

---

---

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,  
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING  
THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

---

---

УДК 620.179.1; 620.192  
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-320-334

**ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

А. А. БЕСПАЛЬКО\*, Д. Д. ДАНН, П. И. ФЕДОТОВ, С. А. ДМИТРИЕВА, Ц. ЛО

*Томский политехнический университет, Томск, Россия,  
\*besko48@tpu.ru; dddann@tpu.ru; pif@tpu.ru; lulubvv@foxmail.com*

**Аннотация.** Для разработки комплексного акустоэлектрического метода неразрушающего контроля численно и экспериментально исследуются механоэлектрические и акустоэлектрические преобразования на примере образцов магнетитовой руды и модельных дефектных диэлектрических структур на основе цементно-песчаных смесей. Приведены результаты расчетов концентрации напряжений на трещинах разных размеров при распространении внешнего детерминированного акустического импульса по образцу. Показаны результаты экспериментальных исследований электромагнитной эмиссии образцов магнетитовой руды с содержанием кальцита и магнетита при одноосном сжатии до разрушения. Показано, что по спектрам электромагнитных откликов при акустоэлектрических преобразованиях возможно достоверно определять появление и развитие деструктивных зон в диэлектрических материалах. Приведены результаты изменения параметров электромагнитных откликов цементно-песчаной смеси с дефектами при внешнем импульсном акустическом воздействии в процессе ступенчатого нагружения сжатием и сдвигом. В качестве включений (дефектов) использовали магнетитовую руду и фторопласт, обладающие соответственно большим и меньшим акустическим импедансом, чем материал модельного образца. Рассматривается влияние длительности внешнего импульсного акустического возбуждения на параметры электромагнитных откликов в процессе ступенчатого нагружения модельных образцов.

**Ключевые слова:** механоэлектрические и акустоэлектрические преобразования, горные породы, диэлектрики, напряжения сжатия и сдвига, акустическое воздействие, разрушение

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 20-79-10156.

**Ссылка для цитирования:** Беспалько А. А., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц. Численное и экспериментальное моделирование акустоэлектрического метода неразрушающего контроля твердотельных диэлектриков // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 320—334. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-320-334.

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING  
OF THE ACOUSTIC-ELECTRICAL METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING  
OF SOLID-STATE DIELECTRICS**

A. A. Bepalko\*, D. D. Dann, P. I. Fedotov, S. A. Dmitrieva, J. Luo

*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
besko48@tpu.ru; dddann@tpu.ru; pif@tpu.ru; lulubvv@foxmail.com*

**Abstract.** To develop a complex acoustoelectric method for non-destructive testing, mechanoelectric and acoustoelectric transformations are numerically and experimentally studied on the example of magnetite ore samples and model defective dielectric structures based on cement-sand mixtures. Results of calculations of stress concentration at cracks of different sizes during an external deterministic acoustic pulse propagation along the sample are presented.

---

© Беспалько А. В., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц., 2023

Results of experimental studies of electromagnetic emission of samples of magnetite ore containing calcite and magnetite under uniaxial compression to fracture are demonstrated. The possibility of reliable determination the appearance and development of destructive zones in dielectric materials from the spectra of electromagnetic responses during acoustoelectric transformations is revealed. Results concerning changes in parameters of electromagnetic responses of a cement-sand mixture with defects under external pulsed acoustic action in the process of stepwise loading by compression and shear are presented. As inclusions (defects), magnetite ore and fluoroplastic are used, which have, respectively, a higher and lower acoustic impedance than the model sample material. The effect of duration of external pulsed acoustic excitation on parameters of electromagnetic responses during stepwise loading of model samples is considered.

**Keywords:** mechanoelectric and acoustoelectric transformations, rocks, dielectrics, compression and shear loads, acoustic impact, fracture

**Acknowledgment:** The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 20-79-10156.

**For citation:** Bepalko A. V., Dann D. D., Fedotov P. I., Dmitrieva S. A., Luo J. Numerical and experimental modeling of the acoustic-electrical method for non-destructive testing of solid-state dielectrics. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 4. P. 320—334 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-320-334.

**Введение.** Для обнаружения дефектов в твердотельных материалах в настоящее время используют различные неразрушающие методы контроля: акустические импульсные и акустоэмиссионные; электрические и электромагнитные; магнитные; рентгеновские и другие [1]. В случае диэлектрических материалов и структур целесообразно применять комплексные методы неразрушающего контроля. К таким методам относятся контактное акустическое зондирование предмета контроля и бесконтактная регистрация электромагнитного отклика на такое воздействие с последующим амплитудно-частотным анализом электромагнитного сигнала (ЭМС).

Электромагнитные отклики на внешнее акустическое возбуждение твердотельных дефектных диэлектрических [2—6] и гетерогенных [7—11] материалов возникают в результате акустоэлектрических преобразований (АЭП) в них. Такие преобразования обусловлены наличием в тестируемых объектах электрически заряженных областей разнообразной конфигурации и присутствием в них двойных электрических слоев (ДЭС) [12]. Распространяющийся по материалу одиночный акустический импульс, радиоимпульс (или последовательность таких акустических возбуждений) приводит к колебаниям двойных электрических слоев. В результате колебаний возникают электромагнитные сигналы, которые можно зарегистрировать емкостным или индукционным датчиком с последующим усилением и амплитудно-частотным анализом. Спектр электромагнитного отклика зависит от параметров воздействующего акустического импульса, характеристик зарядового состояния ДЭС и структуры контролируемого диэлектрического материала [10—13]. Уровень заряда может меняться на бортах трещин при их образовании и развитии, на границах включений и основного материала, в том числе на границах пустот [13, 14]. В соответствии с прямым пьезоэлектрическим эффектом сегнетоэлектрические включения, когда через них проходят акустические импульсы, также являются источниками электромагнитных сигналов [15].

Акустоэлектрические преобразования наиболее проявляются при силовом нагружении контролируемого материала и внешнем детерминированном акустическом возбуждении [1—11, 16—18]. Процесс генерации ЭМС при силовом нагружении можно еще называть механоэлектрическими преобразованиями (МЭП) в твердотельных гетерогенных структурах. Помещение тестируемого объекта в электрическое поле усиливает поляризацию зарядов на ДЭС и амплитуду ЭМС [19]. Дефекты будут вызывать изменения амплитуды и спектра электромагнитных сигналов. Образующиеся при развитии разрушения трещины передают часть энергии акустическим импульсам. Распространяясь, эти импульсы взаимодействуют с окружающими зарядами на ближайших трещинах, а также с двойными электрическими слоями на контактах дефектов с вмещающим материалом. Результатом таких взаимодействий является „внутренняя“ генерация электромагнитных сигналов в виде электромагнитной эмиссии

(ЭМЭ). Эта эмиссия отображает образование и развитие деструктивных зон в диэлектрическом материале, в том числе и в дефектном. Важно определить, как различаются изменения характеристик ЭМЭ, возникающих в результате „внутренних“ акустических возбуждений, и электромагнитных сигналов при внешнем детерминированном акустическом возбуждении в процессе ступенчатого нагружения до разрушения.

В настоящей статье приводятся результаты моделирования изменения параметров акустического импульса при различных размерах трещин и удалении от места его ввода в модельный образец. Эти изменения будут влиять на параметры электромагнитных откликов при акустическом зондировании [20]. Такие преобразования возможны и в конструкционных композиционных материалах [21], а разрабатываемый комплексный метод позволит успешно выявлять образование их дефектности в процессе эксплуатации, как в энергетике, так и в механике.

**Образцы и методики экспериментов.** Для экспериментальных исследований механо-электрических и акустоэлектрических преобразований в качестве модельных образцов использовали керны магнетитовой руды и скарна диаметром 42 мм и длиной 80 мм. Образцы руды подбирали так, чтобы в них содержались магнетит и кальцит. Эти минералы отличаются предельной прочностью: прочность магнетитовой руды Таштагольского месторождения находится в пределах  $(14—21,5) \cdot 10^7$  Па; прочность кальцита ниже —  $(12—50) \cdot 10^6$  Па [22]. Акустический импеданс магнетитовой руды  $z_{\text{мр}} = 28,51 \cdot 10^6$  кг/с·м<sup>2</sup>, а акустический импеданс кальцита  $z_{\text{к}} = 17,07 \cdot 10^6$  кг/с·м<sup>2</sup>. Кроме того, кальцит и магнетит существенно различаются и по электрическим характеристикам. Так, удельное электрическое сопротивление кальцита  $10^7—10^{12}$  Ом·м, а у магнетита существенно ниже —  $10^{-4}—10^2$  Ом·м [22]. Содержание магнетита в используемых образцах руды колебалось от 60 до 80 %. Конкретный состав определяли после разрушения образцов с помощью рентгенофазового анализа порошковым рентгеновским дифрактометром X'TRA [23].

Модельные образцы размером  $100 \times 100 \times 100$  и  $50 \times 50 \times 100$  мм изготавливали из цементно-песчаной смеси (ЦПС). Акустический импеданс такой смеси составлял  $z_{\text{цпс}} = 5,25 \cdot 10^6$  кг/с·м<sup>2</sup> при скорости продольного звука  $c_{\text{цпс}} = 2765$  м/с и плотности  $\rho_{\text{цпс}} = 1900$  кг/м<sup>3</sup>. В качестве дефектов разных размеров использовали включения магнетитовой руды и фторопласта, имеющих существенно различающиеся характеристики по всем физическим показателям.

Эксперименты по исследованию параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при сжимающих и сдвиговых нагрузках выполнялись на базовом стенде, блок-схема которого приведена на рис. 1, а, б. В процессе эксперимента образец располагали между опорной 1 и подвижной плитами 2 автоматизированного пресса ИП500.1, который до  $P = 500$  кН развивал усилие на образце. Нагрузка и скорость нагружения образца задавались с помощью специализированной программы с компьютера ПК2 10 через систему управления (СУ) 8 на исполнительный механизм сервоклапана. Причем вид изменения нагрузки мог быть задан линейным, ступенчатым или циклическим. Информация о зависимости изменений деформации образца от прикладываемых усилий и их вид отображались также на мониторе компьютера ПК2. Одноосное сжатие проводили с постоянной скоростью 0,3 Па/с.

Внешнее импульсное акустическое возбуждение образцов проводилось ударом шарика, пролетающего через систему контроля энергии удара (система динамического воздействия, СДВ) 3 [13, 18]. Разгон шарика осуществлялся пружинным устройством (ПУ) 4. Акустический импульс имел форму, близкую к колоколообразной, а его длительность по основанию составляла 50 мкс. СДВ состояла из металлической трубки с двумя оптическими парами. Точечный удар шариком массой 0,86 г наносился посередине свободной цилиндрической части образца через заземленную металлическую пластину толщиной 2 мм. Шарик, пролетая через оптические пары, давал две отметки на мониторе компьютера ПК1 9. По этим отметкам рассчитывались скорости прилета  $V_1$  и отскока  $V_2$  шарика. Используя найденные значения скоро-

сти и массы шарика ( $m$ ), а также приближение упругого соударения шарика о металлическую пластинку, определяли энергию акустического воздействия, передаваемую образцу:

$$E_{\text{exc}} = \frac{m}{2}(V_1^2 - V_2^2), \quad (1)$$

где  $E_{\text{exc}}$  — энергия, вводимая в образец при ударе шариком. При этом потери энергии акустического импульса в пластине не учитывались. После пролета через СДВ и удара шарика в металлической пластинке возбуждался детерминированный акустический импульс, который через слой минерального масла между пластиной и образцом проходил в образец. Значения твердости материала пластины и шарика совпадали. Остаточная энергия удара, вводимая в образец, после отскока шарика составляла  $(25\text{—}30) \cdot 10^{-3}$  Дж. Энергию удара можно было уменьшать до  $5 \cdot 10^{-3}$  Дж с помощью изменения поджатия пружины. Акустический сигнал, проходя через образец, регистрировался пьезоэлектрическим приемником (ПАП) 6.

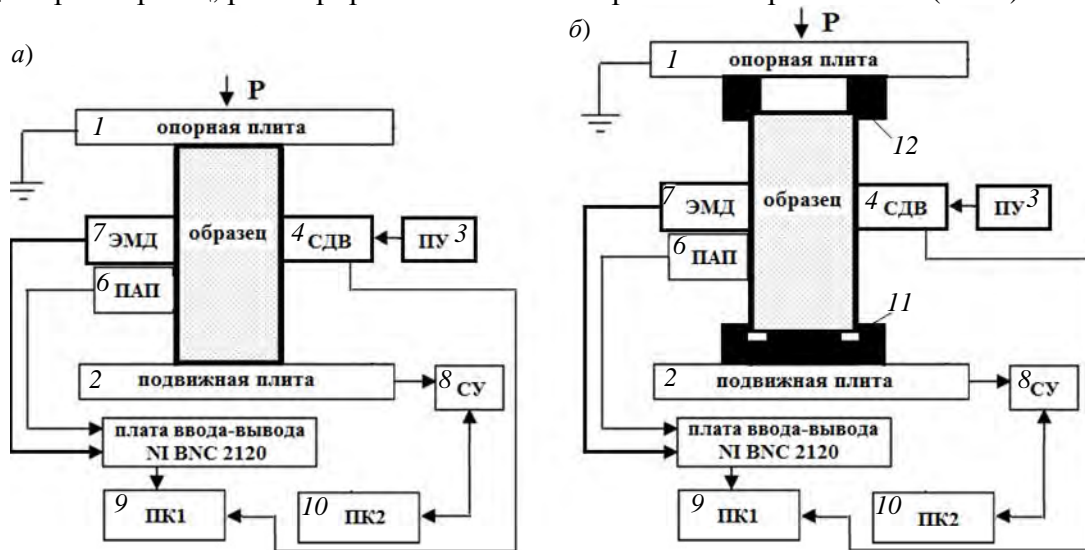


Рис. 1

Электрическую составляющую ЭМС, генерируемого образцом при прохождении акустического сигнала, регистрировали дифференциальным емкостным датчиком ЭМД 7 со встроенным усилителем мощности. В датчике использовались фильтры нижних и верхних частот, которые обеспечивали его работу в диапазоне от 1 до 100 кГц. На выходе ЭМД сигнал усиливался в десять или сто раз. Чувствительность ЭМД по входу —  $5 \cdot 10^{-4}$  В. Сигналы с ЭМД и ПАП через многофункциональную плату ввода-вывода NI BNC 2120 5 передавались на ПК1 9. В дальнейшем с помощью специальной программы амплитуда ЭМС нормировалась по амплитуде акустического импульса, возбуждаемого ударом шарика. Спектры ЭМС определялись по программе метода быстрого преобразования Фурье.

Для создания сдвиговых напряжений при одноосном сжатии использовали специальные держатели. При этом диаметр выступа нижнего держателя (11) был на 4—5 мм меньше диаметра отверстия в верхнем держателе (12). Кроме того, держатели 11 и 12 обеспечивали центровку образца, а следовательно, и совпадение осей выступа и отверстия.

**Численное моделирование.** Рассматривалось распространение волны в упругой неоднородной среде с заданными физико-механическими свойствами при импульсном акустическом воздействии на часть ее поверхности, проводился расчет параметров напряженно-деформированного состояния (перемещения, деформации, напряжения), использовалась простейшая классическая модель твердого тела [24—26].

Для заданного цилиндрического образца магнетитовой руды такая модель может применяться с некоторыми допущениями. Например, при решении задач о распространении волн принималось, что используемые образцы не имеют пористости, пустых полостей, а также

других явно выделяющихся включений. Исследование текстуры образцов показало, что кальцит и магнетит с перемешиванием переходят друг в друга.

В расчетах принимали акустический импульс (АИ) возбуждения, близкий к реальному акустическому импульсу по форме, амплитуде и длительности. По окончании импульсной нагрузки на верхней границе задавались нулевые значения напряжения. Когда нагрузка приложена к поверхности, акустический импульс в виде колоколообразной функции имеет вид:

$$F(x, z) = A \times \exp\left(-\beta \frac{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}{2d_0^2}\right), \quad (2)$$

где  $x_0, z_0$  — координаты центра источника акустического импульса,  $d_0$  — величина, определяющая расстояние от центра импульса, на котором нормальное напряжение уменьшается в  $e^\beta$  раз.

В общем случае система уравнений, описывающая динамику деформируемого твердого тела, включает в себя уравнения движения

$$\rho \ddot{U}_i = \rho G_i + \sigma_{ij,j}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность материала,  $U_i$  — деформация под действием акустической волны,  $\sigma_{ij}$  — напряжение,  $G_i$  — компоненты вектора массовых сил,  $i, j = 1, 2, 3$ . Точка над символом означает производную по времени, запятая после индекса — производную по соответствующей координате, по повторяющимся индексам производится суммирование.

Связь компонентов тензора деформаций с перемещениями из соотношения Коши представляется как:

$$\varepsilon_{ij} = 0,5(U_{i,j} + U_{j,i}), \quad (4)$$

а соотношения, задающие связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций, как:

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}). \quad (5)$$

Для упругого случая соотношения (5) описывают закон Гука. В прикладных задачах волновой механики при корректной постановке процессы представлены уравнениями гиперболического типа, которые описывают волновые процессы с конечной скоростью распространения. Для каждого уравнения вида

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (6)$$

используемая разностная схема соответствует простейшему варианту из семейства нецентральных схем МакКормака [27]. Для решения применялась объемная расчетная схема. Схема МакКормака предполагает использование системы прямоугольной расчетной сетки, которая обеспечивает ряд преимуществ: упрощаются математические расчеты, затрачивается меньше машинного времени для расчетов, упрощается постановка граничных условий, упрощается обработка результатов без потери информации. Наилучшие результаты дают сетки с квадратными ячейками. Этот метод аналогичен методу Рунге-Кутты [28] для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Прежде чем использовать метод Рунге-Кутты второго порядка точности, пространственные производные в уравнениях заменяли соответствующими отношениями конечных разностей. Использовались нецентральные разностные операторы, например, попеременно левые или правые разности вместо центральных разностей. Такой подход и положен в основу эффективной нецентральной схемы второго порядка, предложенной МакКормаком. Здесь граничные условия могут быть заданы через перемещения. Размер элементов в конечно-элементной модели составлял  $1 \times 1$  мм. Поверхность расчета содержит 237500 точек при частоте дискретизации интервалом в 10 мкс. Расчеты выполнены для упругих образцов магнетитовой руды, используемых при проведении экспериментов ступенчатого сжатия и последующего возбуждения на ступенях детерминированным АИ. Тре-

щины разного размера задавались протяженными вдоль оси образца или вдоль распространения продольной составляющей акустического импульса. Численное моделирование проводили с помощью специального графического пакета. Результаты численного моделирования представлены в виде областей распространения интенсивности напряжений [28, 29]. Были смоделированы упругие возмущения в цилиндрической области, к боковой поверхности которой прилагалась импульсная нагрузка. Задача решалась в плоской постановке при осевом сечении модельного цилиндра, подобно реальному образцу руды, имеющего размеры 42×80 мм.

На рис. 2 показаны итоги расчетов распространения АИ по образцу с длительностью по полуширине 25 мкс в моменты времени 5, 10, 30 мкс. Расчет производили для трещины длиной 1×1 мм, расположенной вдоль оси образца на расстоянии 20 мм от возбуждаемой цилиндрической поверхности. Видно, что на трещине концентрируются напряжения, а за ней по линии распространения АИ напряжения резко спадают. Как уже отмечалось, амплитудно-частотный спектр ЭМС находится в непосредственной связи с параметрами воздействующего и изменяющегося во времени АИ. В результате изменяется и спектр ЭМС.

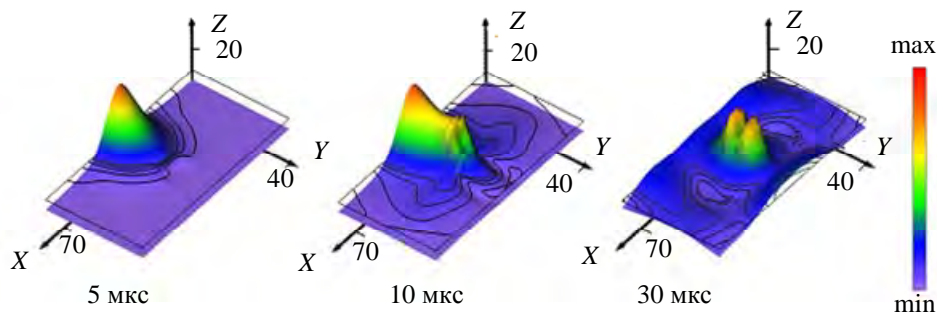


Рис. 2

На рис. 3 приведены результаты расчетов изменения интенсивности напряжений через 30 мкс после воздействия АИ на трещины различного размера, расположенные на разных расстояниях в образце. Условия ввода АИ принимались такими же, как в предыдущих расчетах. На рис. 3, а размер трещины 10 мм. На рис. 3, б представлены результаты расчетов изменения напряжений для двух трещин размером 20- и 42 мм, расположенных вдоль оси сжатия, каждая на расстоянии 10 мм от краев образца. На рис. 3, в расчетная область содержала несколько расположенных вдоль оси сжатия трещин размером 2, 4, 8, 16, 32, 64 мм. Расстояние между трещинами 5 мм, причем от точки приложения импульса трещины расположены в порядке возрастания — от самой маленькой до самой большой. Интенсивность возникающих напряжений показана на рис. 3, г. Полученные закономерности указывают, что внешние акустические воздействия существенно влияют на параметры акустоэлектрических преобразований. Это влияние будет отражаться на амплитуде и спектре генерируемых электромагнитных сигналов. Такие же закономерности будут проявляться и при механоэлектрических преобразованиях.

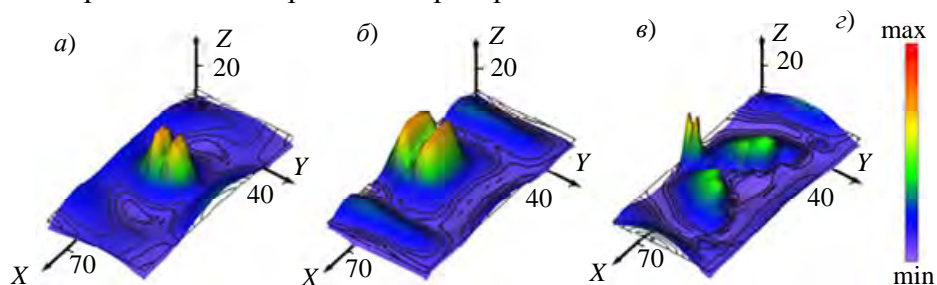


Рис. 3

**Экспериментальное моделирование.** На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований развития разрушения образцов 75 %-ной магнетитовой руды (рис. 4, а) и скарна (рис. 4, б) в зависимости от характеристик ЭМЭ ( $A$  — амплитуда ЭМЭ).

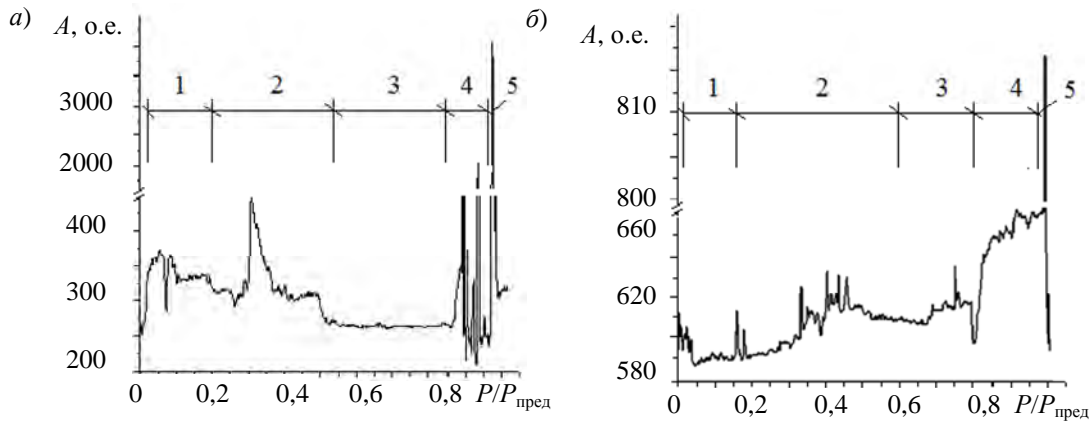


Рис. 4

Из рисунка видно, что у образцов магнетитовой руды и скарна наблюдались: этап уплотнения (1); этап формирования очага разрушения (2); этап устойчивой прочности (3); этап предразрушения (4); проращение трещины отрыва (5). На рис. 4, а видно двухэтапное формирование очага разрушения. Эти этапы обусловлены присутствием в образце магнетита и кальцита. Первоначально появляются трещины во включениях кальцита, так как он менее прочен, чем магнетит. Затем начинают проявляться трещины в магнетите. При этом пик ЭМЭ кальцита значительно выше, чем при формировании разрушения в магнетите. Это обусловлено диэлектрическими свойствами кальцита, которые при формировании очага разрушения не позволяют стекать зарядам с бортов трещин и с двойных электрических слоев, образованных с участием кальцитовых включений. Это способствует существенно большему накоплению заряда на дефектах и бортах трещин в кальците, чем у магнетита, и приводит к большей интенсивности ЭМЭ при акустическом возбуждении. Такого разделения в зоне формирования очага разрушения скарна не наблюдается (рис. 4, б). На третьем этапе идет развитие и накопление трещин в объеме образца без снижения его прочности. В дальнейшем при повышении сжимающих напряжений по резким изменениям интенсивности ЭМЭ можно отслеживать этапы предразрушения, проращения трещины отрыва или разрушения образца.

Представляет интерес экспериментальная проверка возможности тестирования развития деструктивных зон образцов горных пород при внешнем детерминированном акустическом зондировании под действием нарастающих сжимающих и сдвиговых напряжений. Так, для образца магнетитовой руды с 75 %-ным содержанием магнетита на рис. 5 приведены результаты внешнего возбуждения АИ в процессе ступенчатого сжатия. Акустические импульсы вводили ударом: шарик направлялся в середину поверхности образца (80 мм) перпендикулярно керну.

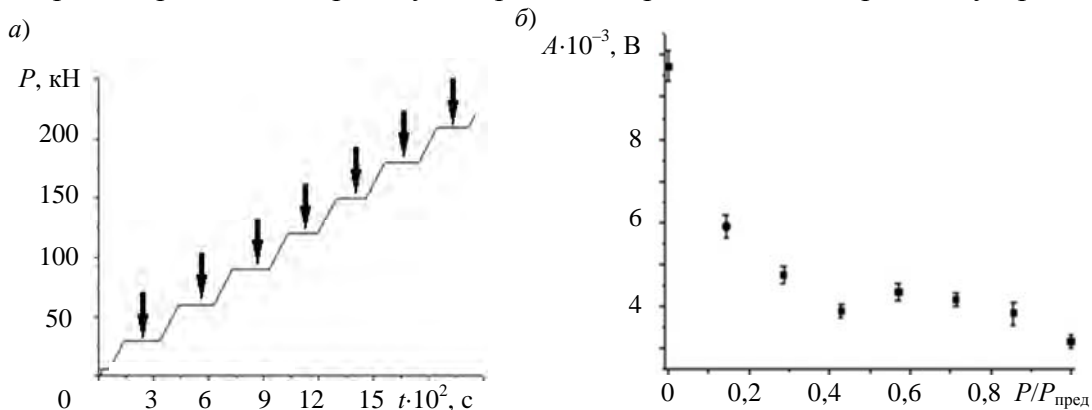


Рис. 5

На рис. 5, а видно нарастание ступенчатого сжимающего нагружения образца во времени, стрелками указаны моменты возбуждения. На рис. 5, б видно начало развития зоны деструкции образца магнетитовой руды в районе относительной нагрузки, соответствующей зна-

чению  $0,4P_{\text{пред}}$  от разрушающих сжимающих усилий.

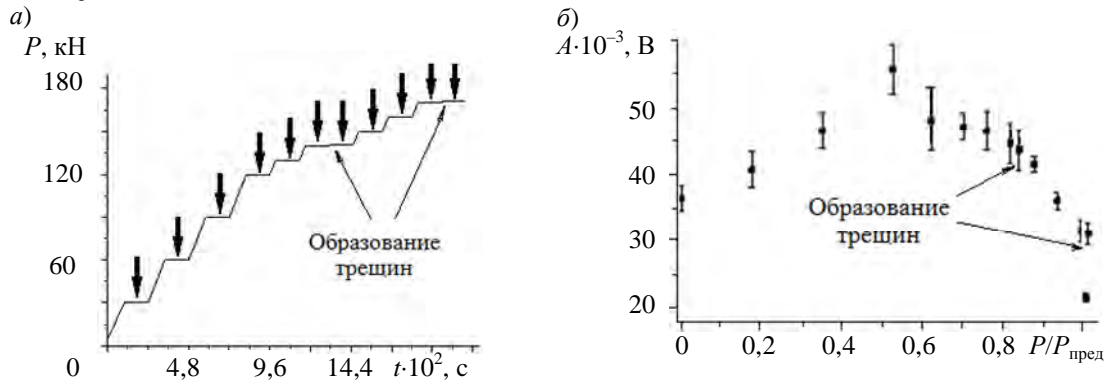


Рис. 6

На рис. 6, а проиллюстрировано нарастание величин ступенчатого сдвигового нагружения образца во времени, стрелками указаны моменты возбуждения. На рис. 6, б изменения амплитуды ЭМС носят другой характер, чем при сжатии. Здесь амплитуда электромагнитного отклика (ЭМО) на внешнее детерминированное акустическое возбуждение начинает нарастать от  $(0,2—0,5)P_{\text{пред}}$  от разрушающих сжимающих усилий. Такой характер развития разрушения возможен при использовании геометрии сдвиговых напряжений в образцах, приведенной на рис. 1, б. В районе  $(0,55—0,8)P_{\text{пред}}$  наблюдались нестационарность амплитуды ЭМС и ее небольшой спад. Это соответствует этапу устойчивой прочности, которая наблюдалась при регистрации ЭМЭ (рис. 4). В дальнейшем на участке  $(0,8—1,0)P_{\text{пред}}$  происходит развитие разрушения образца.

На рис. 7 приведены спектры электромагнитных откликов на детерминированное акустическое возбуждение модельного образца с дефектом из магнетитовой руды при ступенчатых сдвиговых нагрузках.

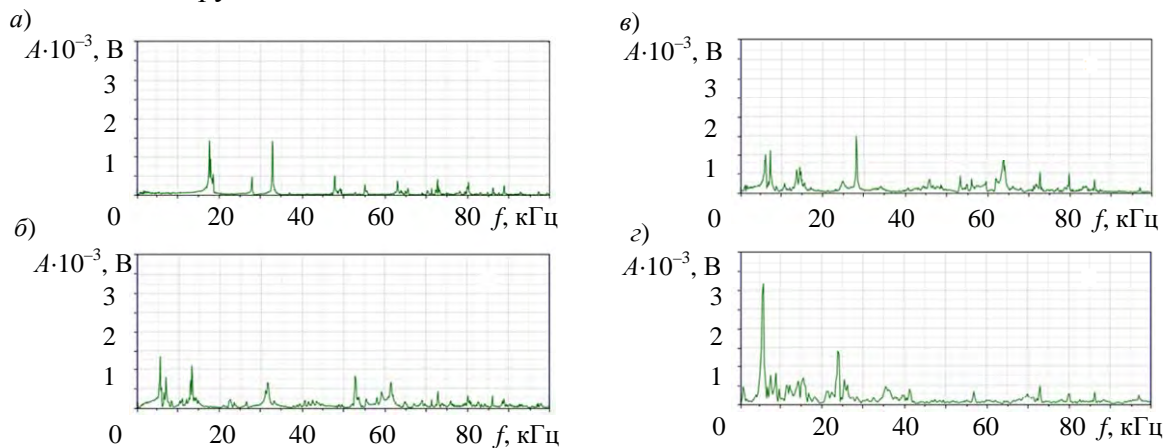


Рис. 7

На рис. 7, а показан спектр электромагнитного отклика образца при внешнем импульсном акустическом воздействии в отсутствие любых нагрузок. На рис. 7, б представлен спектр ЭМО при сдвиговом нагружении в 60 кН, а на рис. 7, в показан спектр ЭМО при сдвиговом нагружении в 120 кН. На рис. 7, а и б в спектре появляются дополнительные высокочастотные и низкочастотные составляющие спектра ЭМО, что соответствует развитию зоны деструкции образца. При сдвиговых нагружениях, предшествующих разрушению, спектр ЭМО полностью сдвинулся в низкочастотную область (рис. 7, г), что соответствует образованию трещин отрыва, ответственных за полное разрушение образца. Это обстоятельство служит хорошим ориентиром для определения стадии подготовки разрушения образцов, в том числе содержащих дефекты.

Дальнейшее детальное изучение закономерностей изменения прочности производили на



образцах из цементно-песчаной смеси  $100 \times 100 \times 100$  мм с включениями (дефектами) разного размера из магнетитовой руды с 80 %-ным содержанием магнетита. На рис. 8 приведены закономерности изменения усредненных амплитуд электромагнитных откликов образцов ЦПС с дефектом из магнетитовой руды разной толщины при ступенчатом нагружении одноосным сжатием до разрушения. Возбуждение на этих ступеньках с использованием АИ производили не менее 10 раз. Предельная прочность используемых образцов слабо различалась и в зависимости от толщины дефекта составила: 5 мм — 370 кН; 10 мм — 360 кН; 20 мм — 352 кН; 40 мм — 346 кН.

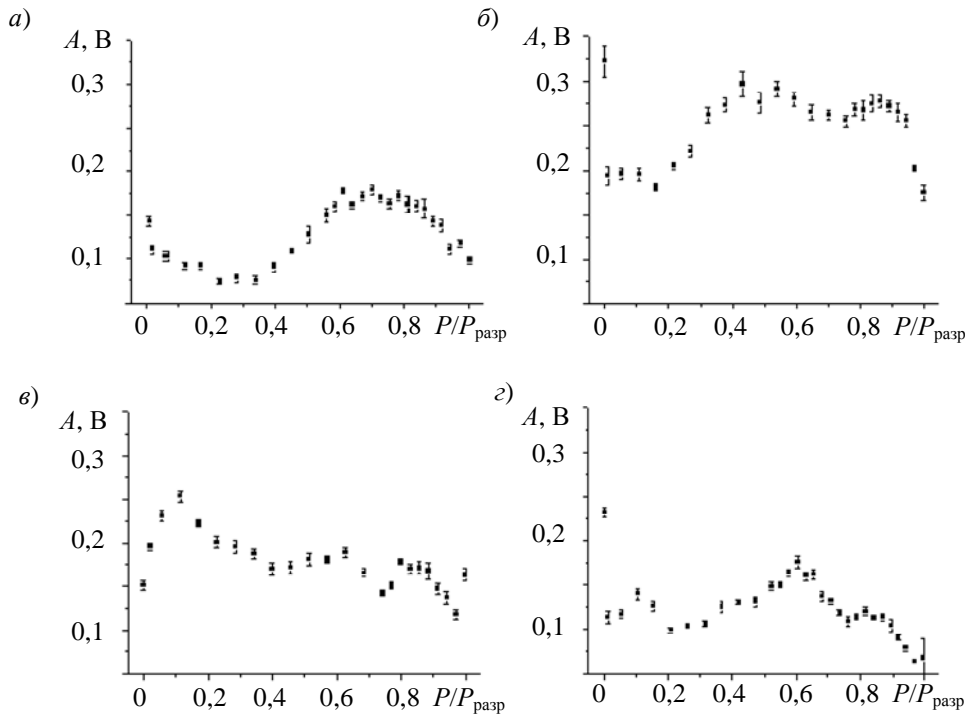


Рис. 8

На рис. 8 видно, что при зондировании таких образцов внешним акустическим импульсом для всех образцов наблюдаются этапы развития зоны деструкции и разрушающих трещин. На рис. 8 не совсем четко виден только этап устойчивой прочности. Для образца с дефектом толщиной 5 мм изменение параметров ЭМО практически совпадает со значениями откликов из бездефектного образца. В таких образцах, как уже отмечалось, акустический импеданс магнетитовой руды  $z_{\text{мр}} = 28,51 \cdot 10^6$  кг/с·м<sup>2</sup> значительно выше акустического импеданса ЦПС —  $z_{\text{цпс}} = 5,25 \cdot 10^6$  кг/с·м<sup>2</sup>. Рассчитанный по формуле Рэлея коэффициент прохождения акустического импульса из ЦПС в дефект составил 0,52. Это может обуславливать пониженную амплитуду колебания границы основного вещества модельного образца и дефекта из магнетитовой руды. В результате в экспериментах при внешнем акустическом возбуждении образца наблюдалась генерация ЭМС небольшой амплитуды.

Для сравнения на рис. 9 приведены графики усредненных амплитуд ЭМС из образцов ЦПС с дефектами из фторопласта.

Размер образца  $50 \times 50 \times 100$  мм, а размер дефектов из фторопласта  $10 \times 10 \times 15$  (рис. 9, б),  $20 \times 20 \times 30$  (г) и  $15 \times 15 \times 23$  мм (в). В образце дефекты размещались посередине. Акустический импульс вводился в образец из ЦПС через площадку  $50 \times 50$  мкм. Акустический импеданс фторопласта ниже, чем у ЦПС —  $z_{\text{фп}} = 2,95 \cdot 10^6$  кг/с·м<sup>2</sup>. В этом случае коэффициент прохождения акустического импульса из ЦПС в дефект из фторопласта равен 0,92. Амплитуда ЭМО на внешнее акустическое возбуждение такого модельного образца должна быть выше, чем у образца из ЦПС с дефектом из магнетитовой руды, что и отображается на рис. 9, б, в, г. На бездефектном образце ЦПС (рис. 9, а) деструктивная зона выделяется в районе нагрузки

(0,4—0,8) $P_{\text{пред}}$ , но не совсем явно. На рис. 9, б и в эта зона четко видна. На рис. 9, г вид развития зоны деструкции другой, что, вероятно, связано с изменением резонансных характеристик акустического импульса возбуждения и продольного размера дефекта.

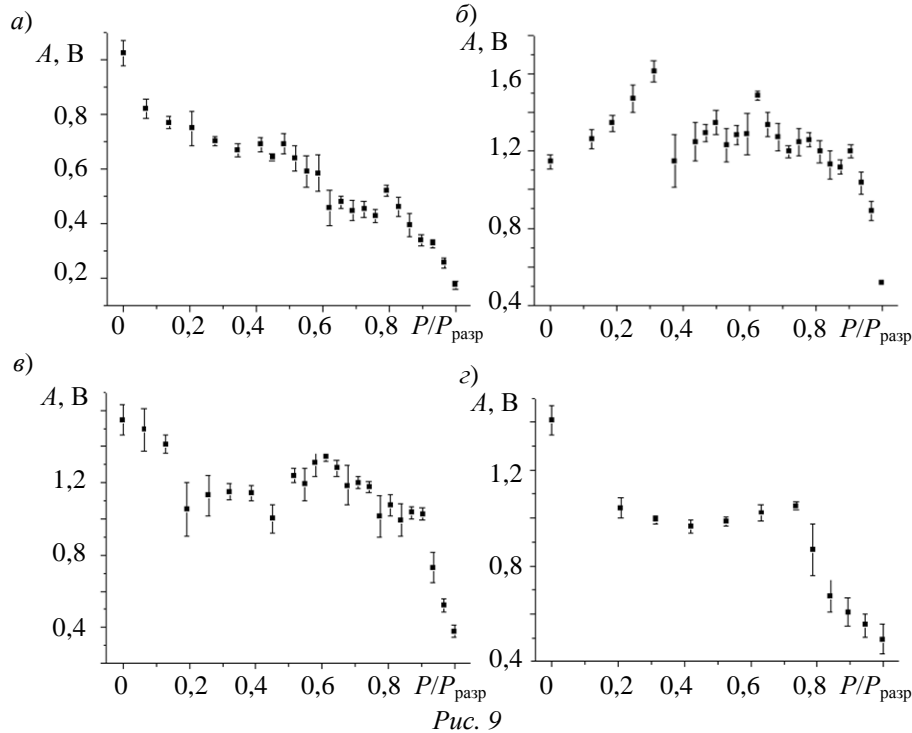


Рис. 9

Для проверки предположения о влиянии резонансных характеристик акустического импульса возбуждения на продольный размер дефекта использовали образец ЦПС размером  $50 \times 50 \times 100$  мм с прямоугольным дефектом из магнетитовой руды величиной  $15 \times 15 \times 23$  мм.

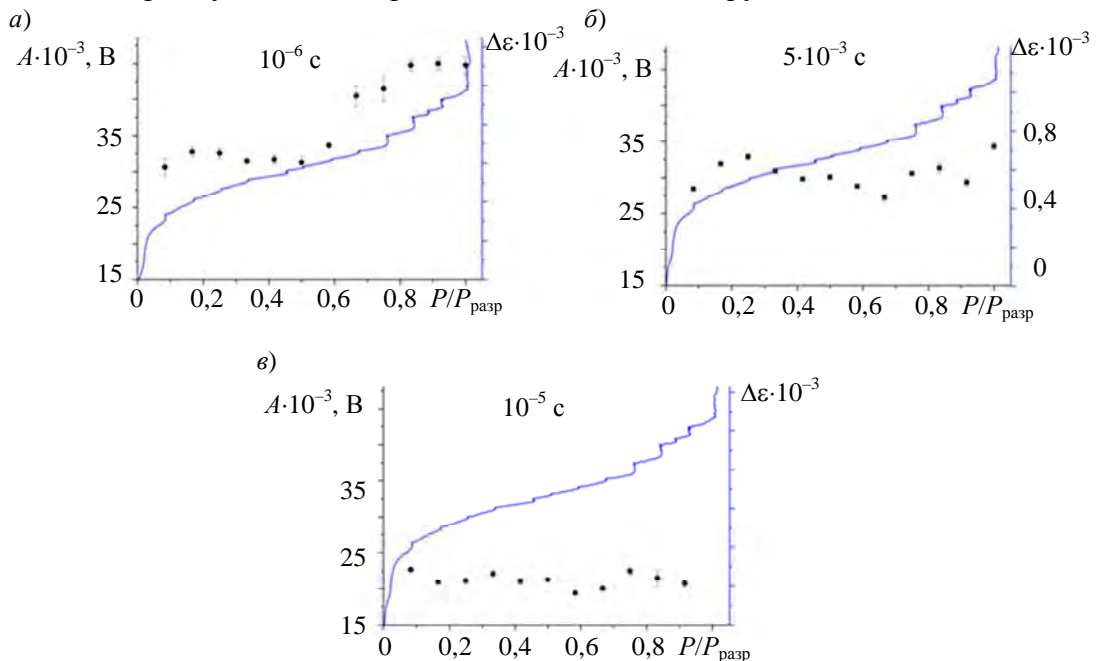


Рис. 10

На образец с помощью пьезоэлектрического излучателя подавали акустические импульсы напряжением 800 В разной длительности — 1, 5, 10 мкс (рис. 10). На рис. 10 видна зависимость изменения амплитуды ЭМС при ступенчатом нагружении сжатием модельного образца от длительности акустического импульса возбуждения. Рис. 10, б подтверждает предположение о влиянии длительности возбуждающего акустического импульса на параметры ЭМО.

Таким образом, на модельных образцах из ЦПС с дефектами разных размеров и разным соотношением акустического импеданса основного материала и дефекта наблюдаются амплитудные и спектральные изменения ЭМО при внешнем импульсном акустическом возбуждении в процессе сжатия или осуществления сдвиговых напряжений. Эти изменения с высокой степенью достоверности отображают этапы развития деструкции контролируемых образцов.

**Обсуждение и выводы.** В настоящей работе приведены результаты численных и экспериментальных исследований ЭМС при МЭП и АЭП в твердотельных гетерогенных структурах. Результаты этих исследований указывают на удовлетворительное согласие амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов. Математическое моделирование показало, что при распространении акустического импульса на трещинах разного размера, расположенных в разных местах, происходят изменения интенсивности напряжений в объеме образца. Это обусловлено увеличением импульсных колебательных напряжений на двойных электрических слоях, проявляющихся на трещинах в деструктивных зонах или на контактах дефектов с вмещающим материалом. Вследствие взаимосвязи параметров АИ и АЭП изменяется и амплитуда генерируемых ЭМС в процессе нагружения сжимающими или сдвиговыми напряжениями [15, 20]. Внешнее возбуждение с помощью АИ тестируемых образцов показало, что так же, как при МЭП, удовлетворительно отслеживаются образование и развитие деструкции, в том числе в дефектных материалах.

На рис. 5 и 6, 8 и 9 показаны изменения амплитуды ЭМО при внешнем импульсном детерминированном акустическом зондировании нагружаемых образцов сжатием или сдвиговыми напряжениями до разрушения. Одноосное сжатие и сдвиг сопровождаются развитием деструктивных зон и разрушением в результате прорастания трещин отрыва. Электромагнитные отклики на зондирующие детерминированные АИ при постоянных значениях прикладываемых напряжений в процессе одноосного сжатия или сдвига существенно различаются по амплитуде и виду. Но в обоих случаях по ходу изменения амплитуды ЭМС отчетливо отмечаются зоны начала образования деструктивных процессов и их развития.

Из рис. 4, а, б, рис. 5, б и 6, б видно, что процессы развития разрушения при сжатии и сдвиге имеют свои закономерности. Это обусловлено тем, что при сжатии процесс разрушения развивается в объеме всего образца. В этом случае отчетливо выделяются этапы уплотнения, формирования очага разрушения, устойчивой прочности, предразрушения и прорастания разрушающих трещин (трещин отрыва). При сдвиговых напряжениях, созданных так, как показано на рис. 1, б, процесс разрушения большей частью развивается в краевых частях образца. Это обстоятельство влечет за собой различие электромагнитных откликов при нагружении сжимающими и сдвиговыми напряжениями в процессе развития деструкции образцов при внешнем детерминированном акустическом возбуждении образцов. В этом случае этап устойчивой прочности выделить трудно.

В результате проведенных исследований с дефектами, имеющими акустический импеданс меньше (фторопласт) и существенно больше (магнетитовая руда) акустического импеданса ЦПС, выявлено, что соотношение импеданса оказывает влияние на амплитуду ЭМО, возбуждаемого внешним акустическим импульсом. Очевидно, что при возникновении акустических импульсов в процессе образования и развития трещин также следует учитывать влияние акустического импеданса основного материала и дефекта. В отсутствие знаний о свойствах дефекта возможно получение сведений об его акустическом импедансе при внешнем акустическом зондировании.

Моделирование на образцах ЦПС с дефектом (включение из магнетитовой руды) показало, что контроль образования трещин и деструкции в процессе нагружения различными видами напряжений можно успешно осуществлять по спектрам электромагнитных откликов при возбуждении АИ (см. рис. 7). В этом случае на этапе образования и развития зоны деструкции материала при внешнем импульсном акустическом возбуждении спектр регистрируе-

мого ЭМО существенно расширяется как в низкочастотную, так и высокочастотную область. Такое расширение спектра ЭМО, в соответствии с моделью кинетической прочности твердых тел [30], обусловлено взаимодействием внешних АИ с появляющимися новыми микротрещинами и их срастанием при увеличении сжимающих или сдвиговых нагрузок. Таким образом, по виду амплитудно-частотного спектра при детерминированном акустическом возбуждении возможно определять размер появляющихся трещин в процессе развития разрушения образца различными видами силового нагружения.

Кроме того, экспериментальные исследования модельных образцов ЦПС с дефектами показали, что длительность внешнего акустического возбуждения за счет усиления резонансных проявлений влияет на изменения закономерностей ЭМО в зоне образования и развития деструкции при возрастании нагрузки (см. рис. 10).

Таким образом, рассмотренный в настоящей статье комплексный метод использования АЭП целесообразно использовать для тестирования дефектов и контроля процессов разрушения твердотельных диэлектрических материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В. В. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 тт. М.: Машиностроение, 2008.
2. Misra A., Gosh S. Electromagnetic radiation characteristics during fatigue crack propagation and failure // Applied physics. 1980. Vol. 23. P. 387—390. DOI:10.1007/BF00903221.
3. Хатиашвили Н. Г., Перельман М. Е. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // ДАН СССР. 1982. Т. 263, № 4. С. 839—842.
4. Bepal'ko A. A., Gol'd R. M., Yavorovich L. V., Datsko D. I. Influence Exerted by Siltstone Lamination on the Electromagnetic Signal Parameters during Acoustic Excitation of Samples // Journal of Mining Science. 2002. Vol. 38. P. 124—128. <https://doi.org/10.1023/A:1021103219461>.
5. Koltavy P. Experimental study of electromagnetic emission signals generated by crack generation in composite materials // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20, N 1. P. 15704. DOI: 10.1088/0957-0233/20/1/015704.
6. Fursa T. V., Dann D. D., Petrov M. V., Lykov A. E. Evaluation of Damage in Concrete under Uniaxial Compression by Measuring Electric Response to Mechanical Impact // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. Vol. 36, N 2. P. 30. DOI: 10.1007/s10921-017-0411-y.
7. Ogawa T., Oike K., Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // Journal of Geophysical Research. 1985. Vol. 90. P. 6245—6249. DOI:10.1029/JD090ID04P06245.
8. Ivanov V. V., Egorov P. V., Kolpakova P. A., and Pimonov A. G. Crack dynamics and electromagnetic radiation in loaded rocks // Journal of Mining Science. 1988. Vol. 24, N 5. P. 406—412. DOI:10.1007/BF02498591.
9. Yamada I., Masuda K., Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. Vol. 57, N 1—2. P. 157—168. DOI:10.1016/0031-9201(89)90225-2.
10. O'Keefe S. G., Thiel D. V. A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1995. Vol. 89, N 11. P. 127—135. DOI:10.1016/0031-9201(94)02994-M.
11. Bepal'ko A. A., Yavorovich L. V., Fedotov P. I. Diagnostics of destruction zone development in rock specimens during uniaxial compression based on the spectral characteristics of electromagnetic signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. Vol. 47, N 10. P. 41—49. DOI: 10.1134/S1061830911100068.
12. Молоцкий М. И., Малюгин В. Б. Энергетический спектр механоэлектронов // Физика твердого тела. 1983. Т. 25, вып. 10. С. 2892—2895.
13. Fursa T. V., Utsyn G. E., Petrov M., Dann D. D., Sokolovskiy A. N. Detecting degradation in reinforced concrete subjected to uniaxial compression, using the parameters of electric response to mechanical impact // Research in Nondestructive Evaluation. 2019. Vol. 30, is. 6. P. 317—333. DOI:10.1080/09349847.2018.1522404.

14. *Bespal'ko A. A., Gold R. M., Yavorovich L. V.* Influence of calcite electrification on parameters of electromagnetic signals under pulsed acoustic influence // *Physical mesomechanics*. 2004. Vol. 7, N 5. P. 95—99. DOI: 10.1023/A:1021103219461
15. *Bespal'ko A., Surzhikov A., Fedotov P., Pomishin E., Stary O.* Polarization and Electromagnetic Emissions of Natural Crystalline Structures upon Acoustic Excitation // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 970. P. 153—166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.153>.
16. *Nitsan U.* Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks // *Geophysical Research Letters*. 1977. Vol. 4, N 8. P. 333—337. DOI:10.1029/GL004I008P00333.
17. *Bolotin Yu. I.* Electroacoustic-emission coefficient of normal-rupture cracks in rock failure // *Journal of Mining Science*. 1993. Vol. 29, N 1. P. 36—38. DOI:10.1007/BF00734329.
18. *Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A.* Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes // *Strain*. 2010. Vol. 47. P. 144—152. DOI:10.1111/j.1475-1305.2010.00750.x.
19. *Bespal'ko A. A., Surzhikova A. P., Dann D. D., Utsin G. E., Petrov M. V., and Pomishin E. K.* Modelling Acoustic–Electric Nondestructive Testing for Defects in Dielectric Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. Vol. 57, N 2. P. 85—95. DOI:10.1134/S1061830921020029.
20. *Bespal'ko A. A., Isaev Y. N., Dann D. D., Pomishin E. K., Fedotov P. I., Petrov M. V., and Utsin G. E.* Transformation of Acoustic Pulses into Electromagnetic Signals in Defective Structures // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020. Vol. 39, N 4. Art. no. 82. P. 1—14. DOI:10.1134/S1062739116020418.
21. *Абрамчук М. В., Медунецкий В. М., Перепелкина С. Ю., Суриков Д. Г.* Влияние структурных особенностей конструкционных полимерно-композиционных материалов на физико-механические свойства изделий // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 11. С. 949—954. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-949-954.
22. Петрофизика. Геоинформационное оборудование и оснастка: Справочник. В 3 кн. Кн. 1. Горные породы и минералы / Под ред. *Н. Б. Дортмана*. М.: Недра, 1992. 391 с.
23. X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822 [Электронный ресурс]: <[www.perkinelmer.com](http://www.perkinelmer.com)>.
24. *Hoffman J. D.* Numerical methods for engineers and scientists. NY: Marcel Dekker. Inc., 2001. 840 p.
25. *Ziman J. M.* Principles of the Theory of Solids. Cambridge University Press, London, 1972. 435 p.
26. *Давыдов А. С.* Теория твердого тела. М.: Наука, 1976. 640 с.
27. *Hairer E., Wanner G.* Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential-algebraic problems. 2nd ed. Berlin, NY: Springer-Verlag, 1996. DOI: 10.1007/978-3-662-09947-6.
28. *Горшков А. Г., Старовойтов Е. И., Тартаковский Д. В.* Теория упругости и пластичности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 416 с.
29. *Molotnikov V., Molotnikova A.* Theory of Elasticity and Plasticity / A Textbook of Solid Body Mechanics. Springer Intern. Publishing, 2021. 444 p.
30. *Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Е. Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.

#### *Сведения об авторах*

- Анатолий Алексеевич Беспалько** — д-р техн. наук; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников; вед. научный сотрудник; E-mail: [besko@tpu.ru](mailto:besko@tpu.ru)
- Денис Дмитриевич Данн** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников; научный сотрудник; E-mail: [dddann@tpu.ru](mailto:dddann@tpu.ru)
- Павел Иванович Федотов** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников; инженер; E-mail: [pif@tpu.ru](mailto:pif@tpu.ru)

- Софья Алексеевна Дмитриева** — аспирант; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников;  
E-mail: dmitrieva\_sa93@mail.ru
- Цзюньхуа Ло** — аспирант; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников;  
E-mail: lulubvv@foxmail.com

Поступила в редакцию 17.10.22; одобрена после рецензирования 21.11.22; принята к публикации 28.02.23.

#### REFERENCES

1. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol'* (Unbrakable Control), Handbook in 8 volumes, Moscow, 2008. (in Russ.)
2. Misra A., Gosh S. *Applied physics*, 1980, vol. 23, pp. 387–390, DOI:10.1007/BF00903221.
3. Khatiashvili N.G., Perelman M.E. *Soviet Physics. Doklady*, 1982, no. 4(263), pp. 839–842, <http://mi.mathnet.ru/dan45200>. (in Russ.)
4. Bepal'ko A.A., Gol'd R.M., Yavorovich L.V., Datsko D.I. *Journal of Mining Science*, 2002, vol. 38, pp. 124–128, <https://doi.org/10.1023/A:1021103219461>.
5. Koktavy P. *Measurement Science and Technology*, 2009, no. 1(20), pp. 15704, DOI: 10.1088/0957-0233/20/1/015704.
6. Fursa T.V., Dann D.D., Petrov M.V., Lykov A.E. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, no. 2(36), pp. 30, DOI: 10.1007/s10921-017-0411-y.
7. Ogawa T., Oike K., Miura T. *Journal of Geophysical Research*, 1985, vol. 90, pp. 6245–6249, DOI:10.1029/JD090ID04P06245.
8. Ivanov V.V., Egorov P.V., Kolpakova P.A. and Pimonov A.G. *Journal of Mining Science*, 1988, no. 5(24), pp. 406–412, DOI:10.1007/BF02498591.
9. Yamada I., Masuda K., Mizutani H. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1989, no. 1-2(57), pp. 157–168, DOI:10.1016/0031-9201(89)90225-2.
10. O'Keefe S.G., Thiel D.V. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995, no. 11(89), pp. 127–135, DOI:10.1016/0031-9201(94)02994-M.
11. Bepal'ko A.A., Yavorovich L.V., Fedotov P.I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, no. 10(47), pp. 41–49, DOI: 10.1134/S1061830911100068.
12. Molotsky M.I., Malyugin V.B. *Soviet Physics, Solid State*, 1983, no. 10(25), pp. 2892–2895. (in Russ.)
13. Fursa T.V., Utsyn G.E., Petrov M., Dann D.D., Sokolovskiy A.N. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2019, no. 6(30), pp. 317–333, DOI:10.1080/09349847.2018.1522404.
14. Bepal'ko A.A., Gold R.M., Yavorovich L.V. *Physical mesomechanics*, 2004, no. 5(7), pp. 95–99, DOI: 10.1023/A:1021103219461.
15. Bepal'ko A., Surzhikov A., Fedotov P., Pomishin E., Stary O. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 970, pp. 153–166, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.153>.
16. Nitsan U. *Geophysical Research Letters*, 1977, no. 8(4), pp. 333–337, DOI:10.1029/GL004I008P00333.
17. Bolotin Yu.I. *Journal of Mining Science*, 1993, no. 1(29), pp. 36–38, DOI:10.1007/BF00734329.
18. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A. *Strain*, 2010, vol. 47, pp. 144–152, DOI:10.1111/j.1475-1305.2010.00750.x.
19. Bepal'ko A.A., Surzhikova A.P., Dann D.D., Utsyn G.E., Petrov M.V. and Pomishin E.K. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2021, no. 2(57), pp. 85–95, DOI:10.1134/S1061830921020029.
20. Bepal'ko A.A., Isaev Y.N., Dann D.D., Pomishin E.K., Fedotov P.I., Petrov M.V. and Utsyn G.E. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, no. 4(39), pp. 1–14, DOI:10.1134/S1062739116020418.
21. Abramchuk M.V., Medunetsky V.M., Perepelkina S.Yu., Surikov D.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 11(64), pp. 949–954, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-949-954. (in Russ.)
22. Dortman N.B., ed., *Geoinformatsionnoye oborudovaniye i osnastka: Spravochnik. V trekh knigakh. Kniga pervaya. Gomye porody i mineraly* (Petrophysics. Geoinformation Equipment and Equipment: a Handbook. In three books. Book one. Rocks and Minerals), Moscow, 1992, 391 p. (in Russ.)
23. *X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822*, [www.perkinelmer.com](http://www.perkinelmer.com).
24. Hoffman J.D. *Numerical methods for engineers and scientists*, NY, Marcel Dekker. Inc., 2001, 840 p.
25. Ziman J.M. *Principles of the Theory of Solids*, Cambridge University Press, London, 1972, 435 p.
26. Davydov A.S. *Teoriya tverdogo tela* (Solid State Theory), Moscow, 1976, 640 p. (in Russ.)
27. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential-algebraic problems*, Berlin, NY, Springer-Verlag, 1996, DOI: 10.1007/978-3-662-09947-6.
28. Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Tartakovskiy D.V. *Teoriya uprugosti i plastichnosti* (Theory of Elasticity and Plasticity), Moscow, 2002, 416 p. (in Russ.)
29. Molotnikov V., Molotnikova A. *Theory of Elasticity and Plasticity/A Textbook of Solid Body Mechanics*, Springer Intern. Publishing, 2021, 444 p.
30. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevskiy E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* (Kinetic Nature of the Strength of Solids), Moscow, 1974, 560 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- Anatoly A. Bepalko** — Dr. Sci.; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; Leading Researcher; E-mail: besko@tpu.ru
- Denis D. Dann** — PhD; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; Researcher; E-mail: dddann@tpu.ru
- Pavel I. Fedotov** — PhD; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; Engineer; E-mail: pif@tpu.ru
- Sofia A. Dmitrieva** — Post-Graduate Student; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; E-mail: dmitrieva\_sa93@mail.ru
- Junhua Luo** — Post-Graduate Student; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; E-mail: lulubvv@foxmail.com

Received 17.10.22; approved after reviewing 21.11.22; accepted for publication 28.02.23.