© Ф.Ф. Борисков, 2007

УДК 622.73

Ф.Ф. Борисков

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ШАРОВОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА РУДОПОДГОТОВКУ И ПОВЫШЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОСТИ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛОВ

Семинар № 24

Применение магнетизма в горно-обогатительной промышленности постоянно расширяется в связи с разработкой новых методов магнитной сепарации руд и созданием новых модификаций магнитных сепараторов и постоянных магнитов с высокой напряженностью магнитного поля. На основе магнитоиндукционного эффекта производится извлечение магнетита из смеси его с немагнитными минералами с объемом переработки более 180 млн т сырой руды в год только в России.

Развиваются исследования влияния магнитострикции (изменение размеров и формы кристалла при намагничивании) на минеральное сырье.

Снижение прочности магнетитсодержащего сырья под воздействием магнито-импульсной обработки (МИО) изучено в [1, 2]. Образцы базальта (цилиндры высотой 25, диаметром 50 мм и кубики с ребром 30 мм), содержащего титаномагнетит и парамагнитные минералы (авгит, полевой шпат, хлорит), обрабатывались импульсами однородного магнитного поля напряженностью $2\text{-}10^5$ А/м. длительностью — $1{,}2\text{-}10^{-3}$ с в течение 12—14 с. Измерения свойств базальта, проведенные спустя 24 часа после МИО показали, что его прочность на растяжение σ_p снизилась с 15,50 до 12,95 МПа, на сжатие σ_c с 261,30 до 219,1 МПа, т.е. на 14,65 и 16,16 % [1]. МИО кварцево-магнетитовой руды приводит к развитию σ_c в зернах магнетита и кварца соответственно до 61,7 и 14,9 МПа, сдвиговых напряжений τ до 43,77 и 17,41 МПа (к сожалению, в работе не приведены параметры МИО). Максимальное влияние на разупрочнение руды оказывает τ в зернах магнетита на границах срастания его с зернами кварца. Величина τ в этих зонах достигает 58,5 % от предела прочности на сдвиг. После МИО извлечение магнетита из руды повысилось с 77,65 до 79,62 %, содержание железа в концентрате — с 62,0 до 62,6 % [2].

В ИГД УрО РАН разрабатывается новое направление использования магнетизма в процессах дезинтеграции сырья, состоящее в использовании магнитных импульсов для подъема шаров на оптимальную высоту и увеличения силы удара при падении их на сырье. Импульсная магнито-механическая мельница, предназначенная для реализации этих эффектов, состоит из барабана, электропривода, двух плоских электромагнитов M_1 и M_2, двух щеток и двух кольцевых коллекторов, через которые подаются импульсы электрического тока в обмотки M_1 и M_2 [3]. M_1 и M_2 под немагнитной футеровкой прикрепляются к барабану мельницы в диаметрально

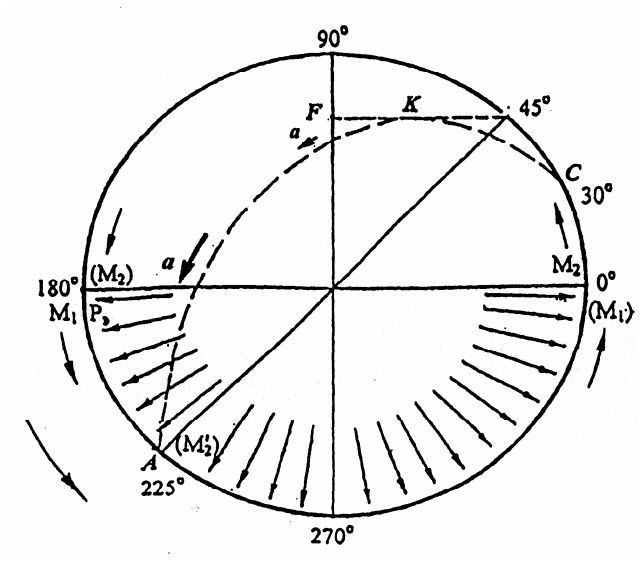

Рис. 1. Подъем до 0° и ускорение шаров (а—> а ...) импульсами магнитного поля, создаваемые попеременно электромагнитами M_1 и M_2 при движении их совместно с барабаном магнитомеханической мельницы от 180° до 0° (зона действия импульсов показана радиальными стрелками)

противоположных точках и вращаются вместе с ним (рис. 1). В простейшем — 1-м варианте мельницы ликвидация «мертвой зоны» шаров и подъем их на оптимальную высоту может осуществляться работой только одного электромагнита, например, M_1. M_1 создает импульс магнитной индукции B с длительностью t_i, равной времени перемещения M_1 от точки A с угловой координатой 225° до 0°. Шары притягиваются к полюсу $P_э$ электромагнита M_1 и поднимаются до точки 0°, где M_1 отключается от источника тока. От 0° до 30° шары движутся по инерции, вылетают в полость барабана, достигают оптимальной высоты KF, и падают вниз с ускорением g. Дополнительное ускорение a_2 шары приобретают при работе одного из двух электромагнитов M_1 и M_2, которыми попеременно создаются магнитные импульсы тогда, когда каждый их них движется от точки 180° до 0° (на рис. 1

зона действия одного магнитного импульса показана стрелками).

Импульсная магнитомеханическая мельница работает следующим образом. Шары и руда загружаются в ее барабан. В точке 180° в обмотку M_1 подается ток длительностью $t_и$, формирующий импульс магнитной индукции B и полюса $P_э$ с $t_и$ в сердечнике M_1.

К движущемуся полюсу $P_э$ притягиваются шары, которые захватывают часть руды. Флоккула шаров электромагнитом M_1 и вращением барабана поднимается до 0°. В точке 0°, где M1 обозначен как (M_1), обмотка отключается от тока. Шары теряют связь с (M_1), преодолевают расстояние до уровня KF по инерции (как при работе одного электромагнита), а затем по кривой CKA устремляется в точку A. За время движения M_1 по нижней полуокружности от 180° до 0° электромагнит M_2 из точки 0 через 30, 45 и 90° смещается в противоположную точку 180°, где он обозначен как (M_2). В (M_2) наводится магнитное поле, в котором ферромагнитные шары разгоняются с ростом ускорения от a_1, когда они находятся вверху далеко от $P_э$, до a_2 и больше (a_3) во время движения $P_э$ от 180 до 225°. Дополнительное ускорение a_3, которое суммируется с g земного тяготения, приводит к значительному увеличению скорости шаров и кинетической энергии при их ударе по сырью. Производительность измельче-

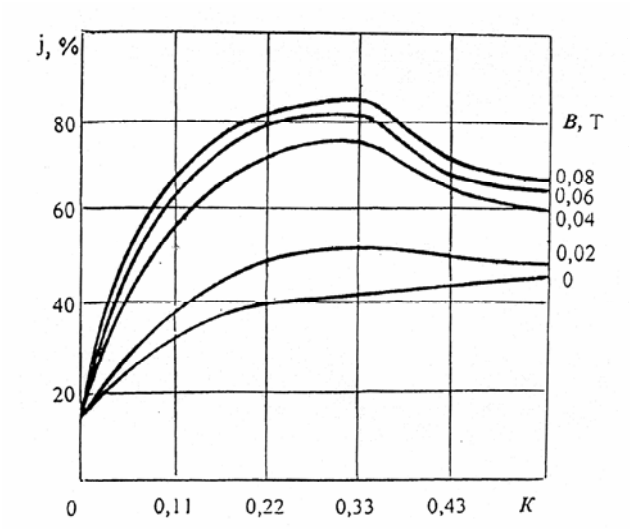

Рис. 2. Графики зависимости выхода j класса крупностью — 74 мкм от магнитной индукции B электромагнитов и коэффициента заполнения шарами K барабана импульсной магнитомеханической мельницы при измельчении колчеданной руды

ния возрастет, если в момент падения шаров полюс $P_э$ электромагнита (M_2), подключенного к электрической сети, переместится в точку $A\left(M_2'\right)$. Это условие выполняется при равенстве времени t_1 падения шаров по кривой *СКА* и времени t_2, за которое $P_э$ одного из электромагнитов, например, (M_2) перемещается от 180 до 225°.

Из рис. 1 находим:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2H}{g}}, \quad H = \frac{D}{\sqrt{2}}, \quad t_1 = \sqrt{\frac{2D}{g\sqrt{2}}},$$

где H — высота падения шаров, м, D — диаметр барабана мельницы, м.

$$t_2 = M_1A/V_л, \quad M_1A = \pi D/8, \quad V_л = \pi Dn/60,$$

$$t_2 = \pi D/8 : \pi Dn/60 = 7{,}5/n,$$

где $V_л$ — линейная скорость барабана, м/мин; n — число оборотов барабана в мин.

Приравнивая t_1 и t_2 получаем:

$$\sqrt{\frac{2D}{g\sqrt{2}}} = 7{,}5/n,$$

и находим кинематическую характеристику разрабатываемой мельницы:

$$n = 19{,}76/\sqrt{D}.$$

Величина ускорения шаров зависит от значения импульсов магнитной индукции, которая создается попеременно электромагнитами M_1 и M_2 и которая возрастает с увеличением силы электрического тока, подаваемого в их обмотки. Увеличение кинетической энергии шаров магнитным полем при падении их на руду приводит к повышению эффективности дезинтеграции за счет повышения силы удара шаров по сырью.

Физическое моделирование измельчения медно-цинковой руды импульсным магнитомеханическим методом проводилось в лабораторной мельнице. Импульсы *B* в электромагнитах изменялись от 0 до 0,08 Т (Тесла), коэффициент заполнения барабана мельницы шарами *K* — от 0,22 до 0,54. При *B* = 0 выход j класса крупностью — 74 мкм зависит только от *K* и изменяется от 40 % (*K* = 0,22) до 47 % (*K* = 0,54 %). С повышением *B* от 0 до 0,08 Т j возрастает от 40 (*K* = 0,22) — 47 % (*K* = 0,54) до 68,0 (*K* = 0,54) — 87 % (*K* = 0,33). Наибольшим приростом j с 42 до 87 % характеризуется импульсное магнитомеханическое измельчение с *K* = 0,33 при *B* = 0,08 Т (рис. 2 и 3).

Основные преимущества механики разрабатываемого метода измельчения, которые приводят к росту производи-

Магнитная индукция (*B*), Т	Класс крупности, мкм	Выход рудных минералов, %					
		Халькопирит		Сфалерит		Пирит	
		Свободные зерна	Сростки	Свободные зерна	Сростки	Свободные зерна	Сростки
0	+125	0	100	0	100	50	50
	–125+74	81	19	43	57	90	10
	–74	95	5	87	13	98	2
0,04	+125	0	100	0	100	64	36
	–125+74	89	11	80	20	96	4
	–74	97	3	97	3	100	0

тельности шарового измельчения, сводятся к следующему:

1. Ликвидируется «мертвая зона» шаров импульсами *B*;

2. Оптимизируется процесс измельчения путем управления кинетической энергией шаров в широких пределах вариацией *B* при изменении, например, типа сырья.

Расчет удельных затрат электроэнергии E_v на измельчение руды импульсным магнитомеханическим методом проведен применительно к мельнице МШР-3200×3100 [3]. При объеме мельницы = 22,5 м , объемном весе шаров = 4,6 т/м^3 и *K* = 0,33, обеспечивающем максимальный прирост *j* , вес шаровой загрузки составит 34 т. Электромагнит поднимает шары при *B*=0,747 Т и толщине немагнитной футеровки, равной 4 см. Ликвидация «мертвой зоны» шаров и увеличение силы удара по сырью обеспечат снижение E_v на 25 %.

Влияние шарового измельчения импульсным магнитомеханическим методом на качество рудоподготовки было изучено в лабораторных условиях на примере колчеданной медно-цинковой руды Карабашского месторождения с массовой долей меди 1,0, цинка 1,4, серы 28 % и крупностью частиц — 3 мм. Измельчение руды проводили традиционным методом (*B* = 0) и с использованием импульсов с *B*= 0,04 Т. Измельченный продукт был разделен на классы с крупностью частиц +125, –125+74 и –74 мкм (табл. 1).

Минералогический анализ показал, что руда, измельченная в обычных условиях (*B*=0), содержит 50 % свободных зерен пирита в классе +125 мкм. Пирит представлен наиболее крупной вкрапленностью в руде (размер зерен до 2 мм), и поэтому он хорошо раскрывается в этом классе. Свободные зерна халькопирита и сфалерита отсутствуют в этом продукте (+125 мкм), так как их выделения в руде меньше, чем у пирита.

Измельчение при импульсах *B* = 0,04 Т приводит к увеличению выхода свободных зерен пирита в классах +125, –125+74 и –74 мкм соответственно с 50; 90 и 98 до 64; 96 и 100 %.

Наибольший прирост выхода Д свободных зерен наблюдается у сфалерита (Δ = 37 %), халькопирита (Δ =8 %) и пирита (Δ = 6 %) в классе –25+74 мкм. В классе –74 мкм содержание свободных зерен сфалерита, халькопирита и пирита повышается соответственно на 5, 4 и 2 % с раскрытием сфалерита и халькопирита до 97, пирита — до 100 %.

Увеличение количества свободных зерен рудных минералов в продуктах

импульсного магнитомеханического измельчения достигается повышением вероятности разрушения сростков по межзерновым поверхностям, а не переизмельчением сырья, которым сопровождаются традиционные способы рудоподготовки. Таким образом, применение импульсного магнитомеханического измельчения обеспечивает:

1. Рост производительности и снижение энергозатрат на процесс рудоподготовки;

2. Повышение селективности раскрытия минералов.

Влияние импульсного магнитомеханического измельчения на последующее обогащение колчеданной руды проводили в лабораторной мельнице при значениях *B* от 0 до 0,08 Т. Обогащение проводилось по схеме: коллективная и медно-цинковая флотация. В процессе проведения 1-й операции сырье разделяли на коллективный сульфидный концентрат и хвосты, состоящие из минералов вмещающих пород. В результате 2-й операции получали медно-цинковый концентрат пенным продуктом, пиритный — камерным. Опыты показывают, что измельчение руды разрабатываемым методом существенно повышает технологические показатели флотации руды (рис. 4). С повышением импульсов *B* растет качество концентратов и извлечение в них ценных компонентов. Наиболее высокие показатели получены при *B* = 0,08 Т. В коллективном медно-цинковом концентрате содержание меди увеличилось с 5,50 до 7,79 %; цинка с 7,31 до 11,12 %, извлечение металлов соответственно на 4,94 и 12,96 %, серы — на 26,03 % при сохранении качества пиритного концентрата на первосортном уровне (47,06—48,03 %). Сопоставление данных минералогического анализа с результатами флотации подтверждает предположение о том, что рост показателей обогащения обусловлен повышением селективности раскрытия минералов (таблица). Уменьшение количества сростков халькопирита и сфалерита с пиритом, которое достигается импульсной магнитомеханической рудоподготовкой, положительно влияет на процесс разделения минералов при флотации и обеспечивает прирост извлечения меди и цинка в коллективный медно-цинковый концентрат, серы — в пиритный.

Исследование импульсного магнитомеханического измельчения проводилось на руде, не содержащей магнетита ($\chi_1 \approx 0,73 \cdot 10^{-2}$ м^3/кг) — природного ферромагнетика. Руда состоит из слабомагнитного халькопирита ($\chi_2 \approx 2,68 \cdot 10^{-6}$ м^3/кг) с содержанием 3 % и немагнитных минералов (пирит, сфалерит, кварц, серицит, хлорит) в количестве 97 % с $\chi_3 \approx 5 \cdot 10^{-8}$ м^3/кг.

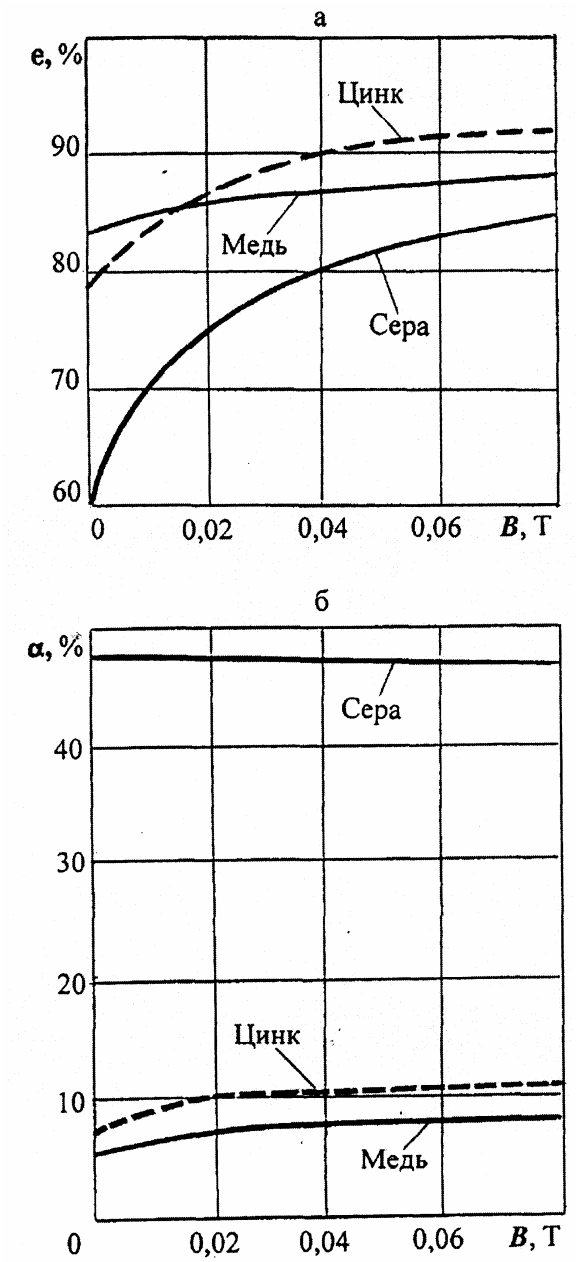

Рис. 4. Влияние магнитной индукции B в электромагнитах на флотационное извлечение e (а) и содержание α меди, цинка и серы в медно-цинковом и пиритном концентратах (б) при измельчении колчеданной руды в импульсной магнитомеханической мельнице

Удельная магнитная сила $F_м$, действующая на единицу массы минерала равна

$$F_м = \mu_0 \chi H_м \mathrm{grad} H_м, \quad (1)$$

где μ_0 — агнитная постоянная, χ — удельная магнитная восприимчивость, $H_м$ — напряженность магнитного поля.

Ферро-ферри-пара- и диамагнитные вещества взаимодействуют с $H_м$ по разному. Величина интенсивности взаимодействия $H_м$ с выделенными при обогащении сырья ферромагнитными, слабомагнитными и немагнитными типами минералов определяется с использованием зависимости (1) в соответствии со следующим соотношением:

$$\mu_0 \chi_1 H_м \mathrm{grad} H_м / \mu_0 \chi_1 H_м \mathrm{grad} H_м : \mu_0 \chi_2 H_м \mathrm{grad} H_м / \mu_0 \chi_1 H_м \mathrm{grad} H_м : \mu_0 \chi_2 H_м \mathrm{grad} H_м / \mu_0 \chi_1 H_м \mathrm{grad} H_м = \chi_1 / \chi_1 : \chi_2 / \chi_1 : \chi_3 / \chi_1, \quad (2)$$

Подставив средние значения χ магнетита, халькопирита и немагнитных минералов в (2), находим, что интенсивности ферромагнитного, слабомагнитного и немагнитного взаимодействия характеризуются отношением ~ 1 : $3{,}67 \cdot 10^{-4}$: $6{,}41 \cdot 10^{-6}$ по аналогии с сильными, электромагнитными, слабыми и гравитационными фундаментальными взаимодействиями с количественной ха-

рактеристикой их соответственно ~ 1 : 10^{-2}: 10^{-10}: 10^{-38}.

С применением данных [1] и [2] можно вычислить влияние магнитной составляющей на разупрочнение и селективность раскрытия минералов колчеданной руды Карабашского месторождения при измельчении ее магнитомеханическим методом.

При ферромагнитном взаимодействии магнетита с МИО снижение прочности базальта на растяжение составило 14,65 %, на сжатие — 16,16 % [1]. Вклад слабомагнитного взаимодействия на снижение прочности руды достигает соответственно на растяжение 0,0054 % (14,65 % · $3{,}67 \cdot 10^{-4}$), на сжатие — 0,0059 % (16,16 % · $3{,}67 \cdot 10^{-4}$), немагнитного — 0,000094 % (14,65 % · $6{,}41 \cdot 10^{-6}$) и 0,0001 % (16,16 % · $6{,}41 \cdot 10^{-6}$).

МИО кварцево-магнетитовой руды развивает в ней напряжения на сдвиг τ до 58,5 % от $\tau_{пп}$ (предел прочности) за счет ферромагнитного взаимодействия магнетита с импульсами $H_м$ [2]. Влияние слабомагнитного взаимодействия на снижение прочности колчеданной руды за счет τ составит 0,0314 % (58,5 % · $3{,}67 \cdot 10^{4}$), немагнитного — 0,000375 % (58,5 % · $6{,}41 \cdot 10^{-6}$) от $\tau_{пп}$ руды.

Рост селективности раскрытия магнетита, обусловленный МИО, можно выразить через повышение извлечения железа в концентрат на 1,97 % (с 77,65 до 79,62 %) [2]. Это позволяет определить также вклад слабомагнитного и немагнитного взаимодействия на селективность раскрытия минералов Карабашской колчеданной руды, равной соответственно $7{,}23 \cdot 10^{-4}$ % (1,97 % · $3{,}67 \cdot 10^{-4}$) и $1{,}26 \cdot 10^{-5}$ % (1,97 % · $6{,}41 \cdot 10^{-6}$).

Анализ полученных результатов показывает, что повышение технико-экономических показателей достигнуто оптимизацией кинематики и динамики измельчения с помощью магнитных импульсов. Вклад слабомагнитного и немагнитного взаимодействия колчеданной руды и попутно осуществляемой МИО на процессы разупрочнения и селективности раскрытия минералов очень мал (< 0,0314 %), Поэтому импульсный магнитомеханический метод имеет общее значение и может использоваться для шарового измельчения сырья любой крепости за счет реализации ударного механизма его дезинтеграции.

Применение разрабатываемого метода для рудоподготовки крепких руд, содержащих ферромагнетики (магнетит, пирротин), позволит включить в процессы разупрочнения и селективного раскрытия минералов этого сырья эффект магнитострикции, генерирующий σ_c, σ_p и τ, с максимальной величиной, развивающейся внутри минеральных комплексов по межзерновым границам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zum Einflus teines magnetischen Pulsfeldes auf die Festigkeitskennwerte von standardisiereten Prüfkörpen / Spaček Frantisek, Dočkal Milan, Göll Gerd und And. // «Neue Bergbautechn.», 13 № 9, 521—523, ISSN 047-9403 DD (нем.)

2. *Гончаров С.А, Бруев В.П.* Разупрочнение пород, содержащих минералы ферромагнетики // Горный информац.-аналит. бюлл. — 2004. — № 8. — С. 325—340.

3. *Борисков Ф.Ф., Алексеев В.Д.* Импульсные и автогенные методы переработки сырья. — Екатеринбург: УрО РАН. — 2005. — 150 с.

ГИАБ

Коротко об авторах

Борисков Ф.Ф. – Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 24 симпозиума «Неделя горняка-2006». Рецензент, д-р техн. наук, проф.*В.М. Авдохин.*

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
МАСЛОВ Валентин Владимирович	Совершенствование технологии приготовления, разработка и выбор компонентов буровых промывочных жидкостей для строительства нефтяных и газовых скважин	25.00.15	к.т.н.
СТЕПАНОВ Виталий Николаевич	Разработка и исследование технологий ликвидации поглощений буровых растворов	25.00.15	к.т.н.