

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурса Т.В. Неразрушающий электромагнитный метод определения механической прочности изделий из композиционных диэлектрических материалов // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. – Ч. II. – С. 307–310.
2. Беспалько А.А., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Яворович Л.В., Клишко В.К., Штирц В.А., Шипеев О.В. Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. – Ч. II. – С. 253–256.
3. Дашук И.А., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю. Влияние деформационно-прочностных свойств структурных элементов на характеристики дисперсно наполненных композиций // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10. – № 3. – С. 366–384.
4. Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю. Влияние геометрии включений в полимерной композиции на вид кривой «напряжения-деформации» // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – Т. 7. – № 3. – С. 277–287.
5. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. – Т. 1. – М.: Наука, 1975. – 832 с.
6. Немирович-Данченко М.М. Численное моделирование трехмерных динамических задач сейсмологии // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 99–106.
7. Уорминг Р.Ф., Кутлер П., Ломакс Г. Нецентральные разностные схемы II и III порядка точности для решения нелинейных уравнений гиперболического типа // Ракетная техника и космонавтика. – 1973. – Т. 11. – № 2. – С. 76–85.
8. Барашков В.Н., Герасимов А.В., Люкшин Б.А. Прогнозирование разрушения промышленных установок // Химическая промышленность. – 1998. – № 10. – С. 657–661.
9. Герасимов А.В., Люкшин Б.А. Разрушение оболочки вращения, заполненной жидкостью, при действии импульсного источника давления // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Труды XIII межресп. конф. – Новосибирск, 1995. – С. 44–47.

УДК 622.02:531

СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ И КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов

Томский политехнический университет
E-mail: besko48@tpu.ru

Показано влияние проводимости горных пород на амплитуду электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении. Приведены экспериментальные результаты, указывающие на связь электромагнитной эмиссии и токов поляризации с этапами нагружения эпидот-гранатовых скарнов и магнетитовой руды при квазистатическом воздействии.

В процессе механического нагружения горных пород происходит их деформирование и разрушение, сопровождающееся образованием и развитием трещин различного масштаба от микротрещин до магистрального разрыва. При этом возникает акустическая (АЭ) и электромагнитная (ЭМЭ) эмиссии. Известно, что АЭ развивается с нарастанием интенсивности и достигает своего максимального значения во время макро разрушения. В работах [1–3] показано, что существует определенная связь между параметрами ЭМЭ и АЭ в диэлектрических материалах, обусловленная характером механоэлектрических преобразований в них. В свою очередь, разрыв ионных связей при образовании трещин приводит к появлению флуктуационного заряда на гранях трещин, неравномерное движение которых тоже ответственно за ЭМЭ.

При деформировании горных пород задолго до начала трещинообразования происходит движение имеющихся и вновь образованных дислокаций, которые вместе с заряженными точечными дефектами, окружающими их, участвуют в образовании двойных электрических слоев, являющихся важ-

ным звеном в механоэлектрических преобразованиях при воздействии акустических волн. При одноосном сжатии эти перемещения дефектов создают токи, которые имеют направленность из зон нагружения в зоны разгрузки и могут быть зарегистрированы соответствующей аппаратурой.

Известно, что при прохождении через кристалл упругой волны с частотой ν_0 , фиксируется электромагнитный сигнал (ЭМС), в спектре которого преобладает такая же частота ν_0 . Соотношение энергий электромагнитного и акустического излучений описывается выражением $m_0 = \delta_0^2 / \sigma_{кр} \varepsilon$, где δ_0 – поверхностная плотность электрических зарядов; $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение развития трещин, которое зависит от модуля упругости, поверхностной энергии развития трещин, стартовых размеров трещины и величины скачка трещины, а также от коэффициента Пуассона; ε – диэлектрическая проницаемость [4]. Это соотношение характеризует распределение электроупругих полей при образовании трещин нормального отрыва. В работе [5] указывается, что при одноосном сжатии образцов известняка и искусственного материала, моделирую-

щих неоднородную среду, происходит образование различных типов акустических волн, которые можно связать с процессом трещинообразования. Причем показано, что ЭМЭ возникает уже на первых стадиях нагружения, составляющих единицы и первые десятки процентов от разрушающих напряжений, и сопровождает весь процесс трещинообразования. Акустические волны от растущих трещин приводят в действие механизм, при котором происходят колебания величины дипольного момента двойных электрических слоев в статически нагружаемом объекте вследствие изменения расстояния между зарядами разного знака. В результате этого происходит эмиссия электромагнитных сигналов. В акустически возбуждаемых горных породах в лабораторных и натуральных условиях ЭМЭ наблюдается на границах контактирующих минеральных зерен, включений, прожилков и других неоднородностей.

Нашими исследованиями [3, 6] установлено, что в процессе акустического воздействия на горные породы регистрируются ЭМС, параметры которых зависят от структурно-текстурных особенностей и влажности. При этом важной характеристикой при исследовании механоэлектрических преобразований в горных породах являются их электрические свойства, которые зависят от минерального и фазового состава. Поэтому были проведены исследования связи амплитуды электромагнитного сигнала с указанными свойствами при акустическом воздействии и одноосном сжатии горных пород.

Для исследования амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении горных пород с различным удельным сопротивлением использовали установку, приведенную в работе [2]. Возбуждение АС осуществлялось двумя способами. Это генерация АС с помощью акустического пьезоизлучателя посредством подачи на него с генератора электрического импульса длительностью $10^{-6} \dots 10^{-4}$ с и амплитудой 100...800 В ступенчато с интервалом 100 В.

Другим способом возбуждения АС являлся удар шариком с известной массой, который производили с помощью пружинного устройства. Энергия АС оценивалась по скорости пролета шарика по трубке при ударе и отскоке.

Эксперименты по исследованию параметров ЭМС и ЭМЭ при квазистатическом нагружении проводились на прессе ИП-500. Поскольку образцы породы индивидуальны, то в процессе исследования необходимо получать максимум информации по изучаемому явлению. В связи с этим была собрана экспериментальная установка по исследованию параметров электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород, которая состояла из нескольких основных узлов (рис. 1). Нагружение P образцов осуществлялось прессом с подвижной и опорной плитами и встроенной силоизмерительной системой СИ. Максимальная нагрузка – 500 кН, которая достаточна для разрушения практически любых образцов пород сечением менее 20 см².

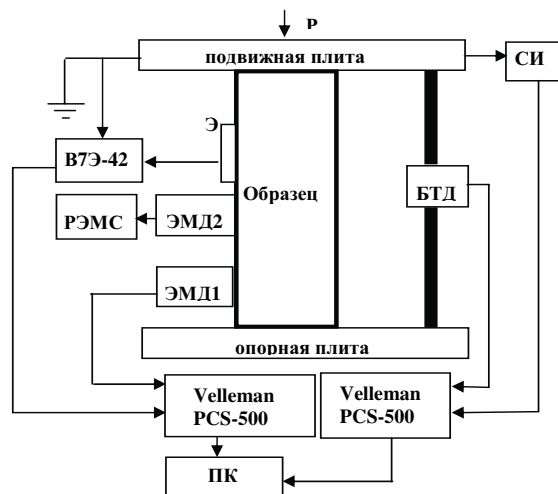


Рис. 1. Блок-схема установки для одноосного нагружения образцов

Аналоговый сигнал нагрузки с силоизмерительной системы через осциллографическую приставку PCS-500 Velleman, работающей в режиме самописца, записывался в память компьютера (ПК). С помощью собранных по мостовой схеме тензорезисторов через усилитель блока тензорезисторных датчиков БТД и осциллографическую приставку на ПК регистрировали изменения величины продольной деформации образца. Электромагнитный сигнал измеряли с помощью емкостного датчика ЭМД1, который имел дифференциальный вход и был снабжен согласующим усилителем мощности с коэффициентом усиления 100. В последующем ЭМС через вторую осциллографическую приставку PCS-500 Velleman, также работавшей в режиме самопишущего прибора, передавался на ПК для дальнейшего анализа его характеристик. Измерение тока поляризации i_p осуществляли с помощью вольтметра-электрометра В7Э-42 с последующей записью его в память ПК. Токосъемный электрод Э прикрепляли к образцу проводящим клеем на основе серебра. Информацию об изменениях ЭМЭ при одноосном сжатии образцов, поступающую с датчика ЭМД2, записывали в память прибора РЭМС1 [7], с которого после окончания эксперимента она считывалась на ПК и анализировалась. При необходимости имелась возможность осуществлять акустическое возбуждение нагружаемых образцов перечисленными выше способами.

Эксперименты проводились на образцах горных пород, отобранных на месторождении Таштагольском в Кемеровской области. Исследовались скарны (эпидотовые, гранат-магнетитовые, эпидот-гранатовые); сиениты; микросиениты; диоритовый порфирит; метаморфический сланец и магнетитовая руда.

Исследуемые образцы горных пород обладают различной электропроводностью, обусловленной природой проводимости породообразующих и акцессорных или рудных минералов, а также струк-

турными особенностями, пористостью и влажностью. Так магнетитовая руда, имеет высокую проводимость, ее удельное сопротивление порядка 10^3 Ом·м и менее. Однако эффективность механоэлектрических преобразований в магнетитовой руде будет определяться не только электрическими свойствами основного минерала – магнетита, но и содержанием других минеральных включений, а также структурными особенностями. Так, например, столбец 10 (рис. 2) соответствует амплитуде ЭМС для образца магнетитовой руды с 10 % содержанием кварца. На рис. 2 приведены итоговые значения максимальной амплитуды аналогового ЭМС при акустическом возбуждении образцов Таштагольского месторождения. Исследуемые образцы в зависимости от типа породы распределены в три группы.

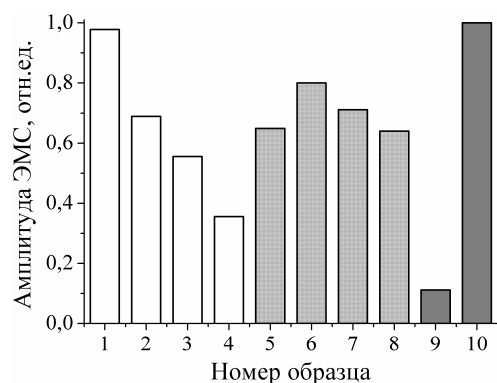


Рис. 2. Максимальная амплитуда электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении горных пород Таштагольского месторождения: 1) скарн эпидотовый; 2) скарн эпидот-гранатовый; 3) скарн с включения пирита и магнетита; 4) скарн гранат-магнетитовый; 5) сиенит; 6) микросиенит; 7) метаморфический сланец; 8) диоритовый порфирит; 9) магнетитовая руда; 10) магнетитовая руда с трещиной, залеченной кварцем

В первую группу вошли скарны различного состава с удельным сопротивлением до 10^7 Ом·м. Амплитуда электромагнитного сигнала от образцов, имеющих в своем составе высокопроводящие минералы, такие как пирит и магнетит, существенно меньше (столбец 3 и 4) по сравнению с образцами, в составе которых нет минералов с большой проводимостью. Во вторую группу вошли образцы пород со средним удельным сопротивлением до $10^6 \dots 10^7$ Ом·м, не имеющих в своем составе высокопроводящих минералов. Амплитуды их электромагнитных откликов сравнимы со скарнами без включений пирита и магнетита. В этой группе максимальная амплитуда ЭМС слабо отличается от образца к образцу. В отдельную группу выделена магнетитовая руда, в которой в отсутствие кварцевых включений амплитуда электромагнитного отклика небольшая. Известно, что магнетит является одним из самых проводящих минералов. Поэтому возможным объяснением наблюдаемому эффекту является потеря энергии ЭМС в проводящей среде. Так для магнетита коэффициент поглощения ЭМС можно записать как $\alpha \approx \sqrt{\pi \mu f / \rho}$, где μ – магнитная проницаемость; ρ – удельное сопротивление; f – частота.

На частоте 1 кГц для магнетита $\rho=10^3$ Ом·м, $\mu=10^4$, а коэффициент поглощения соответствует $\alpha=170$ м⁻¹. На частоте $f=10$ кГц коэффициент поглощения $\alpha=560$ м⁻¹. Изменение амплитуды гармоники частотой 1 кГц на расстоянии 1 см определялась как $E/E_0=e^{-\alpha x}=0,37$, где E – напряженность электрического поля, E_0 – сигнал на входе. Для частоты 10 кГц это отношение равно $3,7 \cdot 10^{-3}$. В результате амплитуда частотных гармоник ЭМС более 10 кГц уменьшится в 100 раз сильнее, чем амплитуда частотных гармоник ЭМС менее 1 кГц.

При одноосном сжатии эксперименты проводились на образцах горных пород, отобранных на Таштагольском месторождении и представленных магнетитовой рудой и вмещающими породами, которые отличались проводимостью. Образцы отбирались из кернов и имели цилиндрическую форму высотой 8,0 см и диаметром 4,0 см. Нагружение производили вдоль наибольшей оси образцов линейно до разрушающих значений. Скорость изменений усилий прессом поддерживалась для всех образцов, равной $0,32 \pm 0,03$ кН/с.

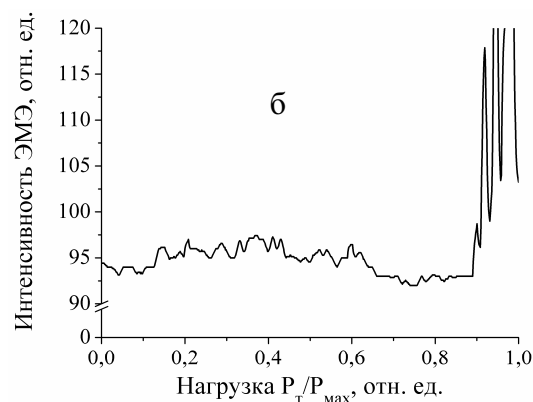
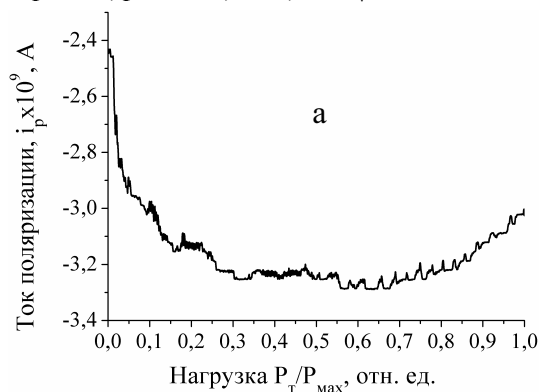


Рис. 3. Изменения: а) тока поляризации i_p и б) электромагнитной эмиссии при нагружении до разрушающих значений P_{max} образца эпидот-гранатового скарна

Регистрировались изменения нагрузки P , продольная деформация, электромагнитная эмиссия и изменение тока поляризации i_p . Изменения ЭМЭ и i_p для образца эпидот-гранатового скарна на всем этапе нагружения до разрушающих значений представлено на рис. 3. Для этого образца разрушающее усилие P_{max} составило 202 кН. Зависимости ЭМЭ и i_p для

образцов магнетитовой руды представлены на рис. 4. На рис. 4, а, б, показаны зависимости ЭМЭ и i_p при нагружении образцов магнетитовой руды с диагональной трещиной толщиной 2...4 мм, залеченной эпидотом, и несколькими трещинами, залеченными кальцитом, толщиной менее 1 мм. На рис. 4, в, г, эти же зависимости для магнетитовой руды с обособленными вкраплениями и трещиной толщиной до 2 мм, залеченной кальцитом. Для этих образцов P_{\max} составила 224 и 212 кН, соответственно, причем первый образец разрушился по диагонали, а второй – по классическому механизму с множественными трещинами отрыва и с образованием пирамидок у нагружающих плит пресса. Исходя из того, что образцы вмещающих пород и магнетитовой руды отличались по своим электрическим и магнитным характеристикам, приемным устройством ЭМЭ для магнетитовой руды служили индукционные датчики, а для вмещающих пород – емкостные.

Как и следовало ожидать, в процессе нагружения образцов, с момента приложения нагрузки, регистрируется электромагнитная эмиссия. Характер изменения ЭМЭ показывает увеличение электромагнитной активности на этапе, предшествующем разрушению образцов (рис. 3, б, 4, а). На этих участках нагружения происходит нестационарный процесс трещинообразования и, как следствие, наблюдается повышенная акустическая эмиссия, которая при

взаимодействии с двойными электрическими слоями в исследуемых образцах вызывает вариации ЭМЭ.

Обращает на себя внимание ход изменения тока поляризации в процессе деформирования образцов вмещающих пород и магнетитовой руды. Так для эпидот-гранатового скарна с момента начала сжатия образца ток непрерывно нарастал до значений $i_p = -3,2 \cdot 10^{-9}$ А, затем в интервале 0,3...0,7 от предельной нагрузки ток остается примерно на одном уровне и только с приближением к P_{\max} величина тока падает. Такой вид зависимостей с некоторыми вариациями по абсолютной величине тока характерен для многих вмещающих пород. Этому соответствуют и изменения интенсивности ЭМЭ. В интервале 0,2...0,7 от P_{\max} наблюдали повышенные значения ЭМЭ, после чего до образования трещин отрыва изменения ЭМЭ выражены слабо.

Для разрушившегося по диагонали образца магнетитовой руды значение тока изменялось по абсолютному значению в интервале $(10...4) \cdot 10^{-7}$ А (рис. 4, б), а для образца, разрушившегося классическим способом, значение тока изменялось в интервале $(2,0...1,4) \cdot 10^{-5}$ А (рис. 4, г). В обоих образцах на протяжении всего цикла нагружения знак тока скачкообразно менялся от минуса к плюсу и обратно. При реполяризации абсолютное значение тока оставалось неизменным. Причем если при диагональном разрушении образца магнетитовой ру-

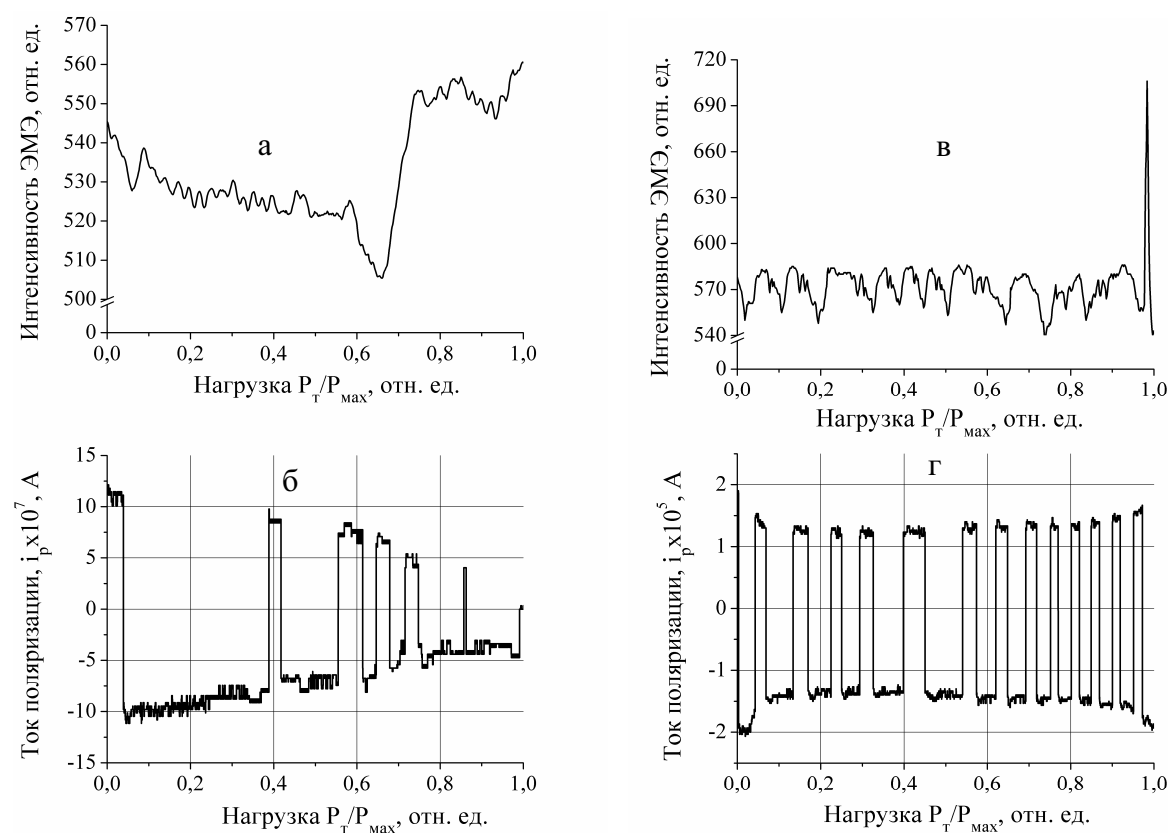


Рис. 4. Изменения электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) и тока поляризации i_p при нагружении до разрушающих значений P_{\max} образцов магнетитовой руды: а, б – для образца с диагональной трещиной, залеченной эпидотом и кальцитом; в, г – для образца с обособленными вкраплениями кальцита

ды, несмотря на переполяризацию, ток уменьшался, то при классическом способе разрушения ток слабо изменялся и к моменту разрушения возрастал практически до первоначального значения. Наибольшее количество переполяризаций тока для образца магнетитовой руды с диагональной трещиной наблюдалось при значениях нагрузки $0,55...0,75$ от P_{\max} , когда развивалась зона разрушения. Этому же интервалу соответствовало и максимальное изменение ЭМЭ (рис. 4, а). Для второго образца магнетитовой руды переполяризация тока наблюдалась с разной периодичностью на всех этапах нагружения до его разрушения. Причем наибольшая периодичность изменения полярности i_p происходила на этапе уплотнения образца до значений $0,3$ от P_{\max} и в интервале $0,55...1,0$ от P_{\max} . Соответственно для этого образца, во всем интервале нагружения интенсивность ЭМЭ носит колебательный характер, и нет значительных изменений ее величины (рис. 4, в), кроме как при самом акте разрушения.

Проведенные исследования показали, что разрушающая нагрузка для образцов вмещающей породы и магнетитовой руды примерно одинаковая. Оценивая механические свойства образцов, можно сказать, что этап предразрушения для образцов обеих групп прослеживается по изменениям электромагнитной эмиссии. Особый интерес представляет ход изменения тока поляризации в этих образцах.

Во вмещающих породах при одноосном сжатии возникал ток поляризации, который на начальном этапе нагружения при уплотнении образца за счет имеющихся в нем трещин и пор, обусловлен смещением центров тяжести разноименных зарядов, в результате чего возникают электрические диполи. Образование и релаксация их сопряжены с перемещением заряженных частиц, т.е. с появлением тока. Движение дислокаций также приводит к появлению тока. Дальнейшее равномерное увеличение нагрузки ($P/P_{\max}=0,5...0,7$) привело к стабилизации процессов увеличения i_p , которая обусловлена перемещением вновь образованных дислокаций и заряженных частиц, и уменьшением этого тока в результате появления новых микротрещин и их роста, препятствующих движению дислокаций и заряженных дефектов структуры. На этапе укрупнения очагов разрушения и образование магистрального разрыва ($P/P_{\max}\geq 0,7$) значение тока уменьшалось, так как на этом этапе превалирует процесс роста трещин. Интервал $0,5...0,7$ от P/P_{\max} выделяется тем, что направленно двигающиеся под действием приложенных статических напряжений дислокации и заряженные дефекты замыкаются на вновь образованных микротрещинах, контактах зерен и фрагментах включений разных минералов. Образуются или подзаряжаются уже имеющиеся двойные электрические слои. В результате колебания любым способом этих слоев интенсивность ЭМЭ и амплитуда ЭМС будут возрастать, что мы и

наблюдаем в эксперименте. Укрупнение очагов разрушения и образование трещин отрыва приводит к увеличению площади двойных электрических слоев и выделившейся акустической энергии, что сопровождается возрастанием интенсивности ЭМЭ и амплитуды ЭМС.

На рис. 4 видно, что для образцов горных пород, представленных магнетитовой рудой, характер изменения регистрируемого тока i_p кардинально отличался от тока при квазистатическом нагружении образцов вмещающих пород. Это, вероятно, обусловлено электрической поляризацией минералов, являющихся включениями в магнетитовую руду, а также спонтанным изменением намагниченности магнетита под действием механических напряжений, в том числе при резком их перераспределении в процессе прорастания трещин [8, 9]. В изменяющемся поле напряжений между разнонаправленными в породе доменами минерала создаются конечные граничные условия, при которых направления магнитных моментов непрерывно меняются. Направления магнитных моментов в граничном слое строго не параллельны и значительно отклоняются от осей легкой намагничивания, что приводит к росту обменной и кристаллографической энергии, которая, вероятно, и обуславливает, наряду с перемагничиванием доменов, изменение направления тока. При этом важно отметить, что процессы переполяризации тока совпадают с изменением интенсивности ЭМЭ на этапе подготовки разрушения ($0,55...0,75$) от P_{\max} для образца магнетитовой руды, разрушившейся по диагонали (рис. 4, а). Для образца магнетитовой руды, разрушившегося классически, такая связь наблюдается на всех этапах нагружения. Для детального выяснения взаимосвязи переполяризации тока и намагниченности магнетитовой руды и влияния их на изменения параметров ЭМЭ требуются дополнительные исследования.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при импульсном акустическом возбуждении амплитудные параметры ЭМС существенно зависят от проводимости горной породы. Наличие в горной породе высокопроводящих минеральных включений приводит к значительному снижению эффективности механоэлектрических преобразований.

Показано, что интенсивность ЭМЭ и токи поляризации при статическом нагружении горных пород коррелируют с этапами уплотнения, подготовки разрушения и самим актом разрушения образцов вмещающих пород и магнетитовой руды. Необходимо отметить, что процесс переполяризации измеряемых токов, вероятно, связан с перемагничиванием доменов магнетита в руде. В случае, когда переполяризация тока наблюдается на всех этапах статического нагружения магнетитовой руды, по характеристикам ЭМЭ затруднительно выделять этапы нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хатишвили Н.Г. Электромагнитное излучение ионных кристаллов, стимулированное акустической волной // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – Вып. 18. – С. 1128–1132.
2. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И. Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 2. – С. 8–14.
3. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В. Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 5. – С. 95–99.
4. Болотин Ю.И. О коэффициенте электроакустического излучения трещин нормального отрыва при разрушении горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1993. – № 5. – С. 44–46.
5. Шамина О.Г. Об особенностях спектров продольных и поперечных волн // Физика Земли. – 2000. – № 11. – С. 35–39.
6. Яворович Л.В., Гольд Р.М., Ласуков В.В. Исследование амплитуды электромагнитного сигнала при ударном воздействии на образцы горных пород с различной пористостью // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 6. – С. 33–39.
7. Беспалько А.А., Хорсов Н.Н. Аппаратурный комплекс для исследования напряженно-деформированного состояния горных пород в шахтах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Междунар. конф. – Новосибирск, 2004. – С. 210–213.
8. Грабовский М.А. Изменение электрического сопротивления магнетита при намагничивании // Известия АН СССР. Сер. геофизическая. – 1951. – № 4. – С. 61–70.
9. Грабовский М.А., Пархоменко Э.И. Об изменении магнитных свойств магнетитов под действием больших сжимающих напряжений // Известия АН СССР. Сер. геофизическая. – 1953. – № 5. – С. 405–417.

УДК 539.21:539.1

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ФЕРРИТОВОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ПУЧКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

А.П. Суржиков, Т.С. Франгульян, С.А. Гынгазов, Н.Н. Коваль*, В.Н. Девятков*

Томский политехнический университет

*Институт сильноточной электроники СО РАН. г. Томск

E-mail: ghyngazov@tpu.ru

Исучено влияние сильноточного импульсного пучка низкоэнергетических электронов на изменение микротвердости приповерхностных слоев ферритовой керамики. Установлено существование зависимости измеряемой микротвердости от величины нагрузки на индентор за счет упругого восстановления отпечатка (масштабный эффект). Показано, что в зависимости от количества импульсов электронного воздействия измеренное значение микротвердости может как уменьшаться (одноимпульсное облучение), так и возрастать (10 импульсов) по отношению к исходному состоянию образца. Анализ результатов проведен с учетом вклада упругого восстановления отпечатка индентора в эффекты радиационного изменения микротвердости керамики.

В последнее время активно разрабатываются методы поверхностного модифицирования поверхности материалов с использованием источников концентрированных потоков энергии, в частности, сильноточных импульсных пучков низкоэнергетических электронов (СИПНЭ).

Сущность процесса воздействия СИПНЭ на материалы состоит в том, что кинетическая энергия электронного пучка превращается в зоне обработки в тепловую. Т.к. диапазоны изменений мощности и концентрации энергии в импульсе пучка велики, то практически возможно получение всех видов термического воздействия на приповерхностные слои твердого тела: нагрев до заданных температур, плавление и испарение с очень высокими скоростями. Последующее резкое охлаждение обычно сопровождается высокоскоростной кристаллизацией расплава и закалочными явлениями. Обрабатываемый материал при этом испытывает тепловой удар, что приводит к появлению в телах мощной волны механических напряжений.

Возбуждаемые в мишени тепловые поля и волны механических напряжений способны вызывать соответствующие структурно-фазовые превращения в приповерхностных слоях материалов и, в конечном итоге, приводить к изменению их физико-механических свойств.

Экспериментальные исследования по модифицированию структуры и свойств, вызванных действием СИПНЭ на твердое тело, в основном, проведены на металлах и сплавах [1–3]. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о возможности в достаточно широких пределах управлять микроструктурой, фазовым составом, прочностными свойствами поверхностных слоев металлов и сплавов с помощью СИПНЭ. В результате удалось обнаружить целый ряд позитивных эффектов по модифицированию свойств поверхности, представляющих интерес для практики. При этом отмечался достаточно сложный характер изменения также и объемных свойств металлов [2]. В зависимости от режимов обработки обнаружено формирование многослойной структуры с различной твердостью в отдельных слоях.