

05.1;07;12

©1995

ОДНА ИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

*К.Б.Абрамова, Г.И.Малинин,
С.Э.Шконда, И.П.Щербаков*

Деформирование твердых тел — постоянно происходящий и широко используемый процесс, состоящий из большого набора взаимосвязанных и взаимозависимых явлений. Активно исследуется и широко обсуждается в современной научной литературе. К настоящему времени надежно установлено, что деформирование и разрушение всех твердых тел — диэлектриков, полупроводников и проводников — включает в себя ряд явлений, называемых вторичными. Это локальные повышения температуры и давления, накопление зарядов, генерация акустических колебаний и электромагнитного излучения, химические реакции на свежесформированных поверхностях и в окружающей среде, излучение фотонов, ионов, атомов, конгломератов из нескольких молекул [¹⁻⁶]; в отдельных публикациях сообщается о возбуждении рентгеновского излучения [⁷].

Нам представляется, что исследуя излучение фотонов — механолюминесценцию, можно получить наибольшее количество информации о связи элементарных процессов разрушения с возбуждениями в электронной подсистеме образца, динамикой механических процессов, а для непрозрачных образцов — уникальные сведения о поверхностном слое.

Описаны основные характеристики механолюминесценции большого количества материалов: измерены спектры, установлена зависимость интенсивности и продолжительности от условий нагружения. Однако, как правило, в одних и тех же условиях исследуется один материал, поэтому на основании имеющихся сведений не представляется возможным построить зависимость или написать хотя бы эмпирическую формулу общих закономерностей для всех материалов. Только для металлов [⁸] установлено, что среднее значение интенсивности излучения зависит от прочности и теплопроводности материала и является монотонно возрастающей функцией параметра σ_T/λ , где σ_T — предел текучести, λ — коэффициент теплопроводности.

Целью данной работы является проверка существования такой зависимости для диэлектриков. Ее наличие позво-

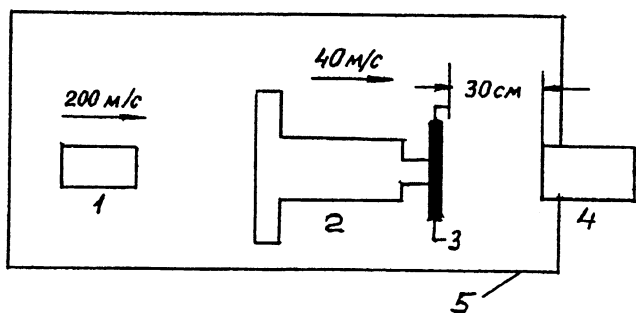


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — металлический боек, 2 — боек-ударник, 3 — разрушаемый образец, 4 — детектор излучения, 5 — светозащитная камера.

лит, как минимум, примерно оценить на основании знания характеристик материала интенсивность его механолюминесценции.

Для первых опытов образцы диаметром 10 и толщиной 4 мм были изготовлены из наиболее распространенных диэлектриков (оргстекла, эбонита, фторопласта, текстолита, полиэтилена, одного биогенного твердого тела — почечного камня и его основных минеральных остовов (оксалата калия, оксалата калия с добавкой калия и фосфата). Кроме того, несколько опытов сделано с образцами из каменной соли, поскольку вторичные эффекты, и в том числе люминесценция каменной соли, при разрушении и деформировании довольно хорошо исследованы [1]. Для разрушения использовалась легкогазовая пушка [9], в стволе которой разгонялся металлический боек (схема эксперимента приведена на рис. 1). Поскольку прочность исследуемых образцов мала, то между образцом и основным бойком помещался еще один боек — ударник, который и разрушал образец, оставаясь невидимым для детектора. Скорость основного бойка во всех опытах была 200 м/с, скорость ударника 40 м/с. Детектором служил фотоумножитель ФЭУ-136, обладавший чувствительностью в диапазоне 300–830 нм $\sim 10^{-15}$ Вт и расположенный на расстоянии 0.3 м от разрушающегося образца. Было изготовлено по 5 образцов из каждого диэлектрика и измерено излучение при разрушении каждого из них. В табл. 1 приведены результаты измерений.

В одной из больниц Санкт-Петербурга получены камни, удаленные у нескольких больных мочекаменной болезнью. Из них удалось изготовить 5 стандартных образцов и зарегистрировать излучение при их разрушении. Однако почечные камни сложны и по химическому составу, и по

Таблица 1.

Материал	Среднее за 5 измерений число импульсов излучения (N , шт)	Средняя за 5 измерений длительность излучения (τ , мс)
Оргстекло	200	5
Эбонит	20	10
Фторопласт-4	108	25
Текстолит	47	25
Полиэтилен	43	3
Каменная соль	134	10
Почечный камень	130	1
Кремний	1930	20

строению; по-видимому, можно сказать, что каждый из них уникален. Это, несомненно, вызывает сложности при измерении излучения, определении их прочностных характеристик и интересующей нас в данном случае теплопроводности. Если предположить, что большая часть интенсивности излучения, сопровождающего разрушение почечного камня, определяется его минеральной основой, то можно изготовить квазимодель камня и, определив порядок величины отношения σ_T/λ для нее, приписать это значение реальным камням.

Известно [10], что минеральная основа почечных камней определяется следующими неорганическими и орга-

Таблица 2.

Материал	Усиление прессования (τ)	Среднее за 5 измерений число импульсов излучения (N , шт)
№ 3	2	108
	3	136
	4	120
	5	123
№ 2	1	158
	2	178
	3	107
	4	226
	5	206
№ 1	6	63

ническими соединениями: карбонаты, фосфаты, гидроксиды, оксалаты, ураты, а также их смеси; при этом распространённость минералов в каждой группе различна. Так, оксалат кальция ($\text{Ca}(\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ или $\text{Ca}(\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) встречается приблизительно в 75% камней, в 5% — различные фосфатные соединения ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и т. д., $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$); часто встречаются урениты, в них входит 10–20% струвита ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), который также является солью фосфорной кислоты.

В связи с этим для модельных оротов были синтезированы порошки (образцы № 1 и № 2) на основе оксалата кальция, имеющих как структуру уэвеллита ($\text{Ca}(\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), так и структуру уэдделита ($\text{Ca}(\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с небольшой примесью ионов калия), изучение которых могло бы дать представление о поведении наиболее распространённой минеральной группы оксалатов. Для исследования фосфатной

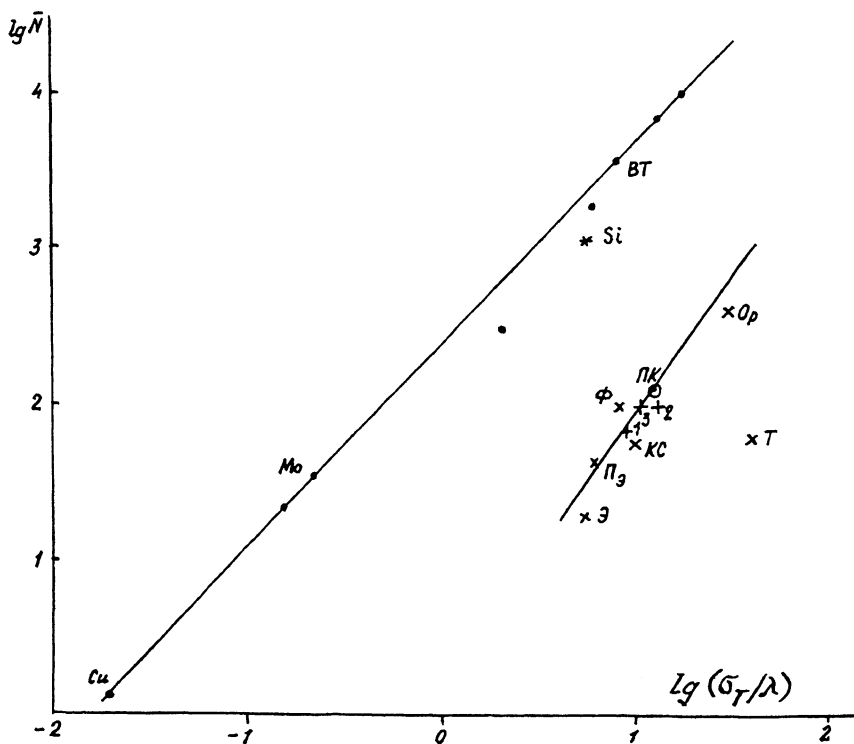


Рис. 2. Зависимость средней величины сигнала \bar{N} от параметра σ_T/λ (величины σ_T и λ взяты из [11]).

Э — эбонит, Пэ — полиэтилен, Ф — фторопласт, ПК — почечный камень, ОР — оргстекло, Т — текстолит, КС — каменная соль.

группы был выбран витлокит — чистый ортофосфат кальция ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, образец № 3). В первом приближении не рассматривался механизм роста и укрупнения минеральной части камней, компактирование порошков проводилось по методике одноосного полусухого прессования. С целью учета влияния этого способа формирования минеральной основы на другие исследуемые свойства все образцы готовились при четырех различных давлениях прессования. В табл. 2 приведены результаты измерений их излучения при разрушении и определения порядка величины σ_T/λ стандартными методами. Как видно из таблиц, изменение усилия прессования мало сказывается на величине интенсивности излучения. Можно надеяться, что во всех случаях разрушаются микрокристаллы минерала.

На рис. 2 приведена полученная зависимость $\lg \bar{N} = f(\lg \sigma_T/\lambda)$. Как видно, это прямая линия. (Исключение составляет текстолит, однако он единственный среди исследовавшихся материалов является композитом. Возможно, поэтому и возникло отличие). Для сравнения здесь же приведена полученная ранее [8] аналогичная зависимость для металлов. Как видно из рисунка, среднее значение интенсивности \bar{N} излучения, возникающего при разрушении диэлектриков, так же как и для металлов, является степенной монотонно возрастающей функцией отношения σ_T/λ , т. е. и тут способность излучать свет при разрушении зависит от концентрации энергии в вершине трещины. Однако на рис. 2 приведены две непараллельные прямые: показатель степени функции, описывающей излучение металлов, отличается от соответствующего показателя степени для диэлектриков. По-видимому, аналогичная зависимость существует и для полупроводников. Соответствующая линия, как нам представляется, может пройти между линиями 1 и 2. Основанием для такого предположения служат измерения интенсивности излучения кремния, существенные в описанных условиях.

Список литературы

- [1] Meyer K., Obrikat D., Rossberg M. // *Kristall und Technic*. 1970. V. 5. N 1. P. 5–49; 1970. V. 5. N 2. P. 180–205.
- [2] Molotskii M.I. // *Chem. Rev. (Sov. Sci. Rev. Sec. B)*. 1989. V. 13. Pt 3. P. 1–85.
- [3] Грешников В.А., Дробов Ю.В. *Акустическая эмиссия*. М.: Изд. стандартов, 1976.
- [4] Бутягин П.Ю. // *Успехи химии*. 1984. В. 11. С. 1769–1789.
- [5] Рабинович Э. // *УФН*. 1979. Т. 127. В. 1. С. 163–174.
- [6] Абрамова К.Б., Шербаков И.П. // *ЖТФ*. 1994. Т. 64. В. 9. С. 76–89.
- [7] Гораздовский Т.Я. // *Письма в ЖЭТФ*. 1967. Т. 5. В. 3. С. 78–82.
- [8] Абрамова К.Б., Патомов А.Б., Перегуд Б.П., Шербаков И.П. // *Письма в ЖТФ*. 1985. Т. 11. В. 18. С. 997–999.

- [9] *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях* / Под ред. Н.А. Златина, Г.И. Мишина. Наука, 1974.
- [10] *Гимпельсон Э.И. Камни почек и мочеточников*. М.: Медгиз, 1956.
- [11] *Таблицы физических величин. Справочник* / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург;
Джоржтаунский университет,
Отделение физики
Вашингтон, США

Поступило в Редакцию
21 декабря 1994 г.

