

05:09

©1994 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭМИССИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

*В.Ф.Гордеев, Ю.П.Мальшиков, В.Л.Чазлов, Т.В.Фурса,
В.К.Биллер, В.П.Елусеев*

Первые упоминания о появлении электромагнитных импульсов при деформации и разрушении диэлектрических материалов появились сравнительно давно [1,2]. Однако до настоящего времени отсутствуют четкие физические представления о механизмах появления электромагнитной эмиссии, что тормозит его широкое практическое использование. В работе рассмотрены наиболее вероятные механизмы возникновения эмиссии в некоторых широко применяющихся конструкционных материалах, анализируются практические следствия, вытекающие из полученных результатов.

Введение

Электромагнитная эмиссия наблюдается для большинства неметаллических материалов при различных видах механического возбуждения. В процессе приложения статической или медленно меняющейся нагрузки (изгиб, сжатие, растяжение и т.п.) импульсы электромагнитного поля появляются как в моменты микро- или макрорастрескивания материалов, так и на стадиях, предшествующих разрушению [3]. Их появление связывают с процессами зарождения и развития трещин. Регистрируя электромагнитные импульсы, возникающие в процессе механического нагружения материалов или изделий, можно судить о начале процессов разрушения, скорости и этапах их развития и, как следствие, прогнозировать прочность изделий при нагрузках, меньше разрушающих [4,5].

Для целей электромагнитной эмиссионной дефектоскопии предложены способы возбуждения материалов ударной или периодической нагрузкой [6,7]. При таких способах воздействия дефекты в виде непроклеев, трещин, инородных включений и т.п. генерируют внешнее электрическое поле в течение всего времени воздействия на материал. Перемещая приемник поля электромагнитной эмиссии над поверхностью контролируемого изделия, удастся обнаружить дефекты по изменению интенсивности сигнала и его спектру. Для возбуждения эмиссии в

данном случае необходимы значительно меньшие нагрузки, нежели в случае контроля прочности изделий, и появление импульсов в этом случае уже не связано с процессами развития разрушения. Очевидно, что как при решении задачи диагностики прочности изделий, так и при решении задачи поиска и оценки дефектов структуры наиболее полную информацию можно получать только при известных механизмах возникновения электромагнитной эмиссии. Исследование этих вопросов к настоящему времени выполнено в основном либо на модельных кристаллах, либо на заключительных стадиях развития разрушения [8-11]. Как показывают результаты наших исследований, при воздействии на сложные гетерогенные материалы и при возбуждении ударной нагрузкой работают, как правило, совсем другие механизмы или одновременно несколько механизмов генерации внешнего поля.

В данной работе представлены результаты исследования источников и механизмов эмиссии на примере широко применяющихся монокристаллических и гетерогенных материалов при различных способах механического воздействия. По возможности анализируются также следствия, вытекающие из полученных результатов, применительно к решению задачи диагностики качества изделий по характеристикам электромагнитной эмиссии.

Для измерения электромагнитной эмиссии применялась специально разработанная аппаратура, позволяющая при относительно высокой чувствительности принимать сигналы преимущественно из ближней зоны и подавлять сигналы помех от удаленных источников [5,12]. Регистрировалась электрическая составляющая поля в диапазоне 100 Гц-500 кГц. Приемник поля располагали на расстоянии нескольких мм от поверхности образца или изделия.

Местоположение источников электромагнитной эмиссии

Решение задачи о местах локализации источников электромагнитной эмиссии осуществлялось на силикатных стеклах и полиимиде. Образец стекла в виде квадратной пластины устанавливали через уплотнение в окошке камеры высокого давления. Механическое одностороннее давление на стекло создавалось путем подачи внутрь камеры сжатого воздуха. Приемник электромагнитного поля площадью 4 см² располагали на расстоянии 5 мм от поверхности образца в его центре. На поверхность образца со стороны приемника наносили искусственный дефект в виде царапины. Затем эту поверхность закрывали заземленной металлической фольгой. В исходном состоянии в процессе нагружения образца сигнал не обнаруживался, так как полностью экранировался фольгой. При последующих нагружениях в центральной части образца вырезалась часть фольги и сигнал с открываемой части попадал на приемник. После нескольких замеров открываемая площадь увеличивалась. Схема эксперимента и полученные результаты представлены на рис. 1. Дефект был нанесен алмазной пирамидкой в области 3.

В первой серии экспериментов открывались последовательно окна площадью 4, 9, 16 см² и т.д. (сплошная линия на графике). Во второй серии интервал между 9 и 16 см² промерялся более подробно (штриховая линия).

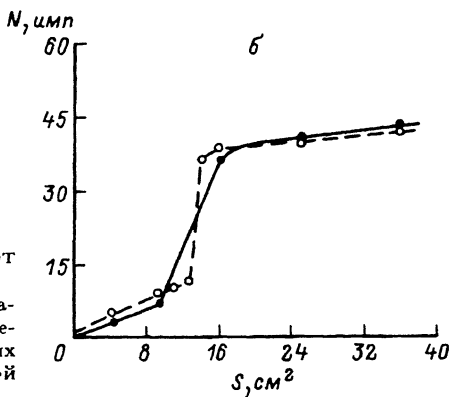
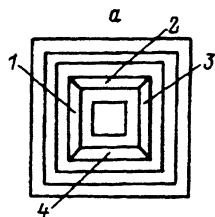


Рис. 1. Зависимость числа импульсов от площади открытой поверхности стекла. *a* — схема постепенного (начиная с центра) удаления экранирующей фольги; *б* — характер изменения числа импульсов (N), зарегистрированных за один цикл нагружения от площади открытой поверхности. Дефект находится в области 3.

Из рисунка виден резкий скачок числа импульсов в момент открытия именно той области, в которой предварительно была нанесена дарапина. Следовательно, подавляющий вклад в результирующий сигнал дает дефектная область силикатного стекла. Увеличение числа импульсов при открытии других частей поверхности указывает на то, что, наряду с дефектом излучают и другие области образца. Ход кривых подтверждает, что эти дополнительные источники относительно равномерно распределены по поверхности образца, а уменьшение наклона кривых с увеличением открываемой площади обусловлено лишь увеличением расстояния от “периферийных” источников до приемника поля, находящегося в центре. Источниками этого типа, по-видимому, являются электростатические заряды, всегда присутствующие на поверхности любого диэлектрика. Как правило, этот заряд распределен мозаично по поверхности материала [13].

Вывод о существовании двух типов источников подтверждают результаты, полученные на полиимиде. Образцы в виде дисков диаметром 60 мм и высотой 50 мм возбуждали вибратором. Измеряли скорость счета электромагнитных импульсов и их среднюю амплитуду на образцах, имевших и не имевших трещин. Размеры трещин оценивали по рентгеновским снимкам. Для устранения поверхностного заряда образцы обрабатывали антистатиком. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Как видно из таблицы, нейтрализация поверхностного заряда приводит к исчезновению сигнала электромагнитной эмиссии. Во внутренние полости антистатик не проникает, поэтому образцы с трещинами сохраняют способность генерировать импульсы и после обработки антистатиком. Как правило, сигнал, обусловленный трещинами, возрастал с увеличением длительности вибрационного воздей-

Дефектность образца	Скорость счета имп/с		Относительная амплитуда, мВ	
	в исходном состоянии	после обработки антистатиком	в исходном состоянии	после обработки антистатиком
Без дефектов	306	0	28	0
С трещиной размером 43×22 мм	401	56	35	20
С трещиной 38×15 мм	451	32	40	15

ствия. Это указывает на то, что трещина генерирует сигнал как за счет исходного поверхностного заряда на ее бортах, так и за счет дополнительной подзарядки бортов в результате их взаимного трения при вибрации. Наряду с ответом на вопрос об источниках и механизмах эмиссии тел при ударном или вибрационном нагружении можно предложить и способ выделения полезного сигнала при электромагнитной эмиссионной дефектоскопии материалов путем предварительной антистатической обработки поверхности контролируемого изделия [7].

Поверхностный электростатический заряд наиболее сильно должен проявляться в многослойных клееных конструкциях с сотовой и ячеистой структурой. Такие конструкции имеют не только внешние, но и многочисленные внутренние поверхности. В то же время их широкое применение затруднено отсутствием надежных методов контроля качества клеевых соединений. Поэтому исследование источников и механизмов электромагнитной эмиссии в ячеистых и сотовых структурах представляет как научный, так и практический интерес.

На рис. 2 приведены схема и результаты исследований электромагнитной эмиссии в многослойной конструкции ячеистой структуры. Дефекты создавали в виде непрочлея между покрывным листом стеклопластика и внутренним ячеистым наполнителем либо со стороны приемника поля, либо со стороны вибратора. Приемник и вибратор размещали друг над другом с противоположных сторон образца. Включали вибратор и перемещали образец. Эксперимент многократно повторяли. Затем результаты усредняли. Как видно из приведенного рисунка, интенсивная электромагнитная эмиссия наблюдалась практически в любой области ячеистой конструкции и была обусловлена возбуждением колебаний поверхностей образца с имеющимися на них электростатическими зарядами. В области непрочлеев (нарушений клеевых соединений) интенсивность сигнала существенно выше. Это связано как с дополнительной электризацией материала вибрационной нагрузкой, так и с образованием разделенного заряда в момент разрыва клеевых соединений. Повышенная концентрация зарядов в местах нарушений клеевых соединений и изменение спектра колебаний обеспечивают повышенный в несколько раз уровень эмиссии в области дефекта. При таком способе возбуждения области непрочлеев, как видно из рис. 2, могут быть обнаружены на глубине нескольких см от поверхности из-

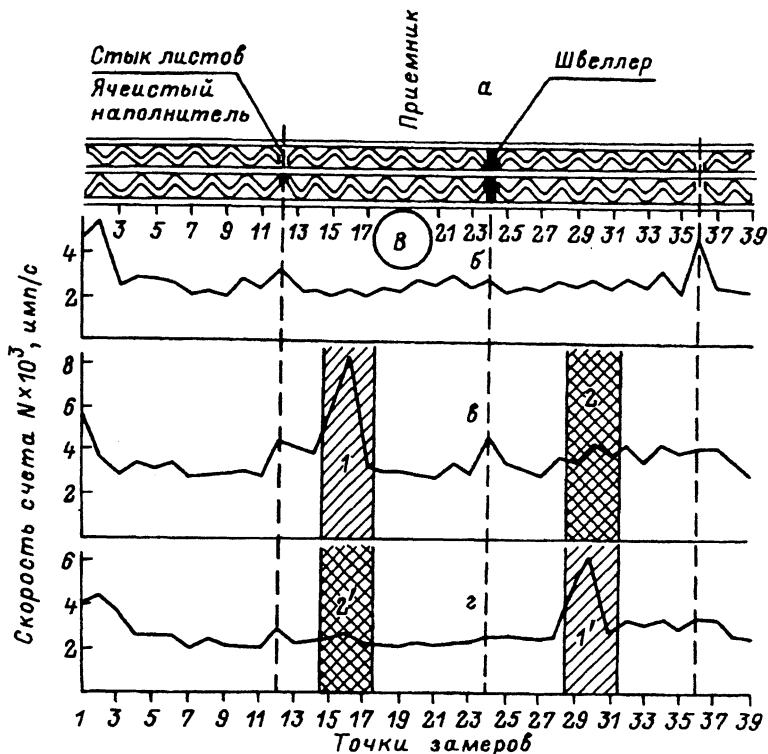


Рис. 2. Изменение скорости счета импульсов электромагнитной эмиссии по длине образца ячеистого стеклопластика.

a — схема эксперимента (*B* — механический вибратор); *б* — для исходного образца; *в, г* — после нарушения клеевых соединений. Область непроклеев заштрихована; *1, 1'* — непроклеи на глубине 3 мм от поверхности образца; *2, 2'* — непроклеи на глубине 57 мм.

деля (толщина образца в эксперименте составляла 60 мм). Область дефекта также выделялась по повышенным значениям амплитуды и изменению спектра сигнала. Следует также подчеркнуть (это видно и из рис. 2), что при тщательных измерениях аномальная электромагнитная эмиссия наблюдается также на стыках листов ячеистого наполнителя, перегородках, отражает ее ячеистое строение.

Таким образом, внешние электромагнитные поля несут информацию не только о дефектности материала, но и внутреннем строении самой конструкции, что существенно расширяет области практического использования явления. Результаты, полученные на стекле, полиимиде и стеклопластике, позволяют сделать вывод о том, что в диэлектрических материалах существуют по крайней мере два источника электромагнитной эмиссии: эмиссия, генерируемая поверхностью твердого тела за счет имеющегося на ней поверхностного электростатического заряда, и эмиссия от дефектных областей монолитных и гетерогенных конструкций. Как внешние поверхности тел, так и их дефектные области генерируют сигналы при различных способах возбуждения: медленно возрастающей нагрузке, вибрационном или ударном возбуждении. Однако остается открытым вопрос о самих механизмах генерации полей этими источниками.

Моделирование возможных механизмов электромагнитной эмиссии

При постановке этих исследований мы исходили из следующих возможных механизмов генерации полей: 1) скачкообразное разделение зарядов на вновь образующихся поверхностях в момент прорастания трещин или разрушения материала; 2) колебательное движение заряженных бортов трещин после акта прорастания; 3) колебательное движение заряженных концов нитей или волокон после их разрыва в волокнистых материалах; 4) колебательное движение электростатического поверхностного заряда, вызванное выходом на поверхность акустической волны в процессе акта микро- или макрорастрескивания; 5) искровой разряд, возникающий между заряженными бортами трещин, заряженными концами нитей.

Каждый из этих механизмов должен иметь характерные спектры и форму импульсов. Для их изучения был проведен ряд модельных экспериментов. Изучались формы и спектральные характеристики сигналов. С этой целью после приема и усиления оцифровывалось 1024 значения сигнала с интервалом уровня квантования по амплитуде $4.8 \cdot 10$ В и интервалом по времени $1.6 \cdot 10$ с. Для восстановления переднего фронта импульсов использовалась линия задержки. Расчет спектров производился по программе быстрого преобразования Фурье.

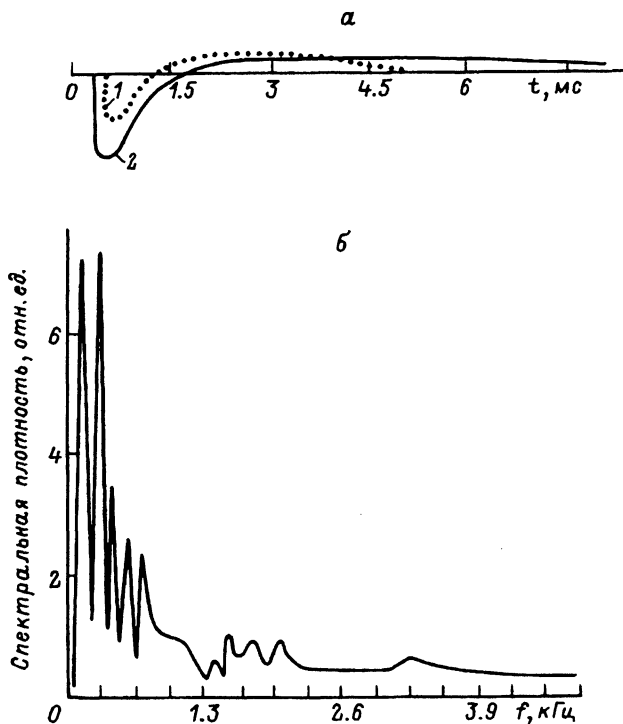


Рис. 3. Типичные формы импульсов при микрозарядах от наэлектризованного диэлектрика (1), при нарушении адгезионного контакта (2) (а) и спектр серии микрозарядных импульсов, возникших при электризации диэлектрика (б).

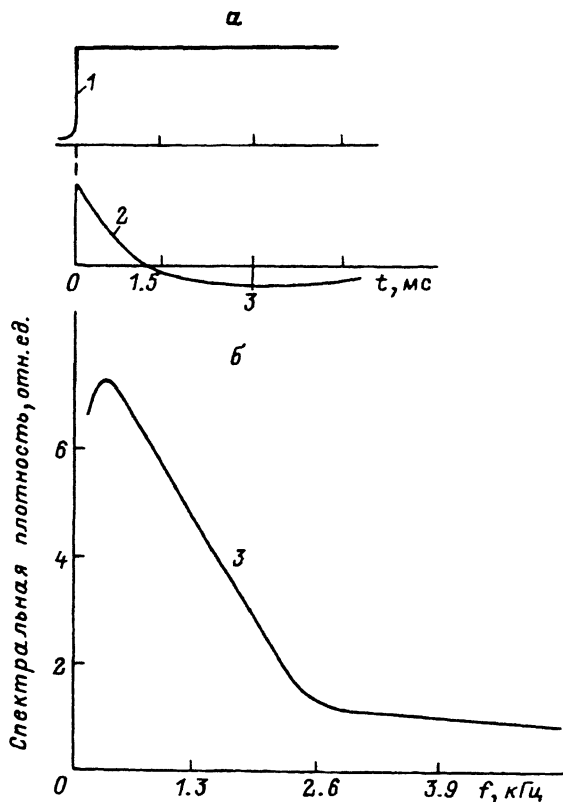


Рис. 4. Результаты модельного эксперимента.

a — типичные формы импульсов: 1 — изменение во времени исходного электрического поля, 2 — форма сигнала после прохождения приемно-усилительного тракта; *б* — спектральные характеристики сигнала.

Импульсы и спектры микроразрядных механизмов изучали в процессе электризации трением высокоомных полимеров и при нарушении двойного электрического слоя адгезионного контакта. На существование микроразрядов при адгезии указывается в ряде работ, в частности [14,15]. На рис. 3 представлены типичные формы импульсов, наблюдающиеся при микроразрядах от наэлектризованных тел и при нарушениях адгезионного контакта, а также спектр серии микроразрядов.¹ Отметим, что наблюдающиеся на рис. 3 импульсы и их спектры, как будет показано ниже, достаточно часто встречаются и при разрушении многих конструкционных материалов. Это указывает на то, что микроразрядный механизм излучения не является редким явлением. Однако надо подчеркнуть, что импульсы, близкие по форме к микроразряду, наблюдаются и при скачкообразном изменении напряженности поля. Этот вывод иллюстрирует рис. 4, где показаны результаты модельного эксперимента.

Скачкообразное изменение поля (рис. 4, кривая 1), моделирующее процесс зарядки материала в момент прорастания трещины, создавали с помощью генератора прямоугольных импульсов большой длительности. Импульс подавался на плоскую металлическую пластину, моделирующую поверхность диэлектрика. Поле воспринималось приемни-

¹ Отметим, что низкочастотный сигнал, ниже 100 Гц, в спектрах излучения на рис. 3 и на всех последующих рисунках не показан из-за сильного искажения сигнала аппаратурой в низкочастотной области спектра.

ком. После прохождения приемно-усилительного тракта форма сигнала существенно изменялась (рис. 4, кривая 2) за счет ограниченной полосы пропускания аппаратуры и имела спектр, представленный на рис. 4 кривой 3.

Заметим, что и в предыдущих экспериментах по регистрации микроразрядов значительная доля импульсов, наблюдающихся в процессе электризации диэлектриков, при нарушении адгезионного контакта имела форму и спектры аналогичные скачку потенциала. Следовательно, при нашей полосе пропускания усилительного тракта и частоте оцифровки аналогового сигнала весьма сложно различать импульсы, обусловленные "чистым" разрядным механизмом, и импульсы, обусловленные скачкообразным появлением или исчезновением потенциала в объекте исследования. Дело усложняется также тем, что каждый микроразряд неизбежно сопровождается и скачкообразным убыванием полей, вызвавших этот разряд.

Для доказательства колебательных механизмов возникновения эмиссии проводились многочисленные исследования. Установлено, что любое колебательное движение поверхности диэлектрического материала или образца в целом создает внешнее переменное поле за счет движения имеющегося поверхностного заряда. Синхронные измерения акустического и электромагнитного сигналов показывают их высокую идентичность. Спектральный состав электромагнитной эмиссии в бездефектных частях материала достаточно хорошо воспроизводит спектр акустических колебаний. В области дефектов спектральные составы несколько различаются за счет вкладов других механизмов излучения (микроразряды, контактные явления на границах дефектов и т.п.). Таким образом, любые колебания поверхности тела или поверхностей образующихся дефектов, концов разрываемых нитей и т.п. создают соответствующее внешнее поле. При этом не имеет существенного значения, создаются ли механические колебания искусственно или они возникают за счет процессов микро- и макроразрушения образцов, выходом акустических волн, вызванных разрушением, на внешнюю поверхность материала.

Механизмы электромагнитной эмиссии при разрушении некоторых конструкционных материалов

Изучались форма и спектральный состав эмиссии в процессе разрушения некоторых широко применяющихся в технике диэлектрических конструкционных материалов.

На рис. 5 представлены типичные формы и один из спектров импульсов, зарегистрированных в момент механического разрыва отдельных нитей многослойного стеклопластика. Анализ и теоретические оценки показывают, что наиболее простая форма импульсов (рис. 5,а) определяется колебательным движением заряженных концов нитей после их разрыва. Сопоставление более сложных импульсов и их спектров (рис. 5,б-г) с модельными экспериментами (рис. 3, 4) показывает, что в структуре импульсов присутствуют процессы, связанные как с микроразрядами между разрываемыми волокнами, так и со скачкообразным появлением (или релаксацией) потенциалов в момент разрыва. Аналогичные механизмы генерации импульсов электромагнитной эмиссии обнаружены при разрыве резины, синтетических тканей.

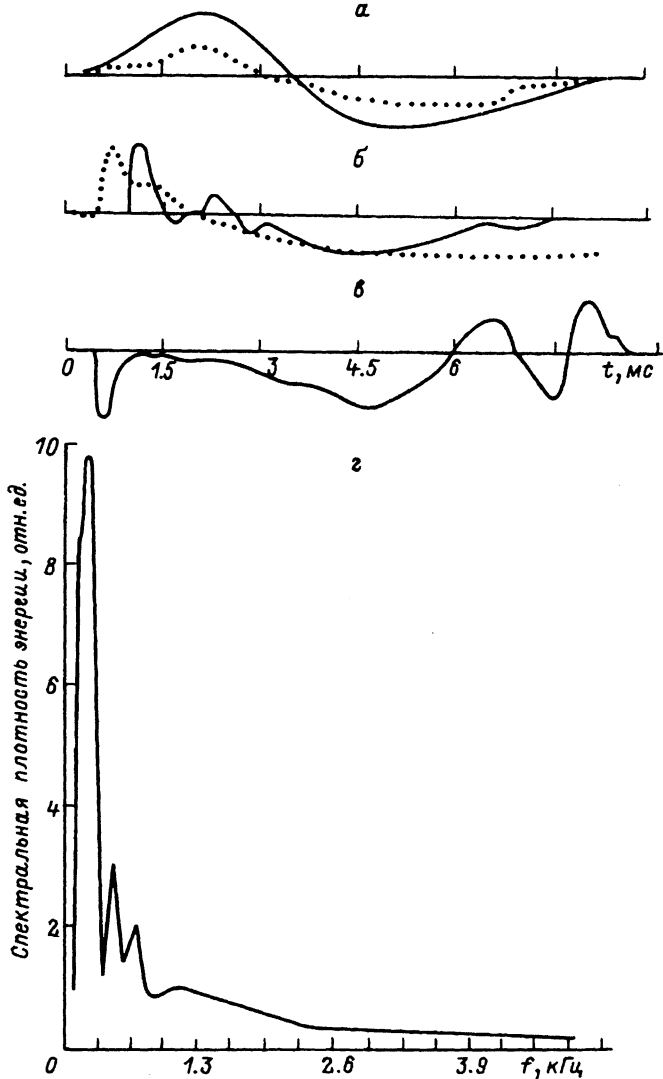


Рис. 5. Типичные формы (а-е) и спектральные характеристики (z) серии импульсов, зарегистрированных в момент разрыва нитей стеклопластиковой оболочки (а,б — приведено по два характерных импульса).

Многие современные конструкции представляют собой многослойные изделия из разнородных слоев, соединенных между собой путем склейки, пропитки и отверждения смолы. Их разрушение может протекать как при разрыве материала в одном из слоев, так и путем нарушения клеевых соединений между ними.

Исследования, выполненные нами в процессе расслоений стеклопластиковых оболочек, при разрушении по клеевым соединениям многослойной резины и др., показывают, что процессы расслоения значительно реже сопровождаются микроразрядами. Наблюдающиеся формы импульсов указывают, что преимущественными механизмами ге-

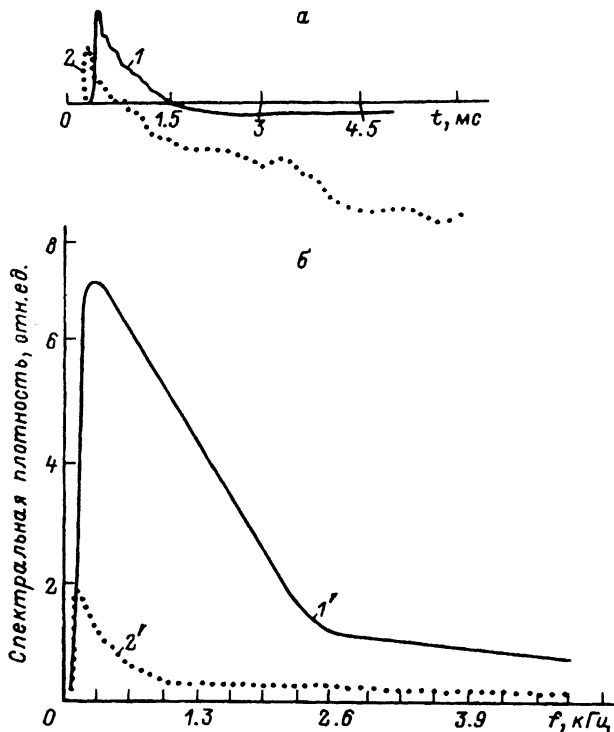


Рис. 6. Осциллограммы (а) и спектральные характеристики (б) типичных импульсов при расслоении материалов.

1, 1' — разрушение клеевого соединения двухслойной резины; 2, 2' — процесс интенсивного расслоения стеклопластика.

нерации импульсов в случаях расслоений материалов являются механизмы, обусловленные скачками потенциалов. В качестве примеров на рис. 6 приведены типичные импульсы при расслоении двухслойной резины и в процессе расщепления многослойной стеклопластиковой оболочки. Сравнение рис. 6 и 4 показывает высокую идентичность формы сигналов, наблюдающихся в момент расслоений, с результатами модельных экспериментов. Следовательно, в данных случаях основным процессом является процесс разделения заряда на новых поверхностях, образующихся в процессе расслоения. Скачкообразное разделение заряда приводит к скачку внешнего поля, которое и фиксируется регистрирующей аппаратурой в виде экспоненциально спадающего импульса.

Выводы

1. Достаточно часто встречающимися механизмами генерации сигнала дефектами структуры материала являются скачкообразное появление, разделение или релаксация зарядов на вновь образующихся поверхностях разрывов, расслоений или образующихся трещин; микроразряд или тлеющий разряд между отдельными частями материала при их разрушении; колебательное движение образующихся в мо-

мент разрыва заряженных поверхностей, концов волокон, краев разрыва, берегов трещин, под воздействием акустических колебаний в актах разрушения.

2. Показано, что наряду с дефектами источниками сигнала электромагнитной эмиссии являются внешние и внутренние поверхности диэлектрических материалов. Поверхности материалов генерируют переменное электрическое поле в процессе колебательного движения имеющегося на них естественного электростатического заряда. Колебательное движение поверхностей возникает при выходе на поверхность акустических волн от актов микро- и макроразрушения испытуемого объекта.

3. Создавая динамическую нагрузку, возбуждая акустические волны в контролируемом материале или изделии, удастся активизировать электромагнитную эмиссию дефектов структуры и таким образом выявлять в материалах непроклеи, расслоения, трещины, инородные включения, получать информацию о внутреннем строении конструкции.

Список литературы

- [1] *Беляев Л.М., Мартышев Ю.Н., Набатов В.В.* // Кристаллография. 1962. Т. 7. № 4. С. 576-580.
- [2] *Беляев Л.М., Мартышев Ю.Н., Набатов В.В.* // Физика щелочно-галоидных кристаллов. Рига, 1962. С. 179-182.
- [3] *Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Дмитриев В.П. и др.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 336-341.
- [4] *Дмитриев В.П., Смирнов В.А., Воробьев А.А. и др.* // Стекло и керамика. 1982. № 10. С. 10-11.
- [5] *Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чаллов В.Л. и др.* // Дефектоскопия. 1992. № 7. С. 76-80.
- [6] *Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Майер Г.Р. и др.* Способ неразрушающего контроля физико-механических свойств изделий. А. С. № 1590959. БИ. 1990. 33 с.
- [7] *Малышков Ю.П., Цой А.А., Гордеев В.Ф., Бармина Н.М.* Способ неразрушающего контроля монолитных неметаллических изделий. А. С. № 1352333. БИ. 1987. 42 с.
- [8] *Мирошниченко М.И., Куксенко В.С.* // ФТТ. 1980. Т. 22. Вып. 5. С. 1531-1533.
- [9] *Хатиашвили Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 18. С. 1128-1132.
- [10] *Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г.* // ДАН СССР. 1981. Т. 256. № 4. С. 824-826.
- [11] *Финкель В.М., Тялин Ю.И., Головин Ю.И. и др.* // ФТТ. 1979. Т. 21. С. 1943-1947.
- [12] *Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Семкина Л.И. и др.* // Стекло и керамика. 1986. № 8. С. 27-28.
- [13] *Дистлер Г.И., Саровский Э.Г.* // ФТТ. 1969. Т. 11. Вып. 2. С. 547-550.
- [14] *Тюрикова Л.А., Авербух В.Г., Москвитин Н.М., Кротова Н.А.* // ДАН СССР. 1971. Т. 201. № 4. С. 833-836.
- [15] *Тюрикова Л.А.* Канд. дис. М., 1972. 185 с.

Томский политехнический институт

Поступило в Редакцию
27 мая 1993 г.
В окончательной редакции
22 декабря 1993 г.