

При естественном соотношении  $\lambda_0 \ll \lambda \sim f \ll f_0$ , где  $f$  и  $f_0$  — характерные фокусные расстояния в управляющей структуре и в отдельно взятом генерационном ондуляторе, вклад последнего в дисперсию будет малым, ослабленным на фактор  $f/f_0$ ; при необходимости более общее исследование позволяет определить уточненные условия компенсации дисперсии.

В дальнейшем рассмотрении нуждаются вопросы влияния управляющих полей на коллективную динамику пучка и излучения. Но ясно, что подавление дисперсии описанными приемами может существенно расширить область эффективной генерации когерентного излучения в направлении повышения энергии электронов (следовательно, жесткости и мощности излучения) и использования пучков с большими эмиттансами при умеренных импульсных токах.

### Список литературы

- [1] Артамонов А. С., Дербенев Я. С., Иноземцев Н. И. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 3. С. 214—215.

Научно-исследовательский,  
проектно-конструкторский  
и технологический институт  
комплектного электропривода  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
31 января 1989 г.

05; 07

Журнал технической физики, т. 60, в. 4, 1990

© 1990 г.

## ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА НАГРУЖЕННЫМИ МЕТАЛЛАМИ

К. Б. Абрамова, Б. П. Перегуд, И. П. Щербаков

В последние десятилетия было установлено, что деформация и разрушение всех материалов стимулируют целый ряд явлений: механоэмиссию, механохимию, механолюминесценцию. Это породило новые направления исследований. Все они представляют самостоятельный интерес. Их изучение поможет построить более полную картину нагруженного и разрушающегося твердого тела.

Настоящая работа посвящена описанию исследований механолюминесценции металлов при их статическом нагружении. Ранее было установлено, что деформация и разрушение металлов в широком диапазоне скоростей нагружения приводит к излучению металлами света [1-6]. Было показано, что при прочих равных условиях интенсивность излучения, сопровождающего разрушение, зависит от характеристик металла [5] и скорости нагружения его. Интенсивность падает с уменьшением величины  $\sigma_T/\lambda$  (где  $\sigma_T$  — предел текучести,  $\lambda$  — теплопроводность) и с уменьшением скорости нагружения. Исходя из этого, вряд ли можно было ожидать существования интенсивной люминесценции при статическом нагружении, поэтому первые опыты имели целью лишь зафиксировать факт ее существования. Люминесценция металлов при статическом нагружении была зарегистрирована [4]. Для получения информации об этом излучении, приведенной в данной работе, была существенно улучшена техника эксперимента главным образом с целью повышения чувствительности.

В качестве детектора использовался фотоумножитель ФЭУ-136 ( $\Delta\lambda = 300-820$  нм) в режиме счета импульсов. Тщательная световая экранировка, охлаждение фотокатода до  $-20^\circ\text{C}$ , фиксирование его температуры с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , использование специальной защиты от помех [7] позволили снизить шумовой фон до  $N_\Phi \leq 2$  имп/с. Считывающая и записывающая импульсы аппаратура позволяла осуществлять запись практически неограниченно долго, причем интервал считывания мог меняться на десять порядков — от часа до долей микросекунды.

Испытуемые образцы вырезались из металлических лент толщиной 0.1 мм, полученных методом холодной прокатки из меди марки М1, стали 4Х13, титана ВТ-1-0. Эскиз образца

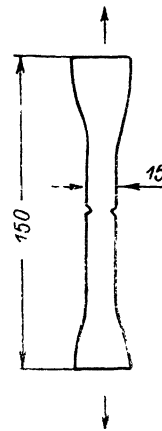


Рис. 1. Эскиз образца, подвергнутого нагружению.

приведен на рис. 1. Фотоумножитель располагался на расстоянии нескольких сантиметров от поверхности образца так, чтобы «видеть» область вокруг концентратора напряжений. Нагружение осуществлялось с помощью гирь и рычажного механизма, растягивающего образец (рис. 1). Интервалы считывания сигналов фотоумножителя менялись от 25 мин до  $10^{-2}$  с. Кроме того, параллельно постоянно включенной считывающей аппаратуре мог подключаться осциллограф, при этом временное разрешение могло быть  $5 \cdot 10^{-7}$  с.

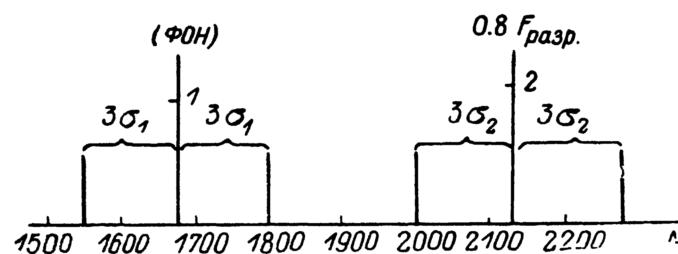


Рис. 2. Число импульсов, зарегистрированное фотоумножителем за 2 ч при наличии перед его окном ненагруженного (1) и нагруженного (нагружение 60 кг) образцов (2).

На рис. 2 приведены результаты опыта, подтверждающие существование механолюминесценции при квазистатическом нагружении металла. Сначала в течение 2 ч записывалось общее число импульсов в отсутствие нагрузки на образец, установленном против фотокатода  $N_{\phi}$ , затем образец был нагружен до  $F = 0.8 F_{раз}$  и опять в течение 2 ч записывались сигналы  $N_c$ . Как видно из рис. 2,  $N_c - 3\sigma > N_{\phi} + 3\sigma$  ( $\sigma$  — среднеквадратичная ошибка), откуда следует, что с вероятностью 0.997 зарегистрировано наличие избыточного над фоном излучения,

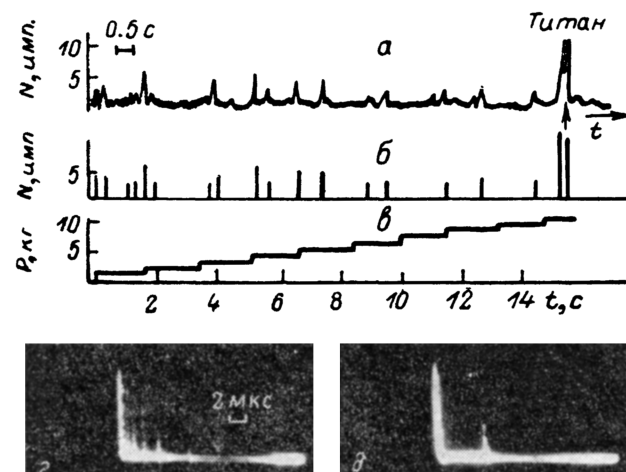


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от времени, полученная с интервалом считывания 100 мс.

$a$  — полная запись сигналов ФЭУ;  $b$  — та же зависимость, что и на рис. 3,  $a$ , но после обработки, в результате которой исключен фон;  $в$  — зависимость роста нагрузки от времени;  $г, д$  — осциллограммы сигналов ФЭУ для  $F < F_{раз}$ , время развертки 50 мкс.

т. е. механолюминесценция в квазистатическом режиме. Результаты опытов с разными металлами и различными режимами нагружения подтвердили, что в квазистатическом нагружении ( $F_{нагр} < F_{раз}$ ) возбуждается механолюминесценция, при снятии нагрузки излучение исчезает, при повторном нагружении возобновляется, интенсивность люминесценции хрупких металлов несколько выше интенсивности излучения пластичных. На рис. 3,  $a, б$  приведены зависимости интенсивности излучения от времени, полученные в течение 15 с, с интервалом считывания 100 мс.

На рис. 3,  $г, д$  приведены осциллограммы со временем развертки 50 мкс, соответствующие двум произвольным моментам времени в течение этих 15 с. Из рисунков видно, что возбуждаемое излучение не непрерывно, а возникает отдельными всплесками. Каждый такой всплеск состоит из 3—7 импульсов, излучаемых в течение 5—10 мкс. Возбуждение отдельных пакетов излучения может быть связано с возникновением отдельных короткоживущих очагов необра-

тимой деформации. Феноменологическая картина напоминает люминесценцию, возникающую в видимой части спектра при механическом воздействии на диэлектрик, где появление импульса механолюминесценции также связывают с возникновением первичных актов разрушения [8], хотя механизм возбуждения люминесценции диэлектриков и металлов не обязательно один и тот же.

Измерить спектральное распределение излучения не представляется возможным. Но поскольку в работе [9] с помощью камеры АГА-750 ( $\Delta\lambda \approx 2-5$  мкм) было показано, что в наиболее нагруженной области образца при его статическом нагружении (по-видимому, в местах возникновения необратимой деформации) образуются локальные кратковременные скачки температуры, то возникает опасение, что зарегистрирована не люминесценция, а коротковолновый «хвост» температурного излучения. Это опасение снимается тем обстоятельством, что приведенные выше результаты получены с помощью ФЭУ-136, область чувствительности которого 0.3—0.82 нм, а при использовании в качестве детектора ФЭУ-83 ( $\Delta\lambda = 0.78-1.1$  нм) превышения полезного сигнала над фоном в аналогичных опытах не зарегистрировано. Предварительно были сняты спектральные характеристики использованных в опытах фотомножителей и сравнены их относительные чувствительности. Детекторы обладают равной чувствительностью при  $\lambda = 0.77$  нм. В более коротковолновой области чувствительнее ФЭУ-136: уже при  $\lambda = 0.73$  нм  $J_{\text{ФЭУ-136}} = 2J_{\text{ФЭУ-83}}$ , в длинноволновой области большая чувствительность у ФЭУ-83: при  $\lambda = 0.80$  нм  $J_{\text{ФЭУ-136}} = 0.5 J_{\text{ФЭУ-83}}$ . Таким образом, длины волн излучения, возникающего при статическом нагружении металлов, лежат в области  $\lambda < 0.78$  нм и, следовательно, оно не может быть тепловым и является люминесцентным.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1. Квазистатическое нагружение металла при ( $F_{\text{нагр}} < F_{\text{разр}}$ ) сопровождается люминесценцией в видимом диапазоне длин волн.
2. Это излучение не непрерывно, оно возникает отдельными всплесками.
3. При снятии нагрузки излучение исчезает.
4. При повторном нагружении возобновляется.
5. Число всплесков излучения при прочих равных условиях больше при нагружении хрупких металлов по сравнению с числом всплесков, зарегистрированных при нагружении пластичных металлов.

#### Список литературы

- [1] Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Златин Н. А. и др. // ДАН СССР. 1971. Т. 201. С. 1322—1325.
- [2] Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Златин Н. А. и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 11. С. 1873—1874.
- [3] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 1. С. 769—772.
- [4] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 17. С. 1025—1028.
- [5] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 16. С. 997—999.
- [6] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 5. С. 978—981.
- [7] Браслетов В. А. // ПТЭ. 1983. № 6. С. 159—161.
- [8] Струковский А. А., Крауя У. Э., Фомина Я. Я. // X Юбилейный симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ростов-на-Дону, 1986. С. 54.
- [9] Абрамова К. Б., Пахомов А. Б., Перегуд Б. П., Щербаков И. П. // ЖТФ. 1988. Т. 56. Вып. 4. С. 817—821.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступила в Редакцию  
10 февраля 1989 г.  
В окончательной редакции  
22 июня 1989 г.