

05; 07

ИЗЛУЧЕНИЕ, СОПРОВОЖДАЮЩЕЕ БЫСТРУЮ ДЕФОРМАЦИЮ И РАЗРУШЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

К. Б. Абрамова, И. Я. Пухонто

Описаны опыты, которые позволяют сделать заключение о зависимости интенсивности механолюминесценции от структуры металла. Из сравнения величины сигналов люминесценции, возникающей при быстрой деформации и разрушении образцов с предварительно деформированным и недеформированным поверхностными слоями металла, следует, что наличие дефектов структуры увеличивает интенсивность излучения. Такая зависимость согласуется с представлением о дислокационном механизме возбуждения излучения.

В опытах [1] обнаружено и изучалось излучение, возникающее при деформации и разрушении, происходящих в результате тыльного откола [2, 3].

Было показано, что при деформации медных образцов со скоростями 100 м/с и их разрушении возбуждается полосовое излучение, имеющее два максимума интенсивности в области длин волн 7200 и 5800 Å, длительностью порядка 2.5 мс. Отсутствие окисной пленки на свежесформированной поверхности медного образца [4] (поверхность существовала лишь 2—3 мин — время от первого до второго ударов — при давлении остаточных газов 10^{-5} Тор) или наличие ее (поверхность специально подвергалась окислению при атмосферном давлении) не влияет на интенсивность и характер излучения. Кроме того, было обнаружено, что при быстрой деформации и разрушении поверхности, образованной тыльным отколом, интенсивность излучения оказывается на 2.5—3 порядка больше, чем в первом случае, а его длительность уменьшается до 100 мкс.

Целью настоящей работы является изучение излучения, возникающего при быстрой

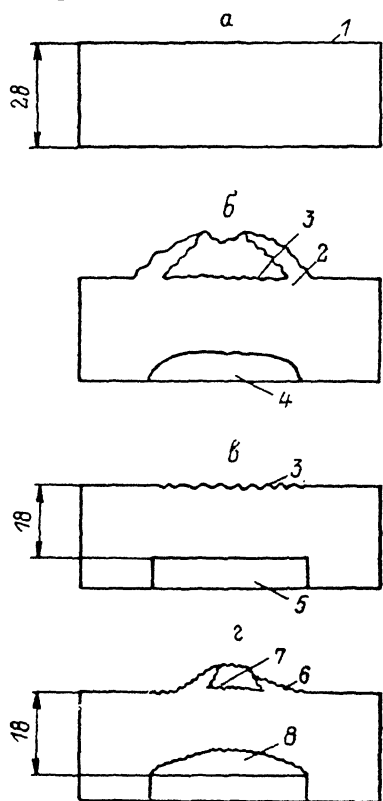


Рис. 1. Схема проведения опытов по 2-му тыльному отколу.

а — неразрушенный образец, б — образец после 1-го тыльного откола, в — образец со срезанным 1-м тыльным отколом, г — образец после 2-го тыльного откола; 1 — тыльная поверхность образца; 2 — 1-й тыльный откол; 3 — тыльная поверхность, образованная при 1-м тыльном отколе; 4 — след удара бойка; 5 — отколенный след удара бойка; 6 — 2-й тыльный откол; 7 — тыльная поверхность, образованная при 2-м тыльном отколе; 8 — повторный след удара бойка.

деформации и разрушению поверхности меди, образованной при первом отколе, и причин возрастания интенсивности этого излучения.

Схема экспериментов настоящей работы в основном повторяет схему, использованную в работе [1]. Дополнительно использовалось полупрозрачное зер-

кало, позволяющее одновременно фотографировать и получать осциллограммы исследуемого излучения. Схема опытов по 2-му отколу показана на рис. 1. Для опытов использовался медный образец (рис. 1, а). При ударе по нему

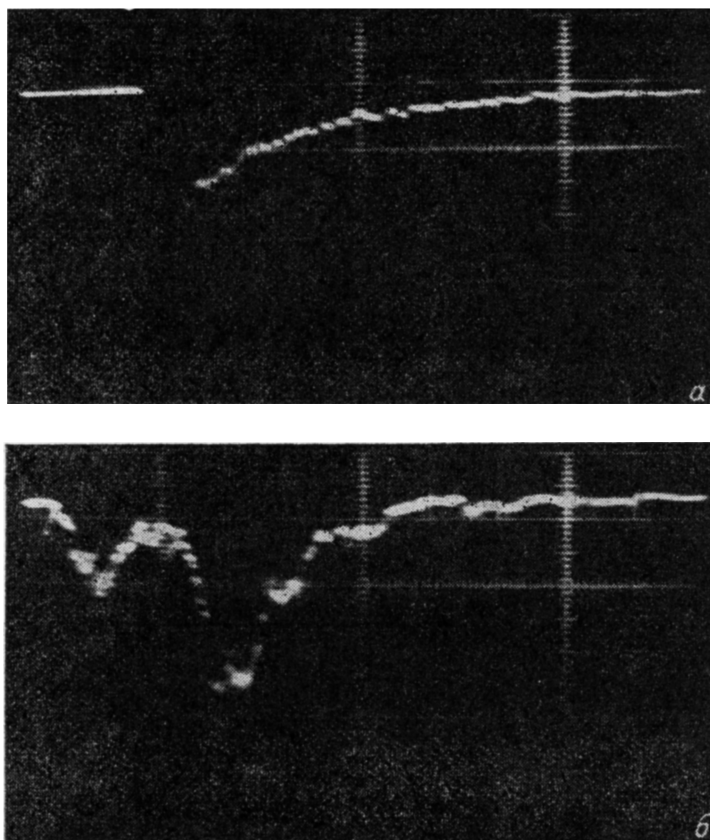


Рис. 2. Осциллограмма сигнала фотомножителя, полученная при деформации и разрушении деформированной тыльной поверхности меди.

а — 2-й тыльный откол, б — 1-й. $t_{раз}$, мкс/дел: а — 20, б — 500; U : а — 20 В/дел, б — 20 мВ/дел.

медного бойка со скоростью 1200—1300 м/с (1-й тыльный откол) тыльная сторона его деформировалась со скоростью ~ 100 м/с [1] и разрушалась (рис. 1, б). При этом образовывалась новая тыльная поверхность. Затем разрушенную часть образца срезали, обнажая тыльную поверхность, образованную при 1-м тыльном отколе (рис. 1, в), и удар повторялся. Так как образец (после 1-го тыльного откола становился тоньше (рис. 1, в), то при повторном ударе боек разгонялся до меньшей скорости ~ 800 м/с. В результате повторного удара про-

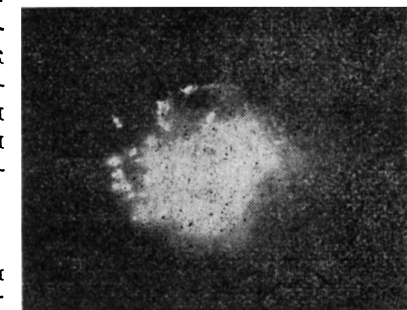


Рис. 3. Деформирующаяся и разрушающаяся тыльная поверхность меди в собственном излучении (2-й тыльный откол).

исходил 2-й тыльный откол (рис. 1, в), сопровождавшийся излучением значительно большей интенсивности (рис. 2, а).

Увеличение интенсивности излучения дало возможность получить фотографии процесса в собственном излучении без применения электронно-оптического

преобразователя с помощью фотоаппарата (рис. 3). Использовалась высоко-чувствительная пленка РФ-3, имеющая чувствительность в диапазоне длин волн 3000—6000 Å [5]. Затвор фотоаппарата в течение опыта оставался открытым, поэтому экспозиция определялась длительностью импульса 25—100 мкс (рис. 2, а). Как видно из фотографии (рис. 3), деформирующаяся и разрушающаяся область медного образца светится неравномерно. Осуществлена сверх-скоростная киносъемка (рис. 4, а) процесса с помощью прибора ЛВ-04 «Лупа

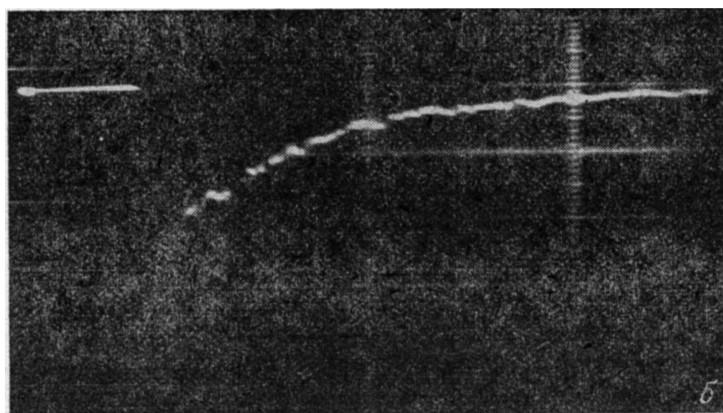
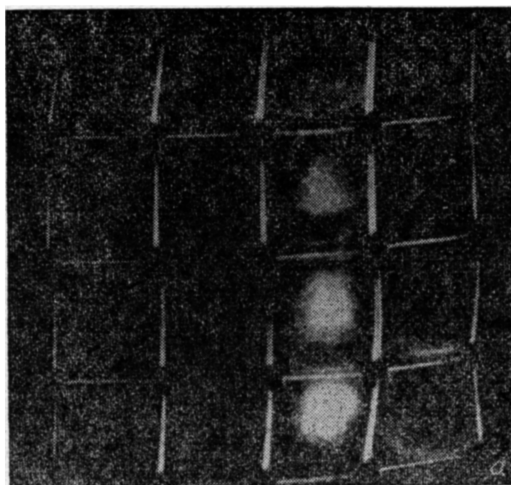


Рис. 4. Покадровая фотография излучения при деформации и разрушении тыльной поверхности меди (2-й тыльный откол) (экспозиция кадра 10 мкс, счет кадров ведется снизу вверх и слева направо) (а) и осциллограмма сигнала фотоумножителя при деформации и разрушении деформированной тыльной поверхности меди (2-й тыльный откол) ($t_{\text{раз}} = 20$ мкс/дел, $U = 20$ В/дел) (б).

времени», в котором использовался электронно-оптический преобразователь (ЭОП) УМИ-93. Одновременно излучение регистрировалось с помощью фотоумножителя ФЭУ-38 (рис. 4, б). ЭО УМИ-93 и ФЭУ-38 чувствительны в одинаковом спектральном диапазоне длин волн 3000—8200 Å. «Лупа времени» дает возможность получить последовательно во времени 16 фотографий. Методика покадровой съемки состояла в следующем: сначала на место тыльной поверхности образца помещался светящийся по периметру квадрат и снимался на пленку с помощью «Лупы времени». Геометрически тыльная поверхность образца вписывалась в светящийся периметр. Затем образец подвергался удару бойка, разрушался и фотографировался в собственном свете.

Спектр излучения исследовался с помощью спектрографа ИСП-51, высоко-чувствительной пленки «Изопанхром», имеющей спектральную чувствитель-

ность в диапазоне длин волн 3500—7000 Å [6], а также пленки «Kodak infrared film», расширяющей спектральный диапазон до ~9000 Å [7]. На рис. 5 представлен полученный спектр излучения. Видно, что излучение состоит из сплошной и линейчатого спектров. Сплошной спектр представляет собой спектральную полосу полушириной 600—750 Å, имеющую два максимума в области длин волн 5800 и 7200 Å. При этом интенсивность излучения в области 7200 Å приблизительно в 3—4 раза больше полосы с $\lambda_{\max} \sim 5800$ Å, т. е. примерно аналогична спектру излучения, сопровождающего первый тыльный откол. Линейчатый спектр состоит из наиболее интенсивных и с малым потенциалом возбуждения линий атомов меди в длинноволновой его части [8]. Линии элементов, входящих в состав примесей меди, а также окружающего воздуха в спектре отсутствуют. Очевидно, при быстрой деформации и разрушении тыльной поверхности металла при 2-м тыльном отколе имеет место вылет возбужденных атомов. На наличие такого явления при разрушении диэлектриков и металлов указывалось в работах [9—11].

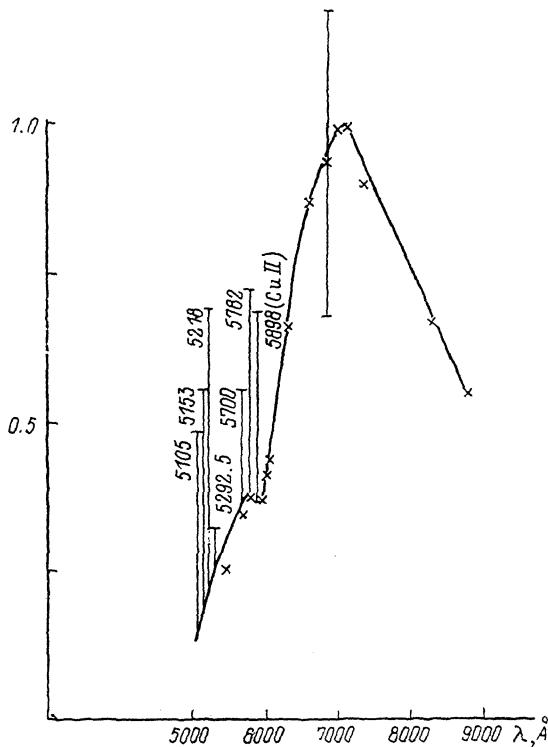


Рис. 5. Спектр излучения, сопровождающего 2-й тыльный откол.

Была проведена серия экспериментов с целью обнаружить более жесткое излучение — рентгеновское. Но это не дало положительного результата.

Известно, что при разрушении твердых тел, особенно металлов, вблизи поверхности, образованной в результате разрушения, образуется пластически деформированная зона [12]. Проведенные измерения микротвердости на поперечном сечении медного образца показали, что на глубине 0.1—0.2 мм от тыльной поверхности, образованной после 1-го тыльного откола, имеется сильно деформированный слой. Аналогичные результаты для меди получены в работе [13]. По данным работ [14, 15] плотность дислокаций, образующихся в пластически деформированной зоне меди при ее разрушении, близка к предельной — 10^{11} — 10^{12} см⁻².

В работах [14, 16] предложен дислокационный механизм возбуждения механолюминесценции. Если механолюминесценция связана с выходом подвижных дислокаций на поверхность, то любой процесс, приводящий к размножению дислокаций вблизи поверхности или к освобождению слабо закрепленных дислокационных петель, должен привести к увеличению интенсивности излучения. В нашем случае при 1-м тыльном отколе вблизи поверхности разрыва на вновь образованной тыльной поверхности возникла зона, в которой плотность дислокаций возросла. Поэтому второй удар (2-й откол) освобождает большее число дислокационных петель, что и увеличивает интенсивность излучения.

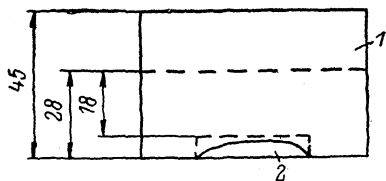


Рис. 6. Образец, в котором в наших условиях не возникает тыльный откол.

1 — часть образца, удаляемая после удара; 2 — след удара бойка.

дислокационных петель, должен привести к увеличению интенсивности излучения. В нашем случае при 1-м тыльном отколе вблизи поверхности разрыва на вновь образованной тыльной поверхности возникла зона, в которой плотность дислокаций возросла. Поэтому второй удар (2-й откол) освобождает большее число дислокационных петель, что и увеличивает интенсивность излучения.

Для проверки этого предположения удалялся сильно деформированный, прилегающий к тыльной поверхности слой, образованный 1-м ударом, на глубину 0.5 мм. Затем повторным тыльным отколом образец деформировался и разрушался. Интенсивность излучения упала, а длительность возросла до величин, соответствующих 1-му тыльному отколу.

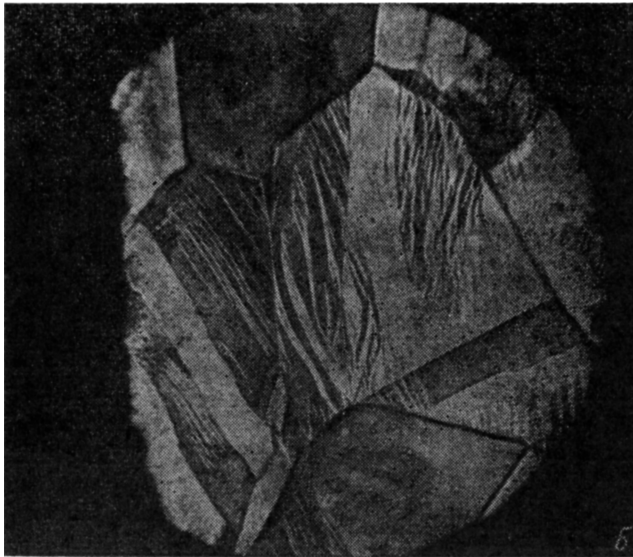
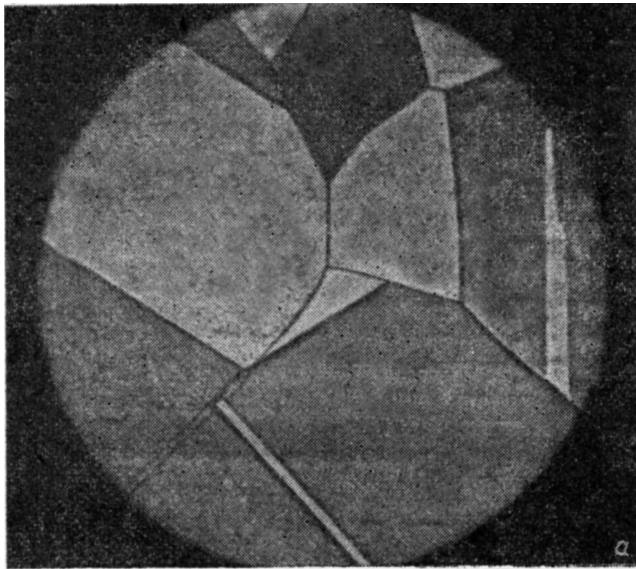


Рис. 7. Структура металла вблизи тыльной поверхности медного образца, образованной при 1-м тыльном отколе, после среза с нее 0.5 мм металла (увеличение 100) (а) и образца, вырезанного из толстого образца (увеличение то же) (б).

Был проведен еще один опыт для подтверждения предположения о том, что именно наличие деформированной области металла приводит к увеличению интенсивности излучения. При ударе бойка по образцу (рис. 1, а) упругопластическая волна выходит на тыльную поверхность и отражается в виде волны растяжения с амплитудой, достаточной, чтобы произвести тыльный откол (рис. 1, б) [2, 3, 12]. При этом основная доля энергии упругопластической волны тратится на деформацию, разрушение, на отрыв тыльной поверхности и образование пластической зоны вблизи поверхности разрыва и лишь небольшая ее часть уходит

в глубь образца, практически уже не деформируя его. Если использовать более толстый образец (рис. 6), то упругопластическая волна сжатия, образованная в результате такого же удара бойка, пройдя большее расстояние и выйдя на тыльную поверхность, уже не имеет достаточной интенсивности, чтобы произвести тыльный откол. Вследствие многократного ее отражения внутри образца возникает область с сильно деформированной структурой [12] (рис. 7, б), которая может быть использована для изготовления образца. Такой образец на рис. 6 показан штриховой линией.

При тыльном отколе такого образца интенсивность излучения оказалась практически равной интенсивности излучения при 2-м тыльном отколе, а длительность составила 400 мкс. Таким образом, подготовка образцов двумя различными способами привела к тому, что интенсивность импульса механолюминесценции, сопровождающего тыльный откол, выросла на 2.5—3 порядка по сравнению с излучением неподготовленного образца и была в обоих случаях примерно одинаковой, а продолжительность оказалась разной, отличающейся в четыре раза.

Подготовка образцов состояла в том, что в приповерхностном слое создавалась сильно деформированная область с высокой плотностью дислокаций, при этом в первом случае, как уже указывалось, эта область составляла доли миллиметра, а во втором распространялась практически на всю толщину образца. Вероятно, разная длительность импульса излучения при 2-м тыльном отколе, полученная при отколе оторванной и подготовленной точеной поверхности образца, связана с разной глубиной деформированного слоя металла, прилегающего к тыльной поверхности.

Таким образом, в заключение можно сказать, что описанные опыты свидетельствуют в пользу дислокационного механизма возбуждения люминесценции металлов [14, 16, 17], поскольку интенсивность и продолжительность импульса излучения возрастают с увеличением плотности дислокаций и толщины приповерхностного слоя, в котором создана эта повышенная плотность.

Авторы благодарны Б. П. Перегуду за постоянное внимание и поддержку работы, Н. А. Златину за предоставление возможности проведения экспериментов и полезные обсуждения.

Литература

- [1] Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Златин Н. А. и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 11. С. 1873—1874.
- [2] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
- [3] Витман Ф. Ф., Иванов М. И., Иоффе Б. С. // ФММ. 1964. № 18. С. 717—723.
- [4] Niehus H. // Surface Science. 1983. Vol. 130. N 1. P. 41—49.
- [5] Гороховский Ю. И., Гилева С. С. Свойства фотографических материалов на прозрачной подложке. М.: Гостехиздат, 1955. 236 с.
- [6] Гороховский Ю. И., Баранова В. П. Свойства черно-белых пленок. М.: Наука, 1970. 388 с.
- [7] Kodak Infrared Film. Eastman Kodak Company. N 177. 1976. 20. p.
- [8] Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М., Шрейдер Е. Я. Таблицы спектральных линий. М., 1962. 607 с.
- [9] Бутягин П. Ю. // Успехи химии. 1984. Т. 53. № 11. С. 1769—1789.
- [10] Молоцкий М. И. // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. 1983. Т. 12 (372). № 5. С. 30—40.
- [11] Абрамова К. Б., Пазомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 5. С. 978—981.
- [12] Либовиц Г. // Разрушение. М.: Мир, 1973. Т. 1. 615 с.
- [13] Lucas P., Klesnil M., Fiedler R. // Phil. Mag. 1969. Vol. 20. N 166. P. 799—805.
- [14] Молоцкий М. И. Докт. дис. Воронеж, 1983.
- [15] Мейерс М. А., Мурр Л. Е. // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Металлургия, 1984. С. 176—178.
- [16] Молоцкий М. И. // ФММ. 1983. Т. 55. № 1. С. 43—50.
- [17] Молоцкий М. И. // ФТТ. 1978. Т. 20. Вып. 6. С. 1651—1656.