

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ БЕДНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Афанасьев А. И.<sup>1</sup>, Паньков С. А.<sup>1</sup>, Потапов В. Я.<sup>1</sup>, Фефелов М. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия (620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), e-mail: [ser\\_pankov@list.ru](mailto:ser_pankov@list.ru)

Отработка богатых месторождений сульфидных руд и вовлечение в переработку более бедных руд, привело к увеличению удельных затрат на получение концентратов. В работе рассматривается процесс предварительного обогащения забалансовых сульфидных руд. На базе экспериментальных исследований показано, что электрообработка бедных сульфидных руд позволяет существенно сократить объемы переработки, снизить энергоемкость дробления, повысить концентрацию полезного ископаемого. Установлена зависимость удельной энергии разрушения от энергии единичного удара. Обоснован критерий оценки эффективности работы ударного механизма, равный отношению удельной энергии разрушения к степени дробления. Установлено, что относительная энергия разрушения кусков сульфидных руд уменьшается с увеличением их размера и энергии единичного удара. Относительно большая величина корреляционного отношения свидетельствует о наличии значимой связи данных параметров. Показано, что электрообработка руд приводит к увеличению мелких и уменьшению крупных классов при ударном дроблении и, соответственно, повышению степени вскрытия сульфидных включений.

Ключевые слова: Электропроводность; электрическое разупрочнение руд; ударное разрушение; сульфидная руда; бедная руда; дробление.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF IMPACT FRACTURE OF POOR SULPHIDE ORE

Afanasyev A.I.<sup>1</sup>, Pankov S.A.<sup>1</sup>, Potapov V.Y.<sup>1</sup>, Fefelov M.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural state Mining University, Yekaterinburg, Russia (620144, Yekaterinburg, street Kuibyshev, 30), e-mail: [ser\\_pankov@list.ru](mailto:ser_pankov@list.ru)

Mining of rich deposits of sulphide ores and involvement in the processing of poorer ores, resulting in increased unit costs of production of concentrates. The process of pre-concentration of the off-balance sulphide ore-processing is viewed in the paper. It is stated on the basis of experimental studies that poor electric treatment of sulphide ores can significantly reduce the amount of processing, to reduce energy destruction, increase the concentration of the mineral content. The fact of the dependency of the specific fracture energy on the energy of a single impact is stated. A criterion of estimating of the effectiveness of the impact mechanism is justified; it is equal to the ratio of the specific fracture energy to the degree of the crushing. It was found that the relative energy of destruction pieces of sulfide ores decreases while increasing size and energy of a single blow. The relatively large value of correlation ratio indicates a significant link between these parameters. It is shown that the electro processing of ores increases and small reduction major classes under impact crushing and accordingly increase the degree of opening of sulfide inclusions.

Keywords: Conductivity; electrical loss of strength ores; impact fracture; sulphide ore; poor ore; crushing.

В настоящее время отработка богатых месторождений сульфидных руд и вовлечение в переработку более бедных руд, привело к увеличению удельных затрат на получение концентратов. Это справедливо для большинства полезных ископаемых.

Улучшение экономических показателей горно-обогачительного производства неразрывно связано с разработкой и совершенствованием оборудования для подготовки горной массы к непосредственному обогащению. Фактически подготовка горной массы является предварительным обогащением. Оно может быть реализовано различными

методами. В ряде случаев возможна комбинированная технология предварительного разделения, включающая несколько различных процессов и аппаратов.

Бедные сульфидные руды Южного Урала содержат значительное количество практически полностью пустой породы. Поэтому, в первую очередь, эту породу необходимо удалить в хвосты.

Одним из признаков, по которым можно разделять данную руду, является электропроводность. Сульфидные включения имеют удельное сопротивление  $10^{-3}$  Ом·м, а пустая порода на несколько порядков больше. Как отмечает В. В. Ржевский [5], электрическое сопротивление горной породы существенно зависит от содержания в ней токопроводящих включений. В медно-цинковых сульфидных рудах токопроводящими включениями являются сульфиды и пириты. Их электрические и теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность, коэффициенты объемного расширения) существенно отличаются от соответствующих характеристик вмещающих пустых пород. Поэтому при пропускании тока через кусок бедной руды возможен нагрев и расширение отдельных токопроводящих включений, что может вызвать напряжения растяжения, которые превысят предел прочности пустой породы.

Нами были проведены эксперименты с некондиционной медно-цинковой рудой Молодежного месторождения, расположенного на Южном Урале. Состав руды Молодежного месторождения характерен для аналогичных руд других месторождений Южного и Среднего Урала.

На рис. 1 показаны куски сульфидной руды после пропускания через них тока. Такие разрушения систематически наблюдались при наличии в куске прослойки сульфидов.



Рис. 1. Разрушенные куски сульфидной руды

размеру) в течение 0,3...0,5с. Средний размер (диаметр) куска определялся перед электрообработкой и после неё. Каждый кусок перед и после дробления взвешивался. Дробление осуществлялось ударом. В качестве ударника использовался разработанный и

На рис. 1 отчетливо виден след от электрической дуги – оплавленное пятно. Разрушение произошло по сульфидной прослойке толщиной 0,5мм.

Электрической обработке подвергались куски забалансовой руды крупностью -60 +20мм со средним содержанием меди 0,5...0,7%, цинка -0,5...1,1%, серы – 12...18%.. Ток через кусок пропускался в двух направлениях (по максимальному и среднему

созданный в УГГУ импульсный магнитно-индукционный механизм [2] с конденсаторным накопителем энергии. Величина энергии удара устанавливалась в зависимости от максимального размера куска.

В таблице 1 приведены характеристики руды и процесса её разрушения. Степень дробления ( $i$ ) определялась по известной формуле [6]:

$$i = d_1 / d_2 , \quad (1)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно средневзвешенный размер куска до и после дробления, мм.

Таблица 1

**Параметры процесса разрушения бедной медно-цинковой руды**

№	Средневзвешенный размер кусков до дробления, $d_i$ , мм	Степень дробления, $i$	Энергия удара, $E_y$ , Дж	Удельная энергия разрушения, $E_y / m$ , кДж/кг	Относительная энергия разрушения, $E_{op}$ , кДж/кг
1	28	2,16	60	1,33	0,62
2	33	3,75	75	1,67	0,45
3	41	3,6	104	1,40	0,39
4	49	3,8	139	1,10	0,29
5	56	3,1	184	0,775	0,25
6	80	1,87	240	0,48	0,255

Относительная энергия разрушения сульфидов определялась по формуле

$$E_{op} = E_y / (i \cdot m) , \quad (2)$$

где  $m$  – масса куска руды, кг.

Общепринято определять эффективность процесса дробления по степени и энергоёмкости дробления [1]. Однако, данные таблицы показывают, что характеризовать эффективность процесса разрушения по одному показателю (отношении энергии разрушения к массе куска или степени дробления) не вполне адекватно. В четвертой строке таблицы степень дробления, больше чем в первой, второй и третьей, а удельная энергия разрушения меньше. В четвертой строке степень дробления в 1,22 раза больше, чем в пятой, а удельная энергия разрушения больше в 1,42 раза. Во второй строке степень дробления в 1,74 раза больше, чем в первой, а удельная энергия разрушения больше в 1,26 раза. Обычно, чем больше степень дробления, тем больше удельные затраты энергии. Поэтому, по нашему мнению, эффективность процесса дробления целесообразно оценивать отношением удельной энергии разрушения к степени дробления, т.е. относительной энергии разрушения. Чем меньше относительная энергия разрушения, тем совершеннее в конструктивном исполнении машина и эффективнее процесс.

На рис. 2 приведена зависимость относительной энергии разрушения от энергии удара.

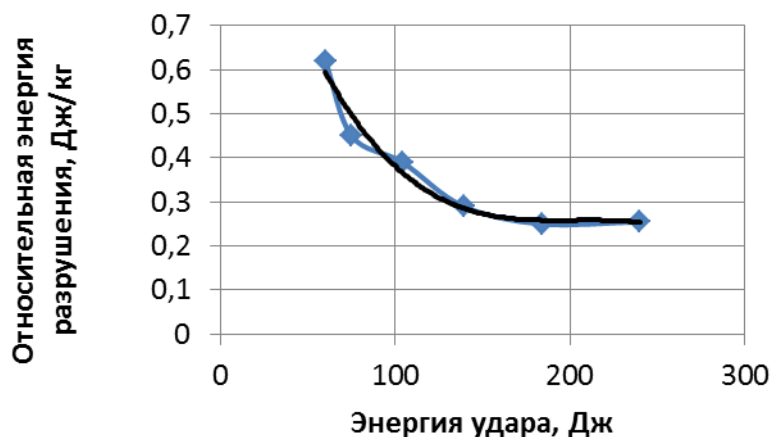


Рис. 2. Зависимость относительной энергии разрушения от энергии единичного удара

После статистической обработки результатов эксперимента получено уравнение регрессии, связывающее относительную энергию разрушения с энергией единичного удара

$$E_{op} = -1E-07 E_y^3 + 7E-05 E_y^2 - 0,0146 E_y + 1,234, \quad (3)$$

где  $E_y$  – энергия удара, Дж;

$E_{op}$  – относительная энергия разрушения, кДж/кг.

Корреляционное отношение равно  $R^2 = 0,967$  [3]. Относительно большая величина корреляционного отношения свидетельствует о наличии взаимосвязи энергии единичного удара и относительной энергии разрушения. Регрессионное уравнение адекватно отражает реальный процесс при изменении энергии удара от 50 до 200 Дж.

На рис.3. приведено регрессионное уравнение – зависимость энергии удара от средневзвешенного диаметра куска.

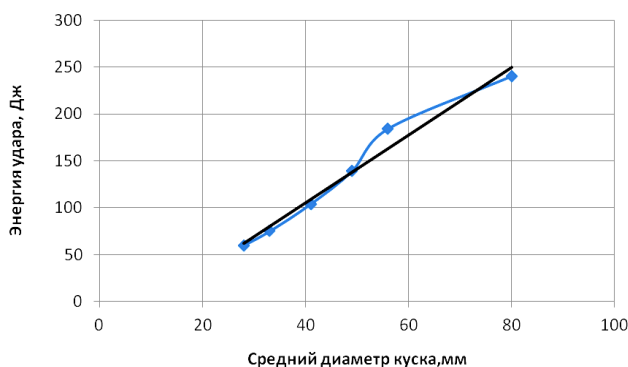


Рис.3. Зависимость энергии удара от средневзвешенного диаметра куска.

Уравнение регрессии имеет вид [6]:

$$E_y = 3,6 d - 39,2 \quad (4)$$

Корреляционное отношение  $R^2 = 0,975$  [4] свидетельствует о наличии взаимосвязи энергии единичного удара и средневзвешенного диаметра куска. Регрессионное уравнение адекватно при изменении крупности от 20 до 80 мм.

Уравнение 4 позволяет при проектировании технологии обогащения бедных руд определить основной параметр ударного устройства – энергию единичного удара для конкретной крупности исходного сырья.

Важным показателем при подготовке горной массы к измельчению является её гранулометрический состав. Нами была подготовлена проба руды крупностью +20-80 мм, а затем проведена её электрообработка. К куску руды подводилось напряжение от 8 до 9,2 кВ. Электрический пробой фиксировался по наличию дуги между куском и электродами. В результате эксперимента вся проба разделилась на две части: пробитую – масса 5,2 кг; не пробитую – масса 6,6 кг. Затем обе пробы были раздроблены при постоянной энергии удара. На рис.4 приведены пробы после электрической обработки забалансовой сульфидной руды Молодежного месторождения, взятой из отвалов Учалинского Гока.



Рис.4. Образцы забалансовой медно-цинковой руды перед дроблением

Из рис.3 видно, что гранулометрический состав этих проб практически одинаков. В таблице 2 приведены гранулометрические составы проб бедной сульфидной руды до и после дробления.

Таблица 2.

Гранулометрический состав забалансовой медно-цинковой руды Молодежного месторождения перед и после дробления (единичный удар)

№	Класс, мм	Содержание класса до дробления, %	Содержание класса после дробления, %	Содержание класса до дробления, %	
				Электрообработанная	Необработанная
1	-10	0	23,8	0	16,2
2	+10-20	0	42,3	0	22,6
3	+20-30	6,0	26,0	7,0	42,9
4	+30-40	34,1	7,9	33,6	18,3
5	+40-50	44,0	0	43,0	0
6	+50-60	12,0	0	13,0	0

7	+60-70	3,2	0	2,7	0
8	+70-80	0,7	0	0,7	0

При дроблении руды замерялась суммарная энергия удара. Установлено, что степень дробления электрообработанной руды составила 3,75, а не обработанной – 2,94. Удельная энергия разрушения электрообработанной руды составила 1,67 кДж/кг, а не обработанной – 2,21 кДж/кг, т.е. больше в 1,33 раза. Это можно объяснить тем, что при электрическом пробое куска за счет увеличения объемов сульфидных вкраплений появляются внутренние трещины, т.е. происходит вскрытие зерен сульфидов. При этом уменьшается прочность кусков, которая и проявляется при ударном разрушении в виде увеличения степени дробления. В дальнейшем вскрытие зерен сульфидов при измельчении позволит увеличить их выход и уменьшить потери в хвостах.

Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что электрообработка увеличивает содержание класса крупностью -10 мм на 7,6% и уменьшает выход крупного класса +20 мм на 27,3%. Ранее проведенные исследования показали, что основная часть сульфидов находится в кусках мелких классов. Поэтому увеличение выхода мелких классов после дробления свидетельствует о повышении степени вскрытия сульфидных зерен. В результате экспериментов было установлено, что куски горной породы не пробиваемые током практически не содержат сульфидов. Их количество составило 56% от общей массы пробы. При переработке бедной руды эти куски могут быть отброшены в хвосты. Сокращение объемов горной массы в 2,38 раза и уменьшение относительной энергии разрушения в 1,33 раза приведёт к соответствующему уменьшению непроизводительных затрат энергии на дробление. Кроме того, отбрасывание в хвосты пустой породы, повышается в целом содержание сульфидов, что позволяет эти руды перевести в разряд кондиционных.

#### **Выводы:**

1. Установлена взаимосвязь относительной энергоёмкости разрушения ударом бедных сульфидных руд, granulometric composition and magnitude of energy of a single blow, that allows to determine the main parameters of the impact device.
2. Оценка эффективности процесса разрушения кусков сульфидной руды целесообразно производить по отношению удельной энергии к степени дробления. Она уменьшается с увеличением среднего диаметра куска.
3. Электрообработка бедной сульфидной руды приводит к сокращению объемов перерабатываемой горной массы в 2,3 раза, уменьшению относительной энергии разрушения в 1,33 раза и соответствующему уменьшению непроизводительных затрат энергии на дробление.

4. Электрообработка позволяет увеличить выход мелких классов и, соответственно, вскрытие вкраплений сульфидов, что в дальнейшем позволит повысить извлечение полезных ископаемых.

### Список литературы

1. Андреев С. Е., Петров В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд. М.: Недра, 1980. 215 с.
2. Афанасьев А. И., Костенчук С. Ф., Чиркова А. А. Исследование энергоемкости рабочего процесса импульсного двигателя в приводе рабочего органа горной машины // Известия вузов. Горный журнал. 2006. № 1. С.11–115.
3. Леман Э. Проверка статистических гипотез: пер. с англ. Ю. В. Прохорова. М.: Наука, 1964. 315 с.
4. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
5. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1978. 359 с.
6. Справочник по обогащению руд. Подготовительные проекты / под ред. О. С. Богданова [и др.]. М.: Недра, 1982. 365 с.

### Рецензенты:

Шемякин В.С., д.т.н., профессор, Закрытое акционерное общество «Научно-производственная компания «ТЕХНОГЕН», г.Екатеринбург.

Неволин Д.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и эксплуатация автомобилей» ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», г.Екатеринбург.