

УДК 622.236.9

В.Ю. Иванов

**ДИСЛОКАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ РАЗУПРОЧНЕНИЯ
НЕМАГНИТНЫХ РУД ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Семинар № 3

Проведенные многочисленные испытания показывают, что магнитно-импульсная обработка (МИО) немагнитных (кварцсодержащих) руд приводит к их разупрочнению [1]. Так, например, анализ результатов лабораторных и опытно-промышленных испытаний [1] показал, что при МИО руды (Каральвеевское месторождение, г. Билибино, Чукотский АО) имеет место прирост выхода готового класса и увеличение степени извлечения золота при цианировании. Прирост производительности мельницы по готовому классу (-0,1 мм) составил 52 %, повышение показателей извлечения при цианировании на 3-5 %.

В настоящее время актуальной проблемой, стоящей перед разработчиками оборудования для магнитно-импульсного разупрочнения руд на стадии рудоподготовки является проблема определения рациональных режимов обработки (таких как: напряженность поля, количество импульсов, частота поля). Экспериментальное определение оптимальных режимов требует проведения большого количества экспериментов, причем, если напряженность поля и количество импульсов подобрать экспериментально все-таки возможно, то эксперименты по подбору частоты поля чрезвычайно сложны (требуют создания специальных установок, позволяющих регулировать частоту).

Существует необходимость разработки методики выбора частотных режимов МИО в основу которой был бы положен обоснованный механизм разупрочнения немагнитных руд электромагнитной обработкой.

Известно, что при воздействии как постоянных электрического и магнитного полей, так и переменного электромагнитного поля на кристаллические вещества происходит движение заряженных дефектов кристаллической решетки. Поступательное движение заряженных дислокаций в электрическом поле наблюдали Швидковский Е.Г., Тяпунина Н.А., Белозерова Э.П., использовавшие метод избирательного травления [2]. В [3] впервые сообщалось о движении дислокаций, стимулированном слабым постоянным магнитным полем в ненагруженных кристаллах с парамагнитными примесями. В [4] исследовано влияние короткого (10^{-2} с) импульса магнитного поля на пластическое течение ионных кристаллов (NaCl, KCl).

Исторически теории заряженных дислокаций в кристалле предшествовали исследования зарядов на его поверхности [5]. Появление заряда у поверхности, обусловлено тем, что в тонком поверхностном слое, порядка нескольких межатомных расстояний, энергия взаимодействия ионов иная, чем в объеме кристалла. Вследствие этого, равновесная концентрация вакансий каждого сорта у поверхности

будет отличаться от концентрации в объеме твердого тела. Это приводит к образованию электрического заряда на поверхности. Расчет показывает [2], что вблизи поверхности кристалла образуется двойной электрический слой, причем заряд собственно поверхностного слоя компенсируется зарядом у поверхности. Таким образом, из теории следует, что заряд и потенциал поверхности кристаллов определяется не только объемными свойствами, но и свойствами поверхности.

Ионные кристаллы состоят из разнотипно заряженных ионов. Появление дефектов в таком кристалле (точечные дефекты, дислокации, границы блоков и т.д.) нарушает зарядовое равновесие, поэтому дефекты, в том числе и дислокации, приобретают электрический заряд [2]. В ряде теоретических исследований модель дислокации рассматривается в виде заряженной нити. Дислокация рассматривается как бесконечная заряженная нить, окруженная непрерывно распределенным зарядовым облаком. Компенсирующее зарядовое облако состоит из подвижных катионных и анионных вакансий и атомов двухвалентных примесей [2].

Дислокация представляет собой одномерный протяженный гибкий объект, движение которого имеет значительно более сложный характер, чем движение материальных точек или жестких тел. Практически наиболее подходящей и удобной представляется модель дислокации, рассматриваемая как нить или струна, находящаяся в спутанном состоянии внутри кристалла и обладающая собственной массой и упругостью. Величина напряжений движущейся дислокации отличается от величины напряжений неподвижной дислокации тем, что она сокращается в направлении

движения. Этот процесс можно описать, используя преобразования Лоренца для уравнения движения упругого тела. Физическая природа такого сокращения связана с возрастанием энергии при движении дислокации. Поэтому массу дислокации (m) следует считать инерциальной и определить ее можно по формуле [6]:

$$m = \rho \cdot l \cdot b^2, \text{ кг}, \quad (1)$$

где ρ - плотность кристалла, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; l - длина дислокации, м ; b - вектор Бюргерса, м .

Упрощенная модель динамической системы заряженной дислокации во внешнем электромагнитном поле рассмотрена в [7] и может быть описана системой уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = -k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot x_2 \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = -k_2 \cdot (x_2 - x_1) + F_s \end{cases}, \quad (2)$$

где m_1 - масса дислокации, x_1 - перемещение дислокации, k_1 - жесткость закрепления дислокации в кристалле, x_2 - перемещение зарядового облака, k_2 - жесткость системы «дислокация - зарядовое облако», m_2 - масса заряда, F_s - сила, обусловленная действием электрической составляющей электромагнитного поля (сила Кулона).

Аналогичную систему можно написать для действия силы Лоренца.

Решая систему уравнений (2) можно определить зависимости механических напряжений, возникающих под действием электрической и магнитной составляющей поля.

Зависимости имеют следующий вид:

$$\sigma_s = A(q, H_0, R, \omega_{02}, b) \cdot f\left(\frac{\omega}{\omega_{02}}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_m = B(q, H_0, R, \omega_{02}, \rho, l, b) \cdot \varphi \left(\frac{\omega}{\omega_{02}} \right) \quad (4)$$

где σ_s - напряжения, возникающие под действием электрической составляющей поля, Па; σ_m - напряжения, возникающие под действием магнитной составляющей поля, Па; q - заряд дислокации, К; H_0 - амплитуда напряженности магнитной составляющей поля, А/м; R - радиус индуктора, создающего электромагнитное поле, м; ω_{02} - собственная частота системы, определяемая жесткостью связи зарядового облака и дислокации, Гц; ω - частота электромагнитного поля, Гц.

Графический вид зависимостей приведен на рис. 1 и 2.

На основе анализа приведенных выше зависимостей можно отметить следующее: при воздействии электромагнитного поля, возникающие в микрореалье механические напряжения зависят от его частоты, при этом, зависимость напряжений вызванных силой Кулона имеет один максимум при совпадении частоты поля с собственной частотой колебаний дислокации, а зависимость напряжений вызванных силой Лоренца имеет два максимума при частоте равной 1 и 0,5 собственной частоты колебаний дефекта.

Собственную частоту системы (ω_{02}) можно определить экспериментально через регистрацию сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) при разрушении горных пород, например [8], [9] посвящены регистрации ЭМИ, сопровождающих разрушение горных пород, как образцов, так и массивов. Авторы [9] приводят результаты и анализ экспериментов, проведенных на образцах мрамора и

диабазы, которые говорят о наличии четырех стадий при нагружении образцов: I – стационарная стадия, II – нелинейная стадия, III – стадия предразрушения образца, IV – стадия нарушения образца. Так, на стадии предразрушения образца выявлены квазирезонансные периодические автоколебания.

Для анализа сигналов ЭМИ авторами [9] строились их нормированные спектрально-временные характеристики. Установлено, что на начальных этапах нагружения в спектре сигнала ЭМИ его высокочастотная компонента присутствует вплоть до частоты 125 кГц, которая по мере нагружения образца до уровня $0,6\sigma$ (где σ - предельные напряжения) снижается и регистрируется на частотах порядка 30 кГц. При дальнейшем увеличении уровня нагружения до $0,95\sigma$ в образце происходит смещение спектра излучаемых электромагнитных сигналов в область более высоких частот вплоть до 250 кГц. После этого образец разделяется на фрагменты и перестает существовать как единое целое. Таким образом, на основании анализа спектрально-временной характеристики сигналов ЭМИ установлено, что по мере увеличения нагружения на них, спектральные характеристики ЭМИ-эмиссионных сигналов последовательно смешаются в низкочастотную, а перед нарушением их сплошности – в высокочастотную часть спектра, а сам процесс разрушения в спектрально-временных образах сигналов ЭМИ может быть описан в виде трехстадийной S-образной характеристики.

В [10] рассмотрена задача об электромагнитной эмиссии сегмента краевой дислокации, движущейся в ионной решетке со структурой типа NaCl. Найдена мощность излучаемого электромагнитного сигнала (при плотности

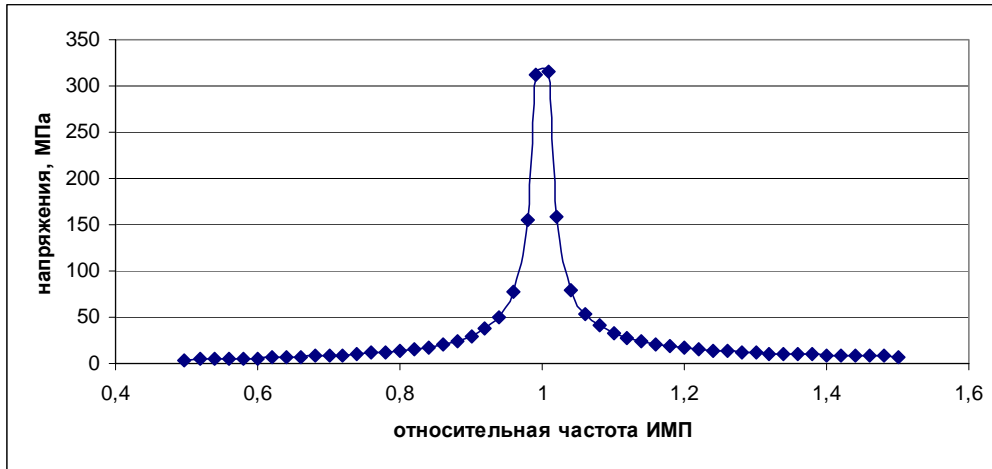


Рис. 1. Зависимость механических напряжений (σ_e), вызываемых электрической составляющей поля от отношения частоты электромагнитного поля (ω) к собственной частоте материала (ω_{02}), обусловленной жесткостью связи зарядового облака и дислокации в области резонансных частот

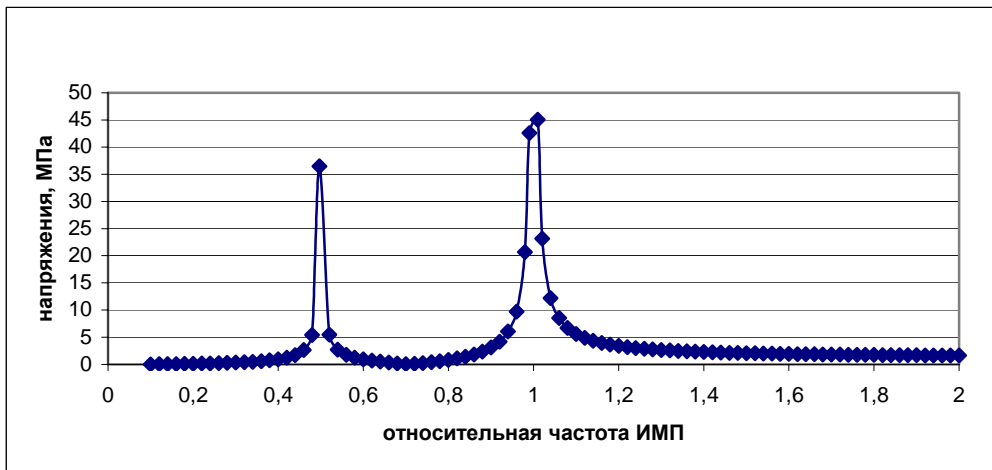


Рис. 2. Зависимость механических напряжений (σ_m), вызываемых магнитной составляющей поля от отношения частоты электромагнитного поля (ω) к собственной частоте материала (ω_{02}), обусловленной жесткостью связи зарядового облака и дислокации в области резонансных частот

дислокации в кристалле 10^8 см^{-2} в образце объемом 1 см^3 содержится $\sim 10^{12}$ дислокационных сегментов полная напряженность поля излучения сегментов равна $\sim 10 \text{ мкВ/м}$, что

вполне доступно для регистрации с помощью аппаратуры стандартного среднего класса).

Обоснованная авторами [10] возможность регистрации электромаг-

нитной эмиссии движущейся краевой дислокации и разработанная авторами [8] методика и оборудование измерения частотных спектров ЭМИ создают основания для создания ал-

горитма выбора частот МИО с использованием методики и оборудования [8] с целью наибольшего разрушения руд магнитно-импульсной обработкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Дашко С.А., Мартынов Ю.А., Осташевский А.А. Использование электромагнитной обработки золотосодержащих руд на этапе измельчения и цианирования. Горный информационно-аналитический бюллетень, №7, 2004, с. 5-7.
2. Тяпунина Н.А., Белозерова Э.П. «Заряженные дислокации и свойства щелочногалогенидных кристаллов». Успехи физических наук. Декабрь 1988 Том 156, выпуск 4.
3. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А. ФТТ 29, 2, 467 (1987).
4. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е. Термодинамические и кинетические аспекты разрушения кристаллов импульсным магнитным полем. Физика твердого тела, 1997, том 39, № 11.
5. Лифшиц И.М., Гегузин Я.Е. ФТТ. 1965. Т.7. С.62.
6. Судзуки Т., Ёсинага Х., Такеути С. «Динамика дислокаций и пластичность». – М.: Мир, 1989 – С. 18-19, 155.
7. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Иванов В.Ю. Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. – 91 с: ил.
8. Курленя М.В., Кулаков Г.И., Опарин В.М., Жигалкин В.М., Яковицкая Г.Е. Методика исследования электромагнитного излучения при разрушении образцов горных пород. – Новосибирск: Изд. ИГД СО РАН. – 1989. – 24 с.
9. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. О структуре сигналов электромагнитного излучения и связанных с ними актов разрушения горных пород. ФТПРПИ. – 2000. – № 1. – С. 3–11.
10. Чаркина О.В., Чишко К.А. «Электромагнитное излучение подвижных дислокационных сегментов в ионном кристалле» Физика твердого тела, 2001, том 43, № 10.

ГИАБ

Коротко об авторе

Иванов В.Ю. – аспирант, кафедра ФГПИП, Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. С.А. Гончаров.

