© С.А. Гончаров, П.П. Ананьев, С.В. Ермаков, 2008

УДК 622.236.2

С.А. Гончаров, П.П. Ананьев, С.В. Ермаков

РАЗУПРОЧНЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Семинар № 3

В последние годы активно ведутся научные исследования в области разупрочнения горных пород путем их магнитно-импульсной обработки (МИО), которая заключается в следующем: через отрезок диэлектрического трубопровода, на котором смонтирована система индуктивных катушек, генерирующих поля с заданной частотой – пропускается руда.

Эффект разупрочнения руды при МИО обусловлен следующими факторами: при МИО электрическое и магнитное поля распространяется по всему объему руды; при наличии в руде минералов электрострикторов и пъезоэлектриков (например – кварца, турмалина и иных сегнетоэлектриков) или магнитных минералов (например – сульфидов, окислов и иных магнитных соединений железа, никеля, хрома) МИО вызывает в этих зернах эффекты магнитострикции, электрострик-ции и обратного пьезоэффекта, характеризуемые возникновением деформаций в отдельных минералах. За счет неоднородности магнито-электрических и механических свойств минералов, входящих в состав руды, а также наличия воды в порах, на границах зерен возникает концентрация механических напряжений (структурных напряжений), что приводит к межзерновому разупрочнению породы. [1].

В связи с выше изложенным, МИО пород, содержащих кварц (пьезоэлектрик) целесообразно проводить при высоких значениях электрического поля *E*, а МИО пород содержащих минералы-ферримагнетики (например магнетит) целесообразно проводить при высоких значениях напряженности магнитного поля *H*.

Взаимосвязь электрической и магнитной составляющих поля определяются уравнением Максвела [2]:

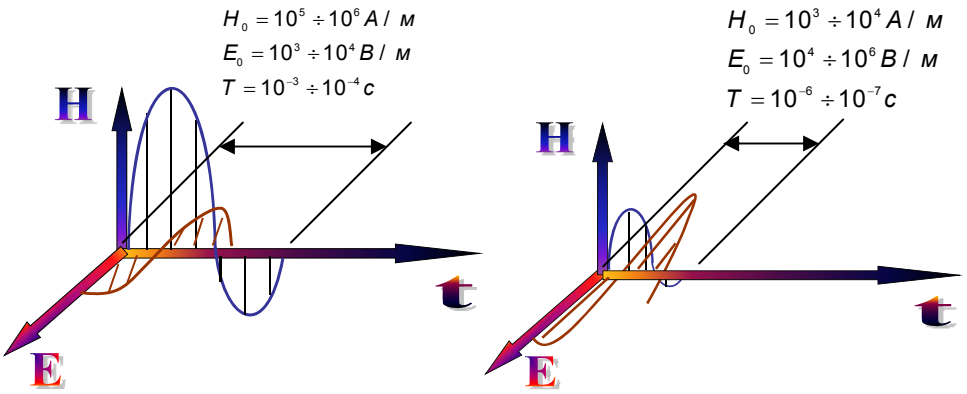
$$rotE = -\mu_0 \frac{\partial H}{dt}, \qquad (1)$$

что эквивалентно соотношению:

$$E_0 \sim \frac{H_0}{T}, \qquad (2)$$

где T - период разряда импульса; E и H - переменные электрической и магнитной напряженности электромагнитного поля; t - переменная времени; E_0, H_0 - амплитудное значение электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля; μ_0 - магнитная постоянная.

Анализ выражения (2) показывает, что получение высоких значений электрической составляющей E_0 потребует либо увеличения значений составляющей H_0, что равнозначно увеличению энергоемкости МИО, либо уменьшения длительности импульсов. Поэтому на



а) б)

Рис. 1. Временные зависимости напряженностей магнитного и электрического поля при МИО для полей: а) низких частот; б) высоких частот

практике целесообразно использовать либо низкочастотное воздействие (большие значения H_0 – для магнитострикторов), либо высокочастотное воздействие (большие значения E_0 – для пьезоэлектриков и электрострикторов). (рис. 1).

При МИО горных пород, содержащих минералы магнитострикторы, электрострикторы и пьезоэлектрики (напри-мер, железистый кварцит) целесо-образно осуществлять их разупрочнение, воздействуя как НЧ полями так и ВЧ полями, что обеспечит генерацию явлений магнитострикции, электрострикции и обратного пьезоэффекта.

Последовательное действие полей низких и высоких частот в соответствии с принципом аддитивности обеспечивает суммарный эффект разупрочнения равный сумме эффектов разупрочнения от действия каждого поля в отдельности:

$$Э_{\Sigma A} = Э_{НЧ} + Э_{ВЧ}, \qquad (3)$$

где $Э_{\Sigma A}$ – суммарный эффект разупрочнения горной породы; $Э_{НЧ}$ – эффект разупрочнения горной породы от действия поля низких частот; $Э_{ВЧ}$ – эффект разупрочнения горной породы от действия поля высоких частот.

При одновременном воздействии разнонаправленных полей НЧ и ВЧ [3] принцип аддитивности нарушается – возникает синергетический эффект:

$$Э_{\Sigma C} = Э_{НЧ} + Э_{ВЧ} + \delta Э, \qquad (4)$$

где $\delta Э$ – дополнительный эффект разупрочнения горной породы от одновременного действия импульсных полей низких и высоких частот.

Для подтверждения вышеизложенных положений были проведены лабораторные исследования с целью экспериментального определения дополнительного (синергетического) эффекта разупрочнения горной породы при одновременном воздействии НЧ и ВЧ импульсных электромагнитных полей. Для данных исследований использовалась установка ГАН 5000, содержащая индуктор, представленный в виде системы катушек, способных генерировать поля высоких и низких частот (рис. 2, *в*). Испытания проводились на железистых кварцитах при их расположении в индукторе в двух областях – А и Б, где векторы напряженностей магнитного и электрического полей разнонаправлены (рис. 2, *а, б*).

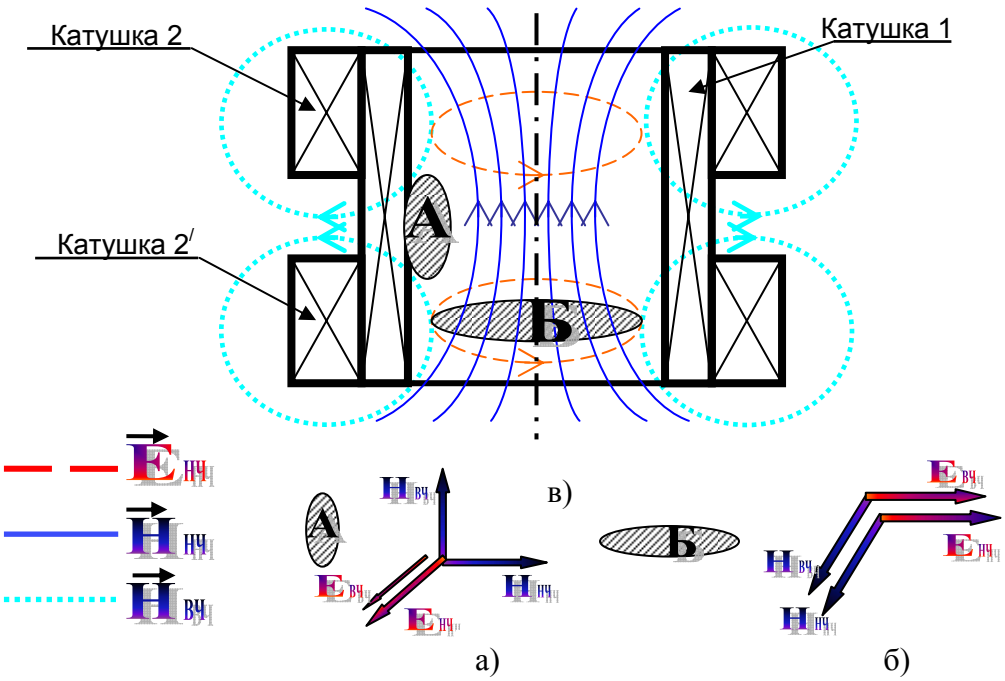


Рис. 2. Распределение ВЧ и НЧ полей при экспериментальных исследованиях: а) поля в области А; б) поля в области Б; в) силовые линии НЧ и ВЧ полей в индукторе; $\overrightarrow{E_{НЧ}}$ - вектор электрической напряженности НЧ магнитно-импульсного поля, В/м; $\overrightarrow{E_{ВЧ}}$ - вектор электрической напряженности ВЧ магнитно-импульсного поля, В/м; $\overrightarrow{H_{НЧ}}$ - вектор магнитной напряженности НЧ магнитного поля, А/м; $\overrightarrow{H_{ВЧ}}$ - вектор магнитной напряженности ВЧ магнитного поля, А/м

После магнитно-импульсной обработки руда была подвержена ударно механическому измельчению и рассеиванию по классам крупности. В качестве критерия разупрочнения брался остаток на сите фракции +5 мм. По полученным результатам была построена гистограмма (рис. 3). Из гистограммы (рис. 3) видно, что остаток на сите +5 мм при расположении руды в области Б индуктора и одновременном действии полей НЧ и ВЧ самый минимальный. Несколько больше этот остаток на сите при расположении руды в области А индуктора и одновременном действии полей НЧ и ВЧ. Самый большой остаток на сите имеет место при последовательной обработке руды НЧ и ВЧ полями в области Б. Эффект разупрочнения горной породы при одновременном действии НЧ и ВЧ полей отличается от эффекта разупрочнения горной породы при их последовательном действии, причем в области Б он выше.

Для теоретического обоснования дополнительного (синергетического) эффекта разупрочнения были рассмотрены механические напряжения, возникающие в горной породе при одновременном воздействии на нее НЧ и ВЧ импульсных магнитных полей соответственно для области А и области Б. Картина напряжений, возникающих в горной породе для каждой из областей представлена на рис. 4.

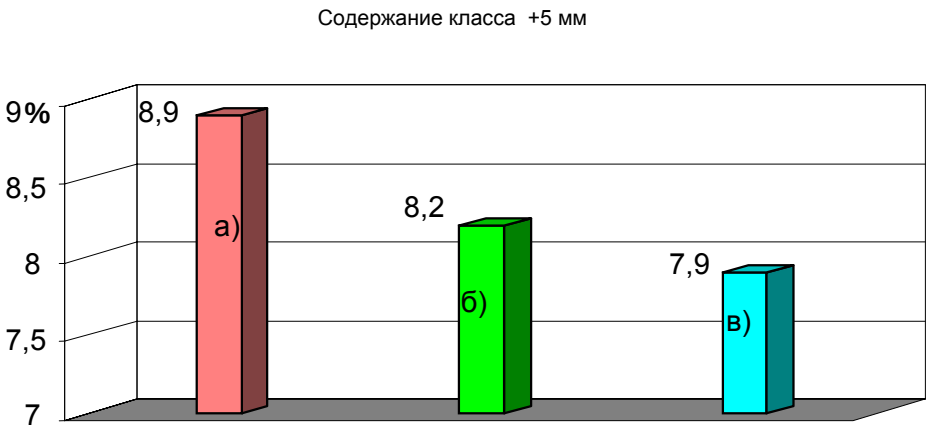


Рис. 3. Гистограмма содержания фракции класса +5 мм после ударного механического разрушения железистых кварцитов для различных режимов их МИО: а) последовательное действие НЧ и ВЧ полей в области Б; б) одновременное действие НЧ и ВЧ полей в области А ; в) одновременное действие НЧ и ВЧ полей в области Б

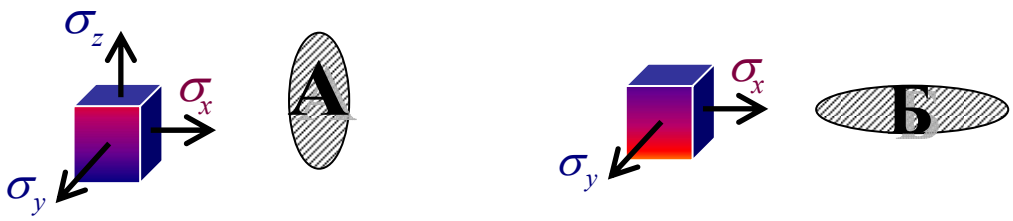


Рис. 4. Напряжения, возникающие в руде при одновременном воздействии на нее НЧ и ВЧ импульсных магнитных полей для области А и области Б

Механические напряжения в железистых кварцитах, возникающие при их МИО можно описать по аналогии со структурными термическими напряжениями, возникающими на границах минеральных зерен при нагреве [4]. Напряжения для области Б вдоль осей выглядят следующим образом:

вдоль оси x:

$$\sigma_x = \frac{\delta_1(E_{НЧ} + E_{ВЧ}) - \delta_2(E_{НЧ} + E_{ВЧ})}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}, \quad (5)$$

вдоль оси y:

$$\sigma_y = \frac{\lambda_1(H_{НЧ} + H_{ВЧ}) - \lambda_2(H_{НЧ} + H_{ВЧ})}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}, \quad (6)$$

где δ_1, δ_2 - суммарный коэффициент обратного пьезоэффекта и электрострикции для магнетита и кварца соответственно; $E_{НЧ}$, $E_{ВЧ}$ - напряженности электрического поля соответственно для

НЧ и ВЧ, В/м; λ_1, λ_2 - коэффициент магнитострикции для магнетита и кварца соответственно; $H_{НЧ}$, $H_{ВЧ}$ - напряженности магнитных полей соответственно для НЧ и ВЧ, А/м; G_1, G_2 - модули упругости магнетита и кварца соответственно, МПа.

Пренебрегая обратным пьезоэффектом и электрострикцией в магнетите и эффектом магнитострикции в кварце имеем:

$$\delta_1 = 0 \qquad (7)$$

$$\lambda_2 = 0 \qquad (8)$$

Проекции механических напряжений для области Б согласно (5) и (6) и с учетом (7) и (8) имеют вид:

вдоль оси x:

$$\sigma_x = \frac{-\delta_2 E_{НЧ} - \delta_2 E_{ВЧ}}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}, \qquad (9)$$

вдоль оси y:

$$\sigma_y = \frac{\lambda_1 H_{НЧ} + \lambda_1 H_{ВЧ}}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}} \qquad (10)$$

Проекции напряжений для области А на соответствующие оси с учетом выражений (7) и (8) выглядят следующим образом:

на ось x:

$$\sigma_x = \frac{\lambda_1 H_{НЧ}}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}, \qquad (11)$$

на ось y:

$$\sigma_y = \frac{-\delta_2 E_{НЧ} - \delta_2 E_{ВЧ}}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}, \qquad (12)$$

на ось z:

$$\sigma_z = \frac{\lambda_1 H_{ВЧ}}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}} \qquad (13)$$

Суммарные напряжения, возникающие в горной породе для области Б запишутся следующим образом:

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2. \qquad (14)$$

Суммарные напряжения, возникающие в горной породе для области А запишутся следующим образом:

$$\sigma_\Sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2. \qquad (15)$$

С учетом выражений (9), (10) и (11), (12), (13) определим величину квадрата суммарных напряжений в области (Б) и области (А):

$$\sigma_{\Sigma Б}^2 = \frac{(\lambda_1^2 H_{НЧ}^2 + \delta_2^2 E_{НЧ}^2) + (\delta_2^2 E_{ВЧ}^2 + \lambda_1^2 H_{ВЧ}^2) + 2(\delta_2^2 E_{НЧ} E_{ВЧ} + \lambda_1^2 H_{НЧ} H_{ВЧ})}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}} \qquad (16)$$

$$\sigma_{\Sigma А}^2 = \frac{(\lambda_1^2 H_{НЧ}^2 + \delta_2^2 E_{НЧ}^2) + (\delta_2^2 E_{ВЧ}^2 + \lambda_1^2 H_{ВЧ}^2) + 2\delta_2^2 E_{НЧ} E_{ВЧ}}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}} \qquad (17)$$

Учитывая, что слагаемые $(\lambda_1^2 H_{НЧ}^2 + \delta_2^2 E_{НЧ}^2)$ и $(\delta_2^2 E_{ВЧ}^2 + \lambda_1^2 H_{ВЧ}^2)$ являются проявлением напряжений, вызванных НЧ и ВЧ полями соответственно, выражения (16) и (17) могут быть представлены в виде:

$$\sigma_{\Sigma Б}^2 = \sigma_{НЧ} + \sigma_{ВЧ} + \delta\sigma_Б, \qquad (18)$$

$$\sigma_{\Sigma A}^2 = \sigma_{НЧ} + \sigma_{ВЧ} + \delta\sigma_{\text{А}} \ , \qquad (19)$$

где $\sigma_{\Sigma Б}$ - Суммарные напряжения, возникающие в горной породе для области Б; $\sigma_{\Sigma A}$ - Суммарные напряжения, возникающие в горной породе для области А;

$$\sigma_{НЧ} = \frac{\lambda_1^2 H_{НЧ}^2 + \delta_2^2 E_{НЧ}^2}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}$$ - напряжения, возникающих в результате действия НЧ полей;

$$\sigma_{ВЧ} = \frac{\delta_2^2 E_{ВЧ}^2 + \lambda_1^2 H_{ВЧ}^2}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}$$ - напряжения, возникающих в результате действия ВЧ полей;

$$\delta\sigma_{\text{А}} = \frac{2\delta_2^2 E_{НЧ} E_{ВЧ}}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}$$ - напряжения, возникающие в результате совместного действия НЧ и ВЧ полей в области А;

$$\delta\sigma_{\text{Б}} = \frac{2(\delta_2^2 E_{НЧ} E_{ВЧ} + \lambda_1^2 H_{НЧ} H_{ВЧ})}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}}$$ - напряжения, возникающие в результате совместного действия НЧ и ВЧ полей в области Б;

Из выражений (18) и (19) видно, что суммарные напряжения складываются из напряжений, возникающих в результате действия НЧ полей; напряжений, возникающих в результате действия ВЧ полей и напряжений, возникающих в результате их совместного действия. Причем напряжения, возникающие в результате совместного действия НЧ и ВЧ полей для области Б больше, что подтверждено экспериментально. Полученная расчетная модель позволяет определить величину синергетического эффекта разупрочнения горной породы при воздействии электромагнитных полей сложной пространственно-временной структуры, что позволяет формировать требования к проектированию технологических блоков (ин-дукторов).

Выводы

Теоретический анализ механических напряжений, возникающих в горной породе на границах раздела магнетита и кварца при ее магнитно-импульсной обработке позволил определить величину синергетического эффекта разупрочнения горной породы при одновременном воздействии на нее НЧ и ВЧ импульсных магнитных полей.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили наличие дополнительного (синергетического) эффекта разупрочнения горной породы при одновременном воздействии на нее НЧ и ВЧ импульсных магнитных полей.

Получена расчетная модель, позволяющая определить величину синергетического эффекта разупрочнения горной породы при воздействии на нее полей сложной пространственно-временной структуры с учетом магнитострикционных, электострикционных и пьезострикционных свойств минералов, входящих в состав породы. Все это позволяет формировать требования к проектированию технологических блоков (индукторов).

Теоретический анализ и экспериментальные исследования показали, что величина синергетического эффекта разупрочнения горной породы зависит не только от величины H и E магнитно-импульсных полей и свойств минералов, входящих в состав горной породы, но и от взаимной ориентации данных полей, причем предпочтительней случай сов-

падения по направлению полей $H_{НЧ}$, $H_{ВЧ}$ и $E_{НЧ}$, $E_{ВЧ}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гончаров С.А. Ананьев П.П., Иванов В.Ю.* Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей. – М.: Издательство МГГУ, 2006. – С. 11., с. 55.
2. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. – М. Наука, 1971. 1032 с.
3. *Евразийский* патент № 003853
4. *Гончаров С.А.* Термодинамика – М.: Издательство МГГУ, 2002. – С. 78. ГИАБ

Коротко об авторах

Гончаров С.А. – профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой «Физика горных пород и процессов»,
Ермаков С.В. – студент кафедры «Физика горных пород и процессов»,
Московский государственный горный университет.

Ананьев П.П. – кандидат технических наук, ген. директор НП «Научно-образовательный центр «Инновационные горные технологии».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2008».

ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВНИМИ			
ХЛУСОВ Александр Евгеньевич	Прогноз допустимого прогиба неоднородной слоистой кровли горной выработки закрепленной анкерами	25.00.20	к.т.н.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ			
БАСОВ	Совершенствование технологии форми-	25.00.15	к.т.н.

Андрей Александрович	рования ствола газовой скважины для повышения ее эксплуатационной надежности		