approx 4J_{\lambda=580}$ . Кроме того, присутствуют три линии атомарной меди, что свидетельствует о существовании эмиссии возбужденных атомов, т.е. о механолюминесценции [13].

Спектр излучения, продолжительность, характер осциллограмм, пространственная неоднородность свечения свидетельствуют о том, что зарегистрированное излучение есть механолюминесценция кристаллической меди.

В работах [14–18] для объяснения этих результатов предложен дислокационный механизм возбуждения механолюминесценции металлов. Им рассмотрена электронная структура благородных металлов (меди, золота, серебра) и показано, что возможна радиационная рекомбинация электронов поверхностных  $p$ -состояний с дырками, образуя

щимися вблизи  $d$ -полосы в результате выхода на поверхность подвижных дислокаций. При распаде на поверхности подвижной дислокации образуется ступенька. Это сопровождается растяжением, разрывом старых и образованием новых связей между атомами, а следовательно, локальными искажениями структуры. Некоторые электронные состояния, расположенные выше уровня Ферми, при растяжении понижают свой уровень ниже  $E_f$  и пересекаются с  $d$ -состоянием. Пересечение термов создает возможность неадиабатических переходов и генерации дырок.

На поверхности меди существует два пика плотности  $p$ -состояния вблизи поверхности Ферми:  $s_1$  — расположенный на 0.4 эВ ниже  $E_f$ , и  $s_2$  — на 1.3 эВ ниже  $E_f$  (причем  $s_1$  примерно в 5 раз выше  $s_2$ ); максимум плотности  $d$ -состояния расположен на 2.13 эВ ниже  $E_f$ . Если образовалась дырка, то возможны радиационные переходы  $p \rightarrow d$ : 1 — 2.13 — 0.4  $\simeq$  1.72 эВ (720–730 нм), 2 — 2.13 — 1.3  $\simeq$  0.8 эВ ( $\sim$  1500 нм), 3 — обратный радиационный переход с уровня Ферми в дырочное состояние  $E = 2.13$  эВ (580 нм).

Структура поверхности серебра такова, что спектр механолюминесценции серебра должен существенно отличаться от меди: следует ожидать появления двух сильно перекрывающихся пиков  $\lambda = 302$  и  $\lambda = 310$  нм.

Таким образом, согласно дислокационному механизму возбуждения механолюминесценции, при разрушении медных образцов принципиально возможно появление трех полос: 580, 720, 1500 нм ( $J_{\lambda=720} \approx \approx 5J_{\lambda=580}$ ), при разрушении серебряных — двух: 302 и 310 нм. При электрическом взрыве (МГД разрушение) медных образцов среди других пиков излучения наблюдались и  $\lambda = 580, 720, 1500$  нм [2,5]. Как уже говорилось ранее, при тыльном отколе медных образцов излучение было измерено в диапазоне 350–900 нм и оказалось состоящим из двух полос  $\lambda = 580$  и 720 нм, причем  $J_{\lambda=720} \simeq 4J_{\lambda=580}$ .

В опытах, поставленных с целью проверки справедливости предположений, высказанных в [14,15], измерено излучение в диапазоне 250–400 нм, возникающее при электрическом взрыве серебряных проводников, и зарегистрирована полоса  $\lambda_{\max} \simeq 304$  нм, форма которой может свидетельствовать в пользу того, что она образована двумя неразрешенными, предсказанными теорией полосами. Из сказанного можно сделать вывод, что спектр излучения, возбуждаемого при разрушении благородных металлов, определяется электронной структурой поверхности состояний.

Продолжительность излучения должна определяться временем, необходимым для выхода на поверхность самой удаленной дислокации,

$$t_{\text{расч}} = \frac{2\pi B(1-\nu)\sigma_p^2}{\mu b^2}. \quad (5)$$

Здесь  $B$  — коэффициент трения  $B = 0.17$  мП,  $\mu = 4.8 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> — модуль сдвига,  $\nu = 0.34$  — коэффициент Пуассона,  $b = 2.56$  Å — величина вектора Бюргера дислокации,  $\sigma = 2.5 \cdot 10^{-2}$  см — толщина пластической зоны (все цифры для меди). Расчетная продолжительность времени выхода на поверхность подвижных дислокаций при разрушении образца, полученная из формулы (5),  $t_{\text{расч}} = 1.4$ –6.2 мс. Наблюда-

емая экспериментально длительность излучения при тыльном отколе  $t_{\text{экс}} = 1.5-3$  мс. Как видно, эти цифры близки, т.е. наблюдаемое время при тыльном отколе находится в хорошем соответствии с расчетом.

Расчитанная величина интенсивности также хорошо совпадает с экспериментальной при тыльном отколе ( $J_{\text{расч}} = 10^{-9}-10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $J_{\text{экс}} \sim 10^{-10}$  Вт/см<sup>2</sup>) для среднего значения плотности дислокаций. Если плотность дислокаций в приповерхностном слое образца увеличить, то растет интенсивность излучения. Это наблюдается в опытах со вторым тыльным отколом, этот же результат получен в опытах со специально подготовленными медными образцами.

Следующие серии опытов позволили установить, что люминесценция металлов возбуждается при приложении нагрузки с малой скоростью  $v_{\text{нагр}} \approx 7-10^{-3}$  м/с и при деформировании без разрушения (т.е. в квазистатическом режиме), а также исследовать некоторые характеристики излучения.

Разрушение образцов производилось с помощью вертикального и маятникового копра ( $v_{\text{нагр}} \approx 7-3$  м/с) на разрывной машине ( $v_{\text{нагр}} \approx 10^{-3}$  м/с), нагружение в квазистатическом режиме — гири и рычажной механизм, источник тепла постоянной производительности, создающий градиент температур и термоупругие напряжения в течение нескольких секунд, а также импульсы лазера [19-22]. В качестве детекторов применялись фотоумножители ФЭУ-79, ФЭУ-136, ФЭУ-28, фотосопротивление ФСГ-22-3А1 и камера АГА-750, что позволило осуществить измерения в диапазоне 300-10 000 нм. Экземпляры фотоумножителей, имеющие наибольшую чувствительность и минимальный собственный шум, были отобраны из партий в 25 штук. При использовании охлаждения и стабилизации температуры фотокатода схемы совпадения для устранения электрических помех, чувствительность детектора была не хуже  $10^{-17}$  Вт, шум в режиме счета отдельных фотонов 2-3 имп/с при использовании ФЭУ-79 и 1-2 имп/с для ФЭУ-136, быстроедействие детектирующей системы  $\leq 10^{-6}$  с. Регистрация и запись сигналов производилась с помощью счетчика ПП9-2М и цифропечатающего прибора, осциллографа или анализатора импульсов АИ-1024-95 с самописцем. Во всех случаях возбуждалось и было зарегистрировано излучение.

При нагружении образцов с помощью гирь и рычажного механизма зарегистрировано излучение в видимом спектральном диапазоне до начала их разрушения. Возбуждаемое в этих условиях излучение не непрерывно, оно возникает отдельными всплесками. Каждый такой всплеск состоит из 3-7 импульсов, излучаемых в течение 5-10 мкс. Возбуждение отдельных пакетов может быть связано с возникновением отдельных очагов необратимой деформации. Использование детекторов, обладающих чувствительностью в разных спектральных диапазонах позволило установить, что возбуждаемое и в этих условиях излучение обладает признаками люминесценции. Однако интенсивность излучения мала и не позволяет выполнить более подробные измерения.

Весьма удобными для исследования механолюминесценции металлов в режиме квазистатического нагружения оказались термоупругие напряжения, по-видимому, из-за того, что экспериментально не сложно создать напряжения в заданном месте поверхности образца. В качестве образцов использовались медные, серебряные диски диаметром

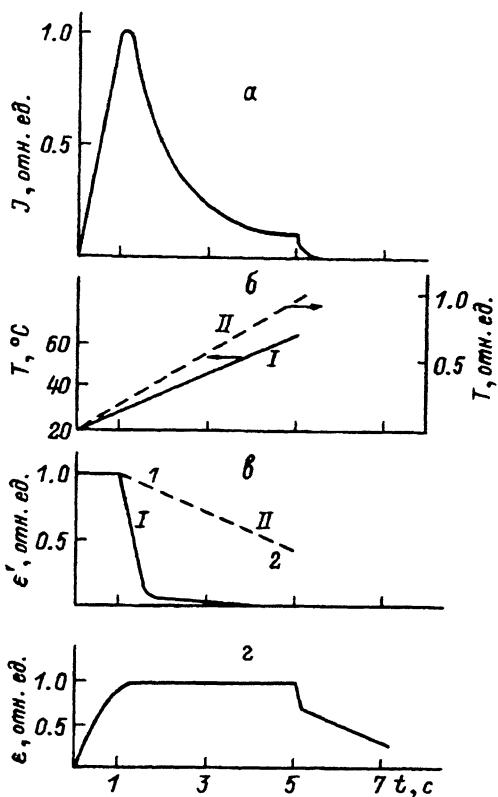


Рис. 3. Излучение, температура, деформация медного образца при воздействии на него постоянным тепловым потоком.

30 и толщиной 0.1 мм. Для создания в образце термоупругих напряжений нагретый до  $1000^{\circ}\text{C}$  стержень прислонился к одной стороне образца, другая сторона которого (тыльная) была расположена перед фотокатодом. С помощью термопары была измерена температура тыльной поверхности, а с помощью тензометрической системы — деформация. Предварительно были рассчитаны поля температур и напряжений тыльной поверхности образца. Температура поверхности образца, обращенной к ФЭУ, не превышала  $60^{\circ}\text{C}$ .

С началом действия источника тепла, т.е. при возникновении градиента температур, а значит, и термоупругих напряжений все исследованные нами металлические образцы начинали излучать свет в видимом спектральном диапазоне. На рис. 3 приведены зависимости от времени интенсивности излучения, зарегистрированные ФЭУ-136 а, рассчитанной II и измеренной I температур поверхности образца, обращенной к ФЭУ б, рассчитанной II и измеренной I величин скорости изменения деформации в, изменения деформации г, полученные при нагружении медного образца. Из рисунка видно, что зависимость интенсивности излучения от времени имеет экстремум, положение которого соответствует перегибу на кривой роста деформации, а начало и окончание действия источника напряжений есть начало излучения и момент резкого уменьшения его интенсивности. Тепловое излучение образца находится вне области чувствительности детектора, следовательно, возбуждаемое излучение избыточно над тепловым. Изложен-

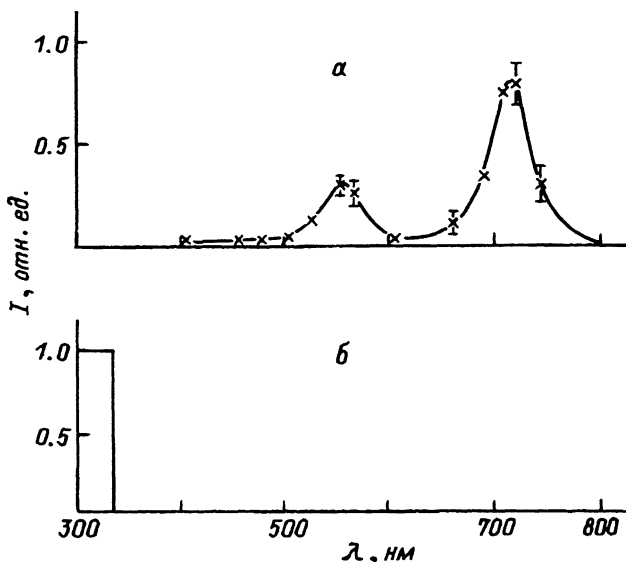


Рис. 4. Спектры излучения медного (а) и серебряного образцов (б).

ное позволяет сделать вывод, что зарегистрирована люминесценция, которая сопровождается изменяющейся во времени деформацию.

Были выполнены измерения спектра излучения меди и серебра, возбуждаемого при квазистатическом нагружении. Спектр излучения меди получен с помощью узкополосных интерференционных фильтров и представлен на рис. 4,а. Он совпадает со спектром, полученным при разрушении медных проводников МГД неустойчивостью, тыльным отколом, а также расчетным. Спектр серебра измерен с помощью широкополосных фильтров, что позволило установить локализованную по длинам волн область излучения (рис. 4,б). Она совпала с результатами исследований, полученных при разрушении МГД неустойчивостью и расчетами.

Опыты, в которых использовались медные образцы с исходно разной плотностью дислокаций, позволили надежно установить, что интенсивность излучения больше при нагружении образцов, имеющих начально бóльшую плотность дислокаций. Результаты этих опытов свидетельствуют в пользу дислокационного механизма возбуждения механолюминесценции благородных металлов и при квазистатическом нагружении.

### Механолюминесценция переходных металлов

К настоящему времени доказано, что свойством люминесцировать при механическом нагружении обладают не только благородные, но и переходные металлы. Эксперименты были осуществлены по крайней мере с 16 различными металлами и сплавами, и во всех случаях зарегистрировано нетепловое излучение [23-31]. Разрушение образцов также производилось с помощью вертикального и маятникового копров, разрывных машин, использовались те же способы квазистатического



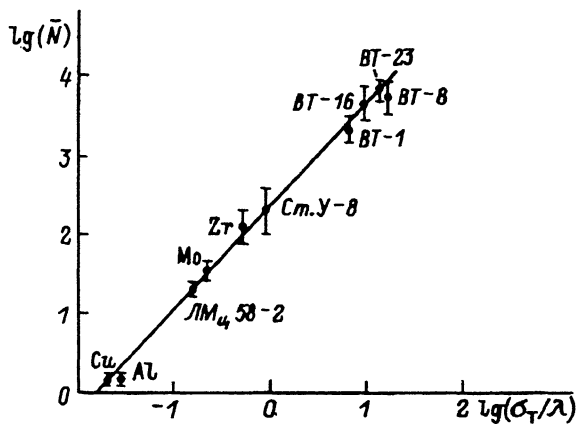


Рис. 5. Зависимость средней величины сигнала от параметра  $\sigma_T/\lambda$ .

нагружения, что и при исследовании люминесценции благородных металлов.

При разрушении образцов с помощью маятникового копра использовались цилиндрические образцы диаметром 15 мм, длиной 150 мм с кольцевым надрезом в центре. Детектирующая система располагалась на расстоянии 700 мм от образца на касательной к траектории маятника. Возникающая в результате удара трещина раскрывалась в сторону детектора. Были выполнены опыты с образцами из меди, алюминия, молибдена, титана, латуни (ЛМц-58-2), стали У-8, четырех сплавов титана (VT-1, VT-8, VT-16, VT-23) (использовать в этих экспериментах другие металлы не представилось возможности). Во всех опытах было зарегистрировано излучение и исследована зависимость интенсивности излучения от параметров материала. Интенсивность и общая продолжительность высвечивания различны для разных металлов и изменяются в широких пределах: от единиц импульсов<sup>1</sup> в течение нескольких микросекунд для меди и алюминия до десятков тысяч в течение миллисекунд для сплавов титана.

Из результатов 15 опытов, проведенных в одних и тех же условиях, определена средняя интенсивность вспышки  $\bar{N}$  для каждого из исследовавшихся металлов, а затем подобран параметр, зависящий от механических, химических или тепловых свойств материала, такой, чтобы величина  $\bar{N}$  по возможности монотонно от него зависела. Такой параметр или комбинация их может нести информацию о природе возбуждения свечения. Величиной, наилучшим образом удовлетворяющей поставленному условию, оказалась  $\sigma_T/\lambda$ , где  $\sigma_T$  — предел текучести,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности. Как видно из рис. 5, среднее значение интенсивности  $\bar{N}$  является степенной, монотонно возрастающей функцией параметра  $\sigma_T/\lambda$  и может быть записано в виде  $\bar{N} = A \cdot (\sigma_T/\lambda)^n$ . Анализ этой зависимости дает основание для следующего заключения. На способность металла излучать свет при разрушении конкурирующее влияние оказывают два фактора: запасаемая в области разрушения упругая энергия и интенсивность оттока энергии с поверхности или вершины растущей трещины. Эта способность не связана с хими-

<sup>1</sup> Имеется в виду, что фотоумножитель работает в режиме счета фотонов.

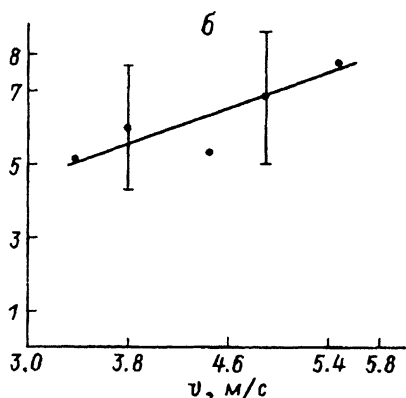
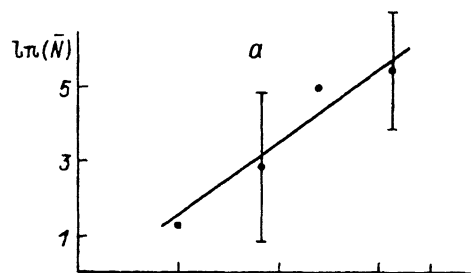


Рис. 6. Зависимость интенсивности излучения при разрушении образца от скорости нагружения.

*a* — сталь, *б* — титановый сплав ВТ-8.

ческой активностью свежееобразованной поверхности: величина  $\bar{N}$  для стали на два порядка больше  $\bar{N}$  для алюминия.

Интенсивность излучения металлов, так же как и диэлектриков, сильно зависит от скорости приложения нагрузки. Как видно из рис. 6, с изменением скорости нагружения от 3.8 до 5.6 м/с интенсивность излучения, возбуждаемого при разрушении титановых и стальных образцов, изменяется почти на два порядка. Зависимость интенсивности излучения от скорости приложения нагрузки может быть связана с повышением предела текучести при увеличении скорости нагружения, увеличением температуры разогрева в устье трещины, а следовательно, повышением локальных напряжений и дополнительным освобождением слабо закрепленных дислокаций [32].

Кинетика излучения в диапазоне 350–10 000 нм была установлена при одновременной регистрации излучения, возбуждаемого при разрушении, тремя детекторами: ФЭУ-28 ( $\Delta\lambda = 0.4\text{--}1.2\text{ мкм}$ ) в аналоговом режиме, ФСГ-223А1 ( $\Delta\lambda = 1\text{--}10\text{ мкм}$ ), ФЭУ-136 ( $\Delta\lambda = 0.35\text{--}0.78\text{ мкм}$ ) при температуре фотокатода  $-20 \pm 0.5$  в режиме счета. Примеры осциллограмм, полученных при разрушении образцов из титана, приведены на рис. 7.

Из осциллограммы, зафиксировавшей излучение в видимом и инфракрасном диапазонах (ФЭУ-28, рис. 7,а) и сопоставления ее с осциллограммами только инфракрасного (ФСГ-223-А1, рис. 7,б) и только видимого (ФЭУ-136, рис. 7,в) излучений, видны три стадии процесса.

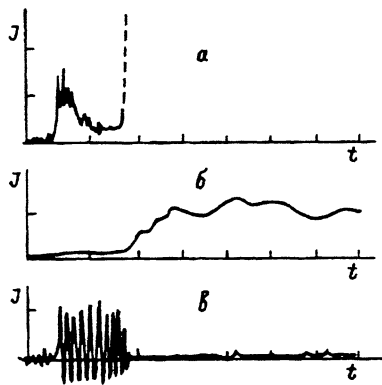


Рис. 7. Излучение, возбуждаемое при разрушении титанового сплава ВТ-8, зарегистрированное одновременно разными детекторами ( $t_{разв} = 200$  мкс/дел.).

1. Появляется видимый свет, его интенсивность резко нарастает и примерно за такое же время спадает — уменьшается в несколько раз.
2. Существует видимое излучение, интенсивность его мала и практически не меняется.
3. Вспыхивает второй импульс видимого излучения и одновременно относительно продолжительный и с пологими фронтами инфракрасный.

Измерены спектры каждого из этих импульсов и установлена временная корреляция между ними и процессами деформации и разрушения. Подробные измерения спектра ИК излучения с помощью фотосопротивления ФСГ-223-А1 и интерференционных фильтров подтвердили его тепловой характер. Измеренный спектр ИК излучения титана ВТ-8 соответствует излучению нагретого до температуры  $1142^{\circ}\text{C}$  тела. Примерная температура разогрева в области разрушения образцов из других металлов определялась по амплитуде сигнала с фотосопротивления, которая сравнивалась с величиной сигнала, полученного при регистрации излучения нагретого диска металла площадью, равной зоне разрушения, расположенного на месте разрушаемого образца. Температура в области разрушения стали У-8 достигает  $100^{\circ}\text{C}$ . Измерить температуру в области разрушения медных образцов не удалось, по-видимому, из-за небольшой ее величины и малого времени релаксации.

Измеренный с помощью набора 19 широкополосных фильтров, ФЭУ-136 и осциллографа спектр излучения титана в видимом диапазоне для двух моментов времени, соответствующих максимуму излучения первого и второго импульсов, приведен на рис. 8,а. Измеренный также с помощью 19 широкополосных фильтров, ФЭУ-136 и счетчика импульсов спектр излучения стали У-8 приведен на рис. 8,б. Как следует из приведенных рисунков, излучение в видимой части спектра, возбуждаемое при разрушении титана ВТ-8 и стали У-8, состоит из ряда полос. Используемые способы излучения не позволяют судить об истинной ширине спектральных полос. Вероятно, часть из них есть линии излучения возбужденных атомов титана и железа, т.е. продуктов механолиза, который наблюдался и при ударном разрушении медных образцов [13].

Механизм свечения атомов может быть следующим. Разогрев поверхности металла при деформировании и разрушении недостаточен

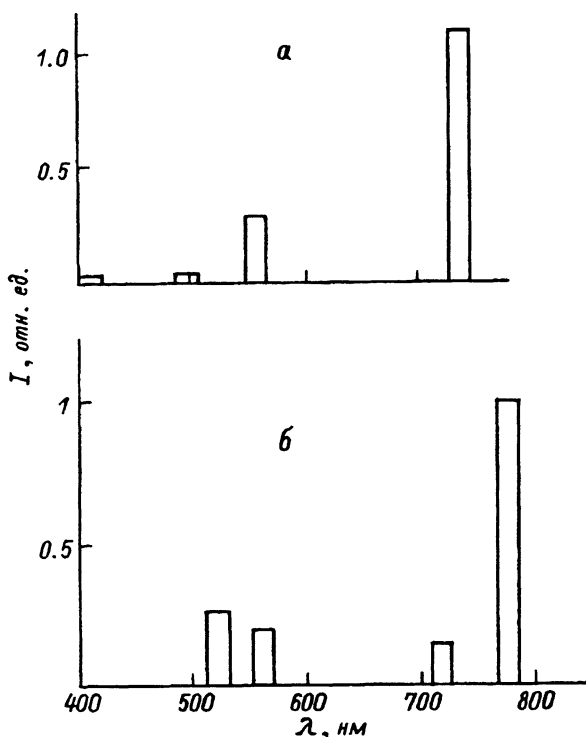


Рис. 8. Спектры видимого излучения первой вспышки механолюминесценции титана (а) и спектр механолюминесценции стали У-8 (б). Измерения с использованием широкополосных фильтров.

для эффективной термоэмиссии ионов. Однако деформация ослабляет связи иона на поверхности или в вершине трещины, облегчая его термостимулированный отрыв. Излучение квантов света можно связать с рекомбинацией ионов с электронами, туннелирующими из металла. Проведение экспериментов на воздухе обуславливает возможность возбуждения люминесценции поверхностной окисной пленки. На поверхности титана образуется в основном окись титана  $\text{TiO}_2$ , край оптического поглощения в которой  $\epsilon_g = 3.03\text{--}3.1\text{ эВ}$  совпадает с максимальной энергией получаемых при разрушении образцов квантов. Можно допустить, что излучение на длине волны  $\lambda = 400\text{ нм}$  связано с разрушением окисной пленки, тем более, что оно присутствует в спектре только в первом импульсе.

Рассмотрим возможность механолюминесценции электронных состояний кристаллического переходного металла. Она отлична от соответствующей возможности благородных металлов. В благородных металлах генерируется дырка с энергией в несколько электрон-вольт в результате понижения энергии незанятого локального электронного состояния. Дырка снижается ниже вершины  $d$ -полосы в связи с малостью плотности объемных  $s$ - и  $p$ -состояний. В переходных металлах максимум плотности  $d$ -состояний лежит вблизи энергии Ферми, например для титана  $\epsilon_F - \epsilon_d^{\text{max}} = 0.8\text{ эВ}$  [33]. Следовательно, в случае титана такие возбужденные состояния могут излучать в инфракрасной

области спектра  $\lambda \geq 1.5$  мкм. Однако экспериментально наблюдается люминесценция с длинами волн от 400 до 800 нм, которая может быть связана с возбуждением электронных состояний выше уровня Ферми.

Сопоставление динамики процессов деформирования, разрушения и излучения, выполненное для нескольких металлов (молибдена, титана, стали), позволило нарисовать следующую картину. Излучение в видимом спектральном диапазоне — механолюминесценция, начинается через некоторое время после приложения нагрузки и продолжается, пока образец деформируется без макроскопического разрушения. Во время развития магистральной трещины свечение или отсутствует, или малó. По окончании разрушения возникает вторая, значительно более интенсивная вспышка света, которая представляет собой сумму двух импульсов: относительно короткого импульса — механолюминесценции и существенно более длительного — теплового [24].

### Заключение

Вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы. При разрушении металлов вследствие ударного или плавного разрушения, а также при деформировании вследствие квазистатического нагружения возбуждается их люминесценция. Все исследовавшиеся металлы обнаружили способность к механолюминесценции. Интенсивность и продолжительность излучения разных металлов различны. Интенсивность определяется механическими и тепловыми свойствами и является степенной монотонно возрастающей функцией отношения  $\sigma_T/\lambda$ . Интенсивность одного и того же металла зависит от скорости приложения нагрузки, также являясь степенной возрастающей функцией скорости нагружения. Механолюминесценция возбуждается во время деформирования образца, ее интенсивность мала во время распространения магистральной трещины и возрастает при релаксации деформированного слоя. Основной вклад в механолюминесценцию благородных металлов вносит рекомбинация дырочных состояний, возбуждаемых в глубоких зонах в результате неадиабатических переходов при распаде на поверхности подвижных дислокаций. Спектр излучения благородных металлов определяется электронной структурой поверхностных состояний. Спектр меди состоит из двух полос в видимом диапазоне, имеющих максимумы  $\lambda_1 = 580$  и  $\lambda_2 = 720$  нм,  $J_{\lambda_2}/J_{\lambda_1} \approx 4$ , и одной полосы в инфракрасном диапазоне, имеющей максимум  $\lambda_3 = 1500$  нм. Спектр механолюминесценции серебра занимает область 300–320 нм. Спектры излучения переходных металлов титана (ВТ-8) и стали (У-8) в видимом диапазоне также состоят из отдельных полос, которые пока не могут быть объяснены с позиций дислокационного механизма. При разрушении благородных и переходных металлов вылетают отдельные возбужденные атомы.

Установление факта существования свойства металлов люминесцировать под воздействием механической нагрузки и исследование некоторых свойств излучения дают основания для использования механолюминесценции в исследованиях структуры и свойств металлов при регистрации напряженного состояния деталей в процессе работы, а в некоторых случаях и для оценки ресурса работоспособности.

- [1] *Абрамова К.Б., Перегуд Б.П.* // ДАН СССР. 1964. Т. 154. № 4. С. 837-840.
- [2] *Abramova K.B., Abramovitch N.P., Peregood B.P.* // Plasma Radiation When Electric Explosion. VII Conf. on Phen. Gas. Beograd, 1965.
- [3] *Василов С.И.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1945. Т. 9. № 4-5. С. 283-304.
- [4] *Moordian A.* // Phys. Rev. Let. 1969. Vol. 22. N 5. P. 185-187.
- [5] *Абрамова К.Б., Перегуд Б.П.* // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 10. С. 2216-2225.
- [6] *Абрамова К.Б., Валицкий В.П., Златин Н.А.* и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 5. С. 1873-1879.
- [7] *Борзяк П.Г., Запесочный И.П., Коновалов И.А.* и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 40. С. 1621-1626.
- [8] *Zivitz M., Thomas E.M.* // Phys. Rev. 1976. Vol. B13. N 7. P. 2727-2761.
- [9] *Boyd J.T., Yu Z.H., Shen Y.R.* // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 33. N 12. P. 7923-7936.
- [10] *Власов С.В., Фарберович О.В., Бугаков А.М.* и др. // Опт. и спектр. 1985. Т. 58. Вып. 4. С. 815-820.
- [11] *Абрамова К.Б., Перегуд Б.П., Перунов Ю.Н.* и др. // Опт. и спектр. 1985. Т. 58. Вып. 4. С. 809-814.
- [12] *Apell P., Monreal R.* // Phys. Scripta. 1988. Vol. 38. P. 174-179.
- [13] *Абрамова К.Б., Пухонтко И.Я.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 6. С. 66-71.
- [14] *Молоцкий М.И.* // ФТТ. 1978. Т. 20. Вып. 6. С. 1651-1655.
- [15] *Молоцкий М.И.* // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 7. С. 2171-2172.
- [16] *Молоцкий М.И.* // ФММ. 1983. Т. 55. № 1. С. 743-50.
- [17] *Молоцкий М.И.* // Докт. дис. Воронеж, 1983.
- [18] *Molotskii M.I.* // Chem. Rev. (Soviet Sci. Rev. Section B). Vol. 13. Pt 3. P. 1-85.
- [19] *Абрамова К.Б., Пагомов А.Б., Перегуд Б.П.* и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 13. С. 769-772.
- [20] *Абрамова К.Б., Пагомов А.Б., Перегуд Б.П., Щербаков И.П.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 17. С. 1025-1028.
- [21] *Абрамова К.Б., Перегуд Б.П., Щербаков И.П.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 8. С. 80-85.
- [22] *Кондырев А.М., Щербаков И.П., Абрамова К.Б., Чмель А.Е.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 1. С. 206-208.
- [23] *Абрамова К.Б., Пагомов А.Б., Перегуд Б.П., Щербаков И.П.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 4. С. 817-821.
- [24] *Абрамова К.Б., Пагомов А.Б., Перегуд Б.П., Щербаков И.П.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 6. С. 186-190.
- [25] *Абрамова К.Б., Пагомов А.Б., Перегуд Б.П., Щербаков И.П.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 5. С. 978-981.
- [26] *Абрамова К.Б., Пагомов А.Б., Перегуд Б.П., Щербаков И.П.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 1. С. 997-999.
- [27] *Тупик А.А., Валуйев Н.П.* // ДАН СССР. 1985. Т. 281. Вып. 4. С. 852-853.
- [28] *Тупик А.А., Валуйев Н.П.* // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 2. С. 82-84.
- [29] *Тупик А.А., Валуйев Н.П., Манегин Ю.В.* // ДАН СССР. 1983. Т. 272. № 4. С. 858-860.
- [30] *Валуйев Н.П., Денисов В.Н., Мойш Ю.В.* и др. // ФММ. 1986. Т. 62. № 4. С. 724-729.
- [31] *Беленький А.В., Зиновьев А.В., Усманов Т.* // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 1. С. 689-692.
- [32] *Райс Дж., Леви Н.* // Физика прочности и пластичности // Под ред. Л.К.Гордиенко. М., 1972.
- [33] *Немошкаленко В.В., Алешин В.Г.* Электронная спектроскопия кристаллов. Киев: Наукова думка, 1983. 288 с.