

05;12

## Электромагнитное излучение при разрушении пьезоэлектриков субмикросекундными импульсами давления

© Ю.В. Судьенков

Санкт-Петербургский государственный университет,  
198904 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 16 мая 2001 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований разрушения монокристаллов кварца и пьезоэлектриков при воздействии импульсов давления длительностью  $\sim 80$  ns. Обнаружена генерация электромагнитных импульсов длительностью 2–10 ns при возникновении микроразрушений в пьезоэлектриках. Обнаружена корреляция возникновения электромагнитного излучения с процессами микроразрушений, происходящих при отколе. Отмечается, что исследования структуры электромагнитных импульсов, генерируемых при разрушении пьезоэлектриков, в совокупности с фрактографическим анализом создают превосходную возможность получить в реальном масштабе времени значительную информацию о развитии процесса разрушения хрупких материалов при ударных нагрузках.

Характерные длительности импульсов электромагнитного излучения, регистрируемых при землетрясениях и геофизической разведке рудных тел с пьезоэлектрическими свойствами, а также и в лабораторных исследованиях обычно имеют значения более чем  $2-3 \cdot 10^{-6}$  s [1–3]. При этом значения длительности ударных нагрузок превышают  $10^{-6}$  s.

В то же время в процессе экспериментальных исследований динамической прочности и упругопластических свойств материалов при субмикросекундном ударном нагружении с длительностями 50–250 ns [4–6] неоднократно на осциллограммах сигналов с пьезоэлектрических датчиков на фоне регистрируемых импульсов механических напряжений фиксировались одиночные или серии коротких (2–10 ns) импульсов электрического тока.

На рис. 1, *a–c* представлены характерные осциллограммы сигналов при нагружении образцов кварца X-среза. При давлениях нагружения превышающих величину  $\sim 150$  МПа возникновение сигналов происходило в различное время, зачастую начиная с фронта регистрируемых импульсов давления. Чувствительность пьезопластин и их макроскопическая целостность сохранялись. При повторных нагружениях увеличивалось количество регистрируемых импульсов (рис. 1, *c*), снижалась чувствительность пьезопластин и возникали макротрещины. Исследование электрических сигналов с пьезопластин и антенны в виде витка, расположенного вокруг их боковой поверхности и нагруженной на волновое сопротивление ( $50 \Omega$ ), показали, что сигналы, регистрируемые антенной и обусловленные магнитной составляющей поля, появлялись одновременно с импульсами тока с пьезодатчика.

Причиной возникновения коротких импульсов электромагнитного излучения является образование новых поверхностей в результате разрушений на микроструктурном уровне, что приводит к появлению локальных градиентов поляризации и высокой напряженности электрического поля. Наиболее эффективным механизмом генерации электромагнитных импульсов в пьезоэлек-

триках, по-видимому, является электрический пробой. Оценки и измерения напряженности электрического поля в пьезоэлектриках в устье трещин [6] дают значения порядка  $10^6-10^8$  V/m, достаточные для возникновения пробоя.

В экспериментах диаметр зоны нагружения превышал размеры пьезодатчиков. Поэтому возникновение электромагнитных импульсов на фронтах импульсов сжатия неудивительно и объясняется микроразрушениями вблизи боковой поверхности датчиков в волне разгрузки. Тем более известно, что поверхностная прочность таких хрупких материалов, как кварц, за счет технологических процессов обработки значительно ниже объемной.

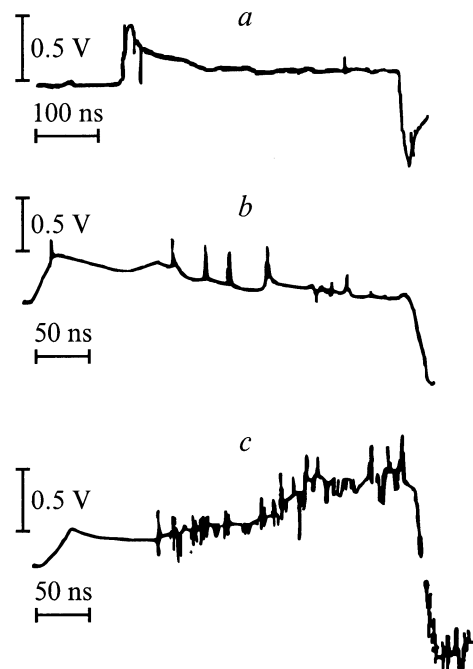
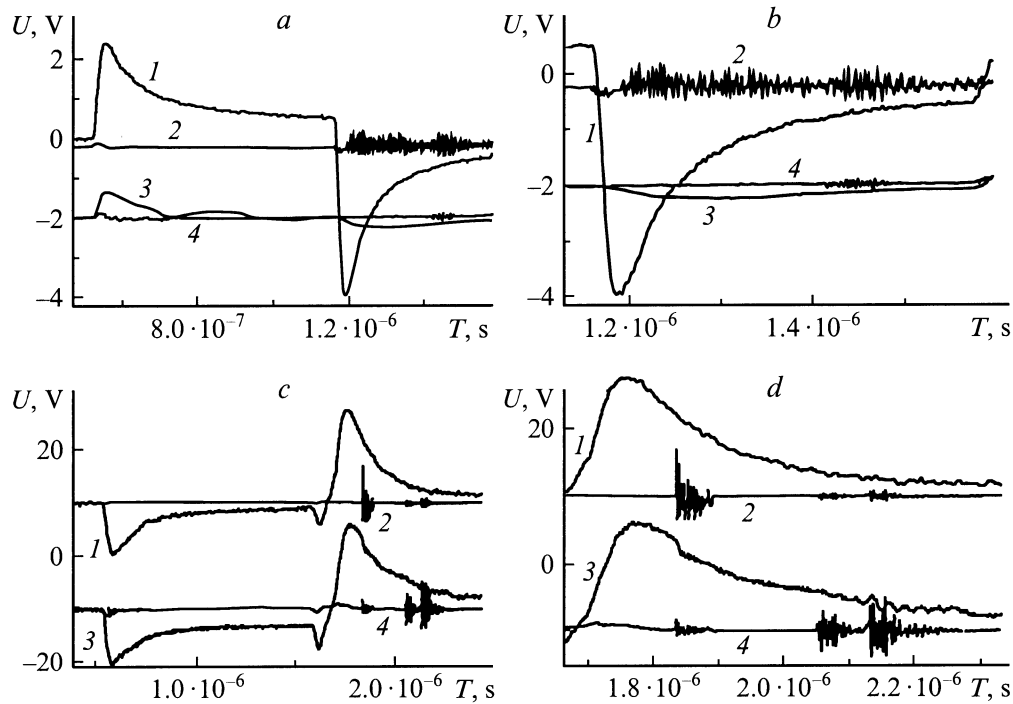


Рис. 1. Осциллограммы сигналов с пьезодатчиков из  $\text{SiO}_2$  X-среза.  $R = 50 \Omega$ , осциллограф С7-10Б.



**Рис. 2.** Осциллограммы сигналов при отколе (осциллограф TDS-754C). *a, b* — образец  $\text{SiO}_2$  X-среза ( $24 \times 3.65$  mm); *c, d* — образец пьезокерамики ЦТБС-3 ( $24 \times 5.68$  mm); *b, d* — увеличенные фрагменты осциллограмм, соответствующие выходу импульса на свободную поверхность образцов; 1, 3 — осциллограммы тока с пьезообразцов; 2, 4 — осциллограммы с индуктивного датчика.

Интерес представляет изучение корреляции возникновения и эволюции электромагнитных импульсов с процессами микроразрушений при отколе в условиях ударного нагружения суммикросекундной длительности.

Для разделения по времени процессов разрушения с боковых поверхностей и при отколе были проведены исследования на образцах большего размера. Исследовались образцы монокристаллов кварца X-среза диаметром 24 mm и толщиной 3.65 mm, а также образцы из пьезокерамики ЦТБС-3 ( $24 \times 5.68$  mm) при размере области нагружения 8 mm. В такой геометрии эксперимента образование волны разгрузки на боковой поверхности образцов будет запаздывать более чем на  $10^{-6}$  s относительно времени выхода продольной волны на свободную поверхность.

Нагружение образцов осуществлялось импульсами давления длительностью  $\sim 80$  ns, возбуждаемыми при воздействии импульсного лазерного излучения на тонкий слой алюминия, прижатый к акустическому волноводу из Ti, в контакте с которым находились исследуемые образцы. Для реализации плоского нагружения осуществлялись меры по равномерному распределению лазерной энергии по области облучения.

Датчики работали в режиме "короткого замыкания" ( $R = 50 \Omega$ ). Одновременно с измерением тока с пьезопластин регистрировался сигнал с катушки индуктивности из 6 витков диаметром 27 mm, расположенной вокруг образцов. Временное разрешение тракта регистрации было ограничено 2 ns.

На рис. 2, *a, b* представлены осциллограммы тока с кварцевого образца (кривые 1, 3) и катушки индуктивности (кривые 2, 4), соответствующие нагружению кварцевого образца давлением  $\approx 450$  МПа. Индуктивный датчик регистрирует возникновение импульсов электромагнитного излучения (кривая 2) с длительностями 2–12 ns. Появление сигналов с индуктивного датчика совпадает по времени с формированием и ростом растягивающих напряжений вблизи свободной поверхности образца на глубине  $\sim 85 \mu\text{m}$  от границы, что, по-видимому, обусловлено процессами микроразрушений на дефектах технологической природы, присутствующих вблизи поверхности. Наибольшая же интенсивность электромагнитного излучения достигается в момент формирования максимальных растягивающих напряжений на расстоянии  $\sim 260 \mu\text{m}$  от свободной поверхности, которое соответствует образованию откола. Такое значение толщины откольного слоя подтверждалось фрактографическими исследованиями. Последующий немонотонный характер изменения амплитуды излучения обусловлен, по-видимому, развитием микроразрушений вследствие реверберации импульса напряжений в откольном слое. Повторное нагружение приводило к макроразрушению образцов (кривые 3, 4) — раскалыванию по диаметру на 3–4 части с явно выраженной областью откола у свободной поверхности.

На рис. 2, *c, d* приведены аналогичные осциллограммы для случая нагружения образца пьезокерамики. В отличие от кварца время появления электромагнитного

излучения (кривая 2) совпадает с моментом формирования максимального растягивающего напряжения на глубине  $\sim 430 \mu\text{m}$  от свободной поверхности, что совпало с измеренными значениями толщины откольного слоя. Повторные нагружения образцов (кривые 3, 4) приводили к макроразрушениям, также представляющим совокупность разрушений с боковых поверхностей и в отличие от кварца с более четко выраженным отколом. Интенсивные всплески электромагнитного излучения, появляющиеся при повторном нагружении образцов, обусловлены развитием процесса разрушения при реверберации импульсных напряжений в откольном слое.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили обнаружить, что электромагнитные импульсы при разрушении пьезоматериалом субмикросекундными импульсами давления на три порядка короче наблюдаемых ранее. Причиной этого, по-видимому, является различие характерных масштабов структурных уровней, определяющих процесс разрушения при разных длительностях ударного воздействия.

Отметим, что исследования структуры электромагнитных импульсов, генерируемых при разрушении пьезоэлектриков, в совокупности с последующим фрактографическим анализом создают превосходную возможность получить в реальном масштабе времени значительную информацию о развитии процесса разрушения хрупких материалов, а также о структурных уровнях, определяющих процессы разрушения в том или ином диапазоне длительностей ударной нагрузки.

## Список литературы

- [1] *Минеев В.Н., Иванов А.Г.* // УФЕ. 1976. Т. 119. Вып. 1. С. 75–109.
- [2] *Викторов В.В., Кулич Ю.В., Сиротин А.А.* Препринт ИПМ АН СССР. № 310. М., 1987. 56 с.
- [3] *Демин В.М., Соболев Г.А.* // ДАН СССР. 1987. Т. 295. № 6. С. 1337–1339.
- [4] *Судьенков Ю.В.* Канд. дис. Л., 1986. 132 с.
- [5] *Никитин Ю.Б.* Канд. дис. Л., 1993. 132 с.
- [6] *Chandra B.P., Sahu R.B.* // Cryst. Res. and Technology. 1983. Vol. 18. N 10. P. 1319–1324.