УДК 622.7:621.926.3

Г.Д. Краснов, Е.В. Копорулина,
А.Н. Краснов, В.В. Чихладзе

ОЦЕНКА СЕЛЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Проведено сравнение условий и результатов дробления рудных материалов в конусной инерционной дробилке КИД-100 и методом объемного сжатия в испытательной прессовой машине МИС-100К. В качестве исходных материалов взяты пробы сульфидных ассоциаций: сфалерит Дальнегорского и никеленосный пирротин Октябрьского месторождений. При изучении вещественного состава исходных и дезинтегрированных образцов использованы методы электронной микроскопии, оптического, фракционного анализов, дериватографии. Предложена формула оценки степени концентрации ценного компонента в отдельном классе крупности.
Ключевые слова: дробление, минеральные комплексы, селективность измельчения, сфалерит, пирротин.

Основным требованием к процессу дезинтеграции горной породы для последующего разделения составляющих ее минералов является возможно более полное, селективное раскрытие сростков минералов без переизмельчения. В идеале это разрушение минеральных агрегатов по поверхностям срастания минералов при минимальном расходе энергии. Применительно к обогащению полезных ископаемых очевидна многофазность кусков горной породы, различный масштабный уровень составляющих фаз. В этих условиях селективность дезинтеграции практически (а в некоторых случаях и теоретически) не может быть полной. Речь может идти только о той или иной степени селективности дезинтеграции, которая из-за различия механических свойств минералов проявляется в дефектности зерен и изменении содержания компонентов по классам крупности при измельчении [1, 2].

Для установления различия в состоянии кристаллических материалов, подвергнутых механическому разрушению разными методами, и оценки перераспределения содержания минералов по классам крупности после измельчения в лабораторных условиях проведена дезинтеграция рудных материалов в конусной инерционной дробилке КИД-100 и на прессовой испытательной машине МИС-100К. Одноосное сжатие зернистого материала под прессом с помощью плунжера в толстостенном металлическом стакане в условиях замкнутого объема неизбежно приводит к появлению боковых напряжений и, следовательно, к возникновению эффекта всестороннего (объемного) сжатия [3—5]. Моделирование процесса межчастичного измельчения методом объемного сжатия на прессе используется в последнее время отечественными и зарубежными исследователями для анализа затрат энергии на дезинтеграцию [6,7].

В качестве исходных материалов были взяты никеленосный пирротин Октябрьского месторождения и сфалерит-галенитовый продукт обогащения руды Дальнегорского месторождения, подготовленные до крупности -10+0,63 мм после дробления в лабораторной щековой дробилке.

С целью выбора для сравнения близких по крупности материалов, были выбраны два режима работы на каждой установке: для КИД – разгрузочная щель 1 мм (режим 1) и 2 мм (режим 2); для МИС — нагрузка 100 кН (режим 1) и 60 кН (режим 2). После измельчения определяли гранулометрический состав продукта и вещественный состав по классам крупности.

Характер деформации и разрушения кристаллических частиц изучен с помощью электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе Leo 1420 VP и оптической микроскопии на металлографическом микроскопе OLIMPUS BX-51M. Анализ состава образцов осуществлялся с помощью установленного на электронном микроскопе рентгеновского энергодисперсионного спектрометра INCA – 300.

Для оптической микроскопии использованы классы крупности –5+3, –3+1, –1+0,63 и –0,63+0 мм исходного материала, полученного первичным дроблением в щековой дробилке, и после его дробления в КИД и на прессе.

Для электронной микроскопии из исходного, измельченного под прессом и в КИД материала выделяли класс -63+40 мкм. Для крупных классов визуально оценивались форма зерен, наличие трещин, их ориентация и форма, образование в процессе приготовления препарата тонких частиц.

Рентгеноспектральный и минераграфический анализы показали, что основными минералами в представленных образцах сфалеритового продукта являются сфалерит (*Sf*) и галенит (*Ga*) с преобладанием первого. Соотношение их непостоянно и варьирует с увлечением количества *Ga* к мелкой части продукта. Из второстепенных минералов присутствуют карбонат (кальцит *Cal*) и кварц (*Q*), отмечаются единичные зерна пирита (*Py*), халько-пирита, ковелина.

Никеленосный пирротин в качестве основных примесей содержит халькопирит и пентландит. Представленные образцы состоят преимущественно из пирротина (*Pirr*) (около 90 %) с включениями или прожилками марказита (*Mar*) (около 2 %) и пирита (*Py*) (около 3 %). Отмечаются достаточно крупные зерна нерудного минерала идиоморфные или округлых форм, составляющие до 4 % фракции. По краевой части нерудного минерала часто развиваются реакционные каймы. Размеры зерен *Py* достигают 0,5 мм, *Mar* — 0,1 мм, *Cpy* — 0,5 мм, нерудного минерала — до 1,5 мм. В единичном случае во фракции –3+1 мм отмечается включение золота.

Анализ большого количества электронных фотографий позволил сделать следующие наблюдения. Зерна, полученные измельчением разными методами, как правило, близки по форме. Микротрещины обычно ориентированы в направлении включений и вокруг них. Объемное сжатие дает заметно большее количество частиц, имеющих трещины. Это видно на характерных снимках (рис. 1, 2, 3, 4, масштаб которых одинаков и определяется продольным размером кадра — около 1 мм. Характерно в продукте после объемного сжатия присутствие большого количества тонких частиц, образовавшихся в процессе приготовления препаратов для микроскопии. На рис. 5 и 6 видно, что мелкие частицы явно только что откололись от более крупных.

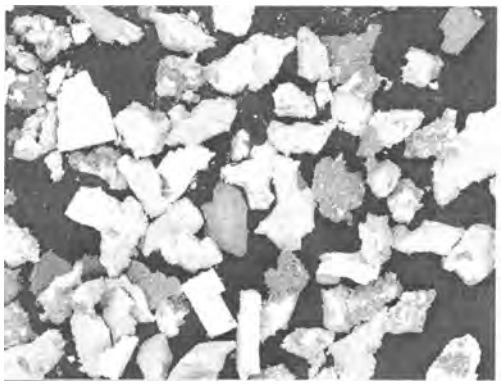

Рис. 1. Пирротин -63+40 мкм. КИД

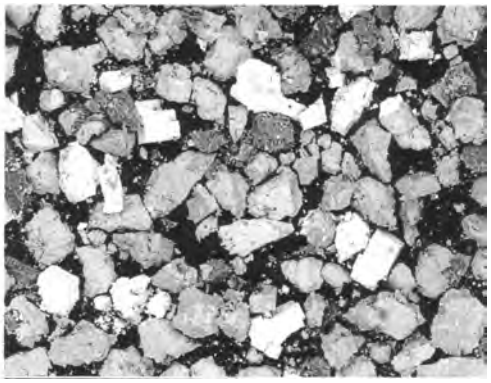

Рис. 2. Пирротин -63+40 мкм. Пресс

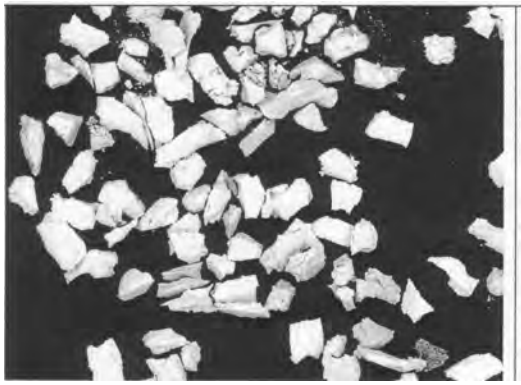

Рис. 3. Сфалерит -63+40 мкм. КИД

Рис. 4. Сфалерит -63+40 мкм. Пресс

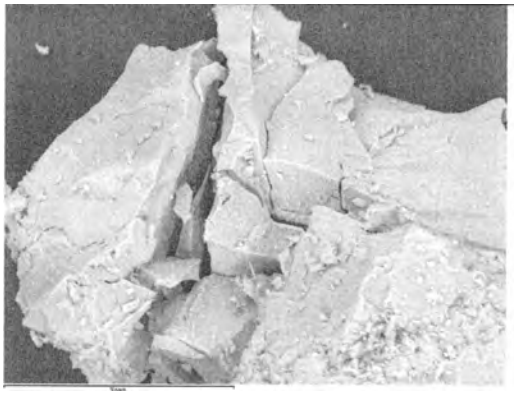

Рис. 5. Пирротин, пресс. 50 мкм.

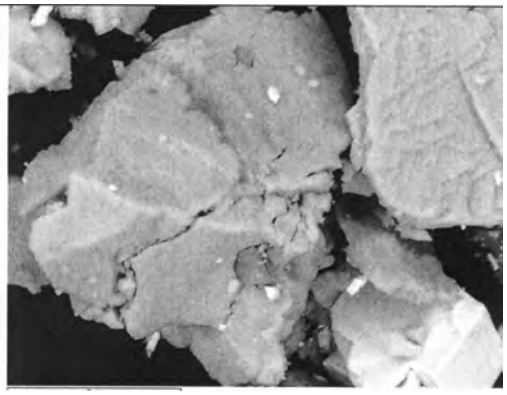

Рис. 6. Сфалерит, пресс. 50 мкм

Для сравнения трещиноватости зерен был использован следующий прием. Препарат фотографировали в мелком масштабе (при небольшом увеличении). Затем на снимке выбирались зерна, на которых дефекты при данном увеличении не были заметны, и такие зерна фотографировались при значительно большем увеличении, когда становится видна микроморфология зерен и наблюдаются дефекты, незаметные на мелкомасштабных снимках.

Сравнение значительного количества снимков, сделанных при большом увеличении, показывает, что микротрещины имеются, в отличие от измельчения в КИД, практически на всех частицах после объемного сжатия. Примеры применения метода масштабирования показаны на рис. 7 и 8.

Характер и расположение дефектов частиц в сфалерит-галенитовых образцах, обработанных под прессом и измельченных в конусной инерционной дробилке, изучались, в связи с минеральным составом образцов, с помощью оптической микроскопии. Из трех продуктов (исходный, пресс и КИД) были выделены классы –3+1 мм и –1+0,63 мм и из них изготовлены аншлифы на основе эпоксидных смол.

В классе -3+1 мм, выделенном из исходного материала, присутствуют зерна различной степени трещиноватости, их общие количество около 10 % . Трещины более заметны в сфалерите, для галенита характерны пластические деформации. Приуроченности трещин к границам зерен не отмечено.

Трещиноватых зерен в класс –3+1 мм после обработки в КИД исходного материала на 3—4 % больше, чем в исходном. Трещины концентрируются в зернах сфалерита, часто трассируют микровключения нерудных минералов (рис. 9, 10). Деформации галенита менее заметны. Принципиальных отличий от образца исходного материала нет.

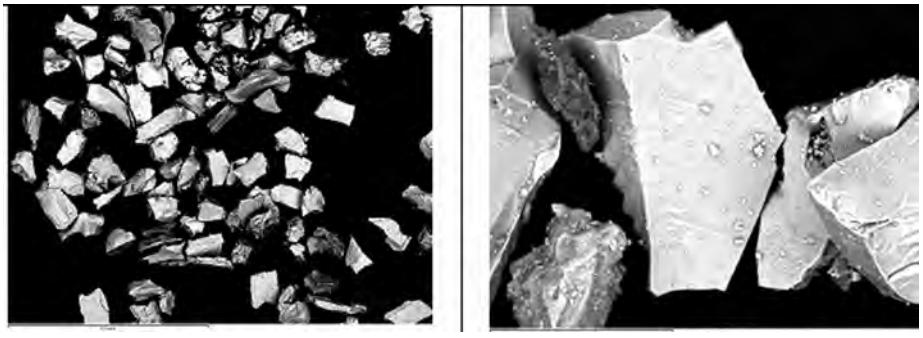

Рис. 7 Пирротин -63+40 мкм. КИД. Частица в центре

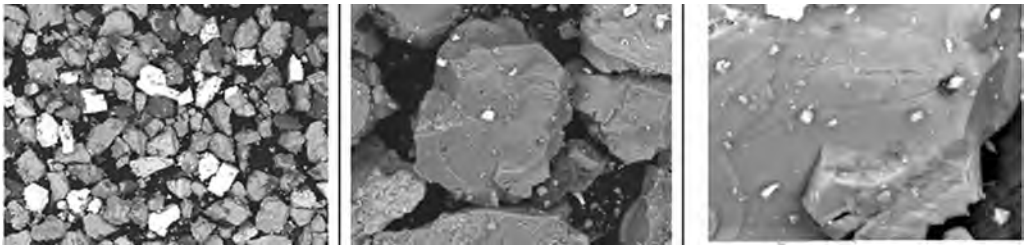

Рис. 8. Сфалерит -63+40 мкм. Пресс. Частица в правом нижнем углу

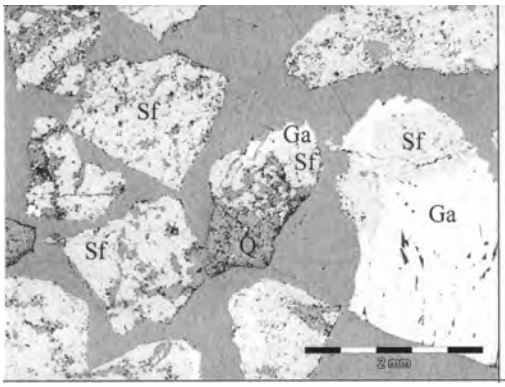

Рис 9. Общий вид фракции. В центре сильно трещиноватое срастание сфалерит-галенит-кварца. КИД

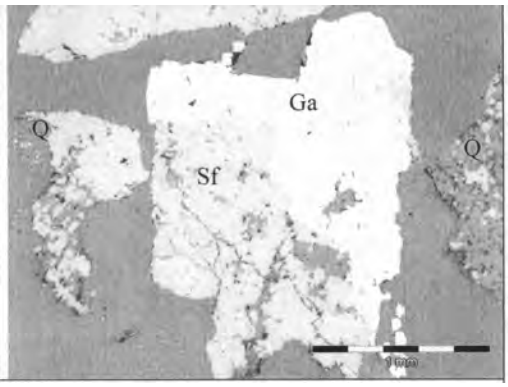

Рис 10. Срастание сфалерита с галенитом. КИД

После прессовой обработки исходного материала в классе –3+1 мм трещиноватых зерен на 3—4 % больше, чем в образцах КИД. Трещины отмечаются как в зернах сфалерита, так и в галените. Особенностью образца является присутствие сильно разрушенных зерен сфалерита, галенита и их срастаний, что не наблюдалось в исходном материале и в продукте КИД. (рис. 11). Отмечена единичная находка зерна с трещинами «залеченными» кальцитом, вероятно, испытавшего дробление в процессе рудообразования.

После обработки в КИД исходного материала в классе –1+0,63 мм резко преобладают зерна вытянутой формы (рис. 12), что указывает на наличие сдвиговых напряжений при дроблении. Количество трещиноватых зерен невелико и сопоставимо с исходной фракцией. Трещиноваты как зерна галенита, так и зерна сфалерита.

Класс –1+0,63 мм после прессовой обработки исходного материала представляет собой образец с наиболее трещиноватыми зернами. Трещиноваты как галенит, так и сфалерит. В срастаниях сфалерита с галенитом трещины часто пересекают оба минерала (рис. 13, 14). Отмечается, тяготение трещин к границам минеральных индивидуумов.

Сравнение методами оптической микроскопии результатов измельчения пирротинового продукта разными способами в крупных классах затруднено, так как в образцы попало ограниченное количество крупных и средних зерен. На рис. 15 и 16 видно, что зерна, попавшие в пробу класса –5+3 мм после измельчения в КИД, трещиноваты, но не разрушены. После прессового воздействия зерна более трещиноваты. Трещины развиваются как по минералам-включениям или направлениям двойникования, так и в крест них. Из минералов наиболее интенсивно разрушается пирит. В существенно пирротиновых зернах наиболее интенсивно трещиноватость проявляется по границе рудный — нерудный минерал.

На представленной фотографии класса –3+1 мм после прессового воздействия (рис. 18) зерна резко различаются по размеру. В крупных зернах незначительное количество трещин, много очень мелких зерен, образовавшихся при приготовлении препарата, вероятно, в результате обкалывания краев частиц при объемном

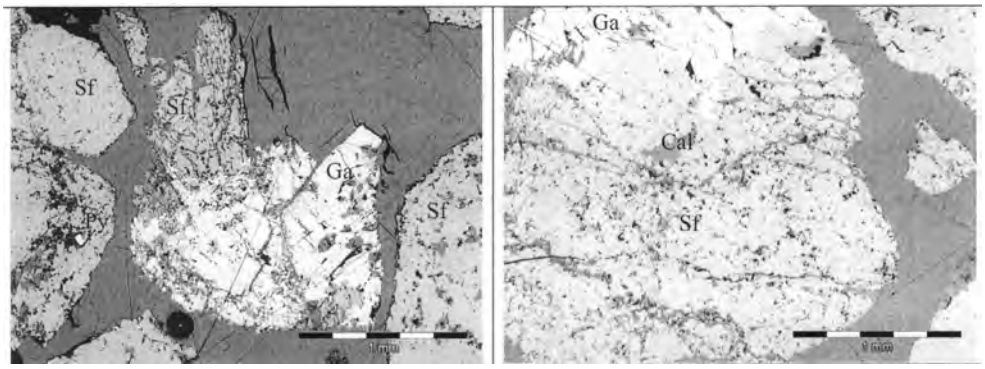

Рис. 11. Сфалерит –3+1, пресс.

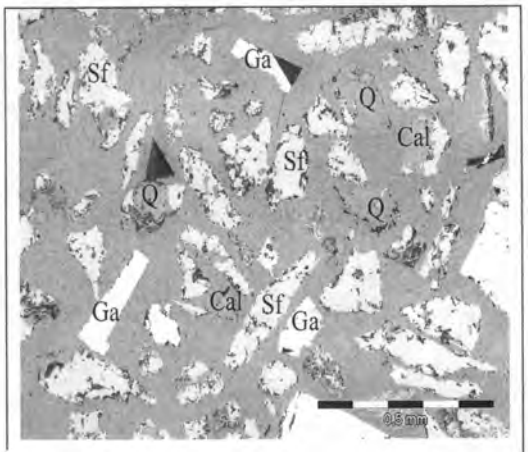

Рис. 12. Общий вид фракции. Отмечается преобладание удлиненных зерен.

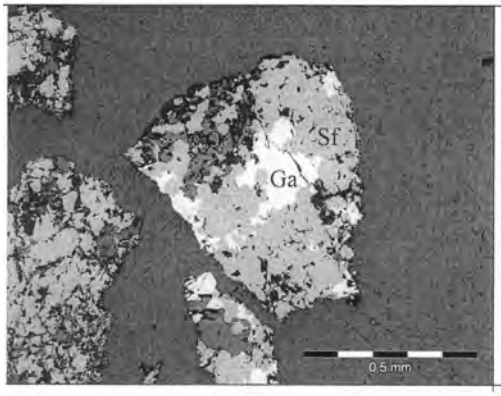

Рис. 13. Срастание галенита и сфалерита с трещиной, секущей оба минерала.

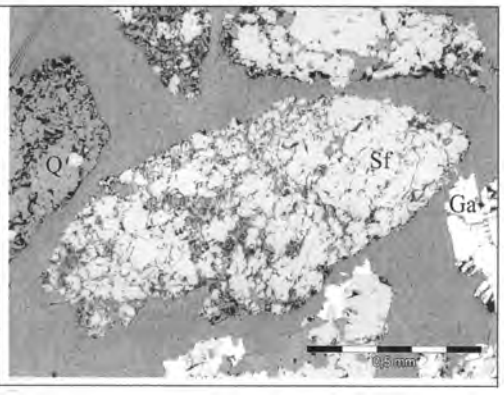

Рис. 14. Сильно трещиноватый сфалерит

сжатии. В образце присутствуют отдельные зерна нерудного минерала, что можно считать признаком селективности разрушения.

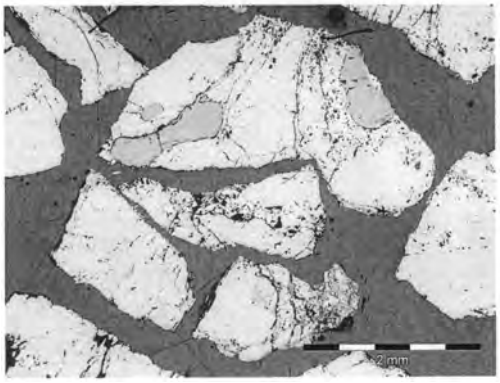

Рис. 15. Класс -5+3 мм, КИД

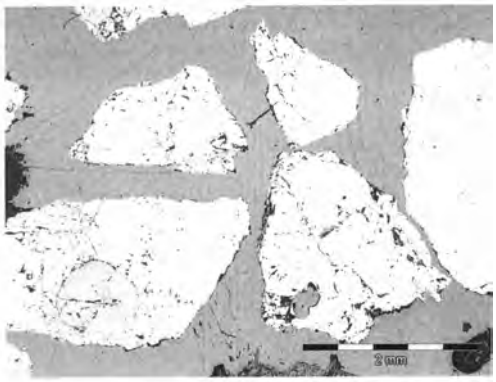

Рис. 16. Класс -5+3 мм, пресс

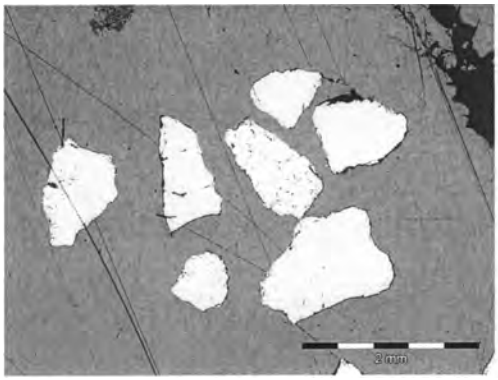

Рис. 17. Класс -3+1 мм, КИД

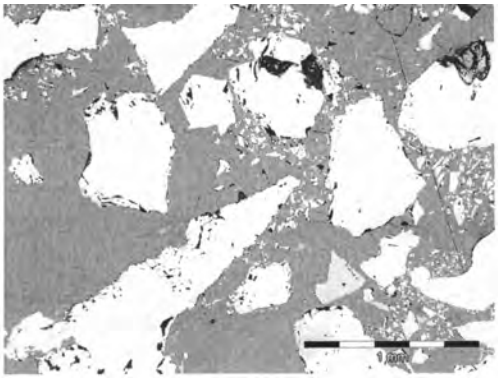

Рис. 18. Класс -3+1 мм, пресс

В продукте КИД (рис. 17) есть как разрушенные, так и слабо трещиноватые зерна. Трещины развиваются по границам минералов (пирротина, пирита, халькопирита и нерудных минералов). В интенсивно разрушенных зернах направление трещин не совпадает с границами минеральных фаз, однако нерудный минерал остается наиболее целым.

Класс –1+0,63. В продукте КИД (рис. 19) есть как разрушенные, так и слабо трещиноватые зерна, резко градируют два типа зерен — сильно разрушенные и практически целые (слабо трещиноватые). После прессования в материале преобладают мономинеральные зерна пирротина (рис. 20). Нерудный минерал обособляется в мономинеральные частицы. Пирит в сростках и в мономинеральных зернах является наиболее трещиноватым минералом. Мономинеральные нерудные и пирротиновые зерна почти не трещиноваты. В этом материале присутствуют признаки селективности измельчения под прессом – отдельные зерна нерудного минерала, которые отсутствуют в сравниваемом препарате.

Класс –0,63 мм. В продукте КИД (рис. 21) преобладают мономинеральные зерна, часть зерен имеет трещины по периметру. Есть разрушенные зерна, в основном, пирита. В материале прессового измельчения

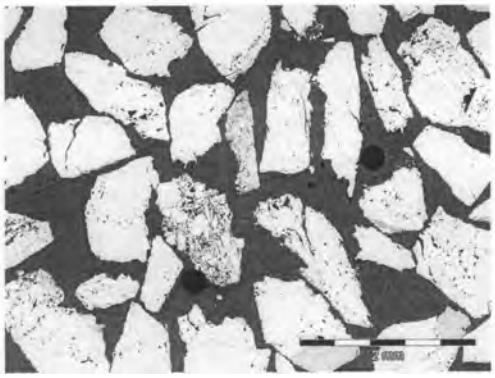

Рис.19. Класс-1+0,63 мм, КИД

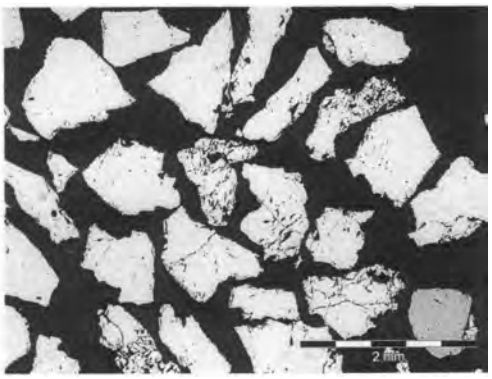

Рис.20. Класс-1+0,63 мм, пресс

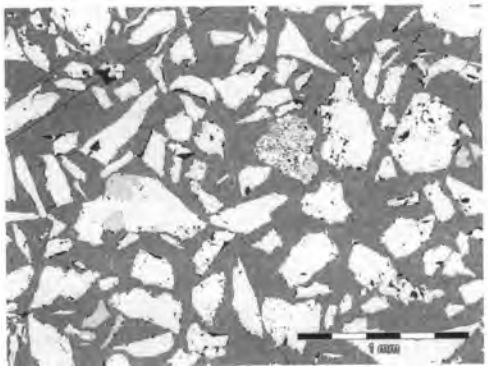

Рис. 21. Класс –0,63, КИД

Рис. 22. Класс –0,63, пресс

(рис. 22) четко различимы два типа зерен — сильно разрушенные и целые. Среди целых и слабо трещиноватых зерен преобладают существенно пирротиновые и нерудные. В сильно разрушенных зернах предпочтений по минеральному составу не выявляется, кроме отсутствия нерудного минерала. Мелкий продукт прессового измельчения выделяется большим количеством отдельных зерен нерудного минерала.

Подробный анализ большого числа электронных и оптических фотографий результатов измельчения сфалеритового и пирротинового продуктов параллельно в конусной инерционной дробилке и с помощью прессовой испытательной машины позволяет сделать некоторые общие выводы:

1. Продукты измельчения обоими методами дают по сравнению с исходным материалом, полученным обработкой в щековой дробилке, увеличение количества зерен, имеющих механические дефекты. Продукты дробления методом объемного сжатия содержат больше трещиноватых частиц по сравнению с продуктом КИД. Это касается наличия крупных трещин, сильно снижающих прочность частиц, что подтверждается значительным количеством мелочи, образовавшейся при подготовке препаратов. Продукты прессования имеют большое количество микротрещиноватых частиц,

что демонстрирует сравнение методом «масштабирования», когда при большом увеличении фотографируются частицы, «бездефектные» в мелком масштабе.

2. Трещины в частицах после прессового воздействия чаще приурочены к границам срастания сульфидов и включений нерудных минералов.

3. В процессе дробления наиболее подверженным разрушению минералом является пирит. В обработанном материале его количество увеличивается с уменьшением размера фракции.

4. Наименее трещиноваты зерна нерудного минерала.

5. При прессовой обработке наблюдается тенденция выделения из сростков неразрушенных зерен нерудного минерала, что является признаком селективности измельчения.

Выше показано сравнительное изменение состояния кристаллических частиц, образующих минеральные материалы, после их дезинтеграции различными методами. Представляет интерес сопоставление измельченных материалов в отношении распределения некоторых минеральных компонентов по классам крупности. Такое сопоставление поможет получить представление об избирательности измельчения и сравнить аппараты по этому признаку. При необходимости выбора технологии и оборудования с точки зрения селективности дезинтеграции требуется некий критерий селективности, позволяющий сравнивать между собой различные способы измельчения и варианты технологии рудоподготовки.

Оценка селективности раскрытия обычно производится косвенным способом, по результатам последующего обогащения. В литературе [1] описана последовательность действий по оценке селективности. Вначале определяется гранулометрическая характеристика сравниваемых продуктов и содержание полезного компонента в узких классах крупности. Подсчитывают разницу в содержании по одинаковым классам. Проводят разделение (например, флотацию) и определяют извлечение по классам крупности, которое в виде поправочного коэффициента вводят в показатель разницы в распределении. Сумма полученных величин по всем классам крупности для каждого продукта позволяет сравнить возможные результаты обогащения и выбрать лучший по селективности раскрытия ценного компонента из сравниваемых вариантов технологии рудоподготовки.

Надежность и объективность такого метода несомненны, однако очевидна и его большая трудоемкость из-за необходимости проведения технологических экспериментов и дополнительных анализов. В некоторых случаях для выбора технологии рудоподготовки достаточно сравнить степень неравномерности распределения ценного компонента по классам крупности.

Степень концентрации ценного компонента G_i в отдельном классе крупности можно определить по формуле:

$$G_i = \frac{(\beta_i - \alpha)}{\alpha}\gamma_i,$$

где β_i — содержание данного компонента в классе; α — содержание этого компонента в продукте; γ — выход класса; i — номер выбранного класса крупности от 1 до n.

Формула показывает степень увеличения (или уменьшения) количества

Степень концентрации сфалерита по классам крупности, %								
Класс, мм	**Пресс 1**				**Пресс 2**			
	Выход	**Содержание**	**Извлечение**	**G**	**Выход**	**Содержание**	**Извлечение**	**G**
–10+7	0		0	0	0		0	0
–7+5	8,87	24,3	9,40	0,53	14,80	16,86	12,56	–2,24
–5+3	13,78	20,63	12,40	–1,38	18,15	28,28	25,83	7,68
–3+1	24,84	27,19	29,45	4,61	28,00	18,10	25,51	–2,49
–1+0,63	10,33	35,49	15,99	5,66	9,38	27,38	12,93	3,55
–0,63+0	42,18	17,81	32,76	–9,42	29,67	15,52	23,18	–6,49
Исх.	100	22,93	100	0	100	19,87	100	0
Амплитуда степени концентрации			10,8		11,23			
	Кид1				Кид2			
–10+7	0		0	0	4,46	23,08	3,96	-0,50
–7+5	3,45	15,41	2,62	-0,83	6,82	22,42	5,89	-0,93
–5+3	18,96	22,72	21,26	2,30	25,53	27,00	26,54	1,01
–3+1	35,87	19,22	34,03	–1,84	39,06	25,67	38,60	–0,46
–1+0,63	12,59	30,33	18,85	6,26	10,83	29,40	12,26	1,43
–0,63+0	29,14	16,16	23,24	–5,90	13,30	24,90	12,75	–0,55
Исх.	100	20,26	100	0	100	25,97	100	0
Амплитуда степени концентрации			8,56		2,44			
Степень концентрации пирротина по классам крупности, %								
Класс, мм	**Пресс1**				**Пресс2**			
	Выход	**Содержание**	**Извлечение**	**G**	**Выход**	**Содержание**	**Извлечение**	**G**
–10+7	0	0	0	0	5,86	24,98	3,85	–2,24
–7+5	8,92	24,34	5,19	–3,73	16,03	25,21	10,57	–6,03
–5+3	12,69	42,8	12,97	0,28	21,31	24,90	8,15	–8,18
–3+1	28,69	34,41	23,58	–5,11	20,66	34,85	18,83	–2,85
–1+0,63	9,93	58,04	13,77	3,84	7,83	61,19	12,53	4,02
–0,63+0	39,77	46,84	44,49	4,72	28,31	62,23	46,09	15,28
Исх.	100	41,97	100	0	100	40,42	100	0
Амплитуда степени концентрации			8,84		19,30			
	Кид1				Кид2			
–10+7	0	0	0	0	0	0	0	0
–7+5	0	0	0	0	4,24	31,95	4,03	–0,21
–5+3	21,55	30,91	19,68	–1,87	24,72	32,31	23,76	–0,96
–3+1	35,44	28,76	30,12	–5,32	36,69	25,35	27,66	–8,88
–1+0,63	10,80	40,40	12,89	2,09	11,66	49,89	17,38	5,64
–0,63+0	32,21	39,20	37,31	5,10	22,69	40,26	27,17	4,40
Исх.	100	33,84	100,00	0	100	33,62	100	0
Амплитуда степени концентрации			7,19		10,04			

выбранного компонента в классе относительно количества этого компонента в средней пробе. Аналогичную формулу используют при радиометрической сепарации руд для оценки «показателя контрастности» или «показателя признака разделения» — относительного отклонения содержания

ценного компонента в отдельных кусках или во фракциях, сгруппированных по интенсивности проявления используемого признака разделения (радиоизлучения), от среднего содержания компонента в руде [8].

Ясно, что G_i может принимать как положительное, так и отрицательное значение, причем сумма положительных и отрицательных значений равна 0. Неравномерность распределения компонента по классам крупности можно считать мерой селективности дезинтеграции. Избирательность измельчения в более широком диапазоне крупности может быть оценена путем суммирования степени изменения количества ценного компонента в нескольких классах.

В качестве примера рассмотрим результаты измельчения сфалеритового и пирротинового продуктов крупностью –10+0,63 мкм параллельно в лабораторной конусной инерционной дробилке (КИД) и методом объемного сжатия на прессовой испытательной машине. Для каждого аппарата был подобран режим более мелкого (1) и более крупного (2) измельчения. В таблице представлен гранулометрический состав измельченных материалов. Характеристики крупности измельченных продуктов близки между собой, однако в продукте КИД отмечается несколько большее количество крупных классов.

Сфалеритовый продукт. Сравнение результатов измельчения в КИДе и под прессом показывает, что, кроме закономерной разницы характеристик крупности продуктов режимов 1 и 2, нет резкого различия в содержании выбранного компонента по классам крупности. Это наиболее характерно для режима 2 КИД. Соответственно, извлечение сфалерита в классы крупности при этом режиме измельчения целиком зависит от выхода классов. Равномерность распределения сфалерита говорит о низкой избирательности измельчения, что подтверждается невысокими величинами степени концентрации, которая принимает положительные и отрицательные значения в смежных классах крупности. Степень концентрации при измельчении под прессом всегда выше, чем в КИДе, в частности, это видно из сравнения близких по крупности продуктов: пресс, режим 2, и КИД, режим 1.

Пирротиновый продукт. Характер измельчения сфалеритового и пирротинового продуктов значительно различается. Здесь мелкие классы существенно больше обогащены ценным минералом, особенно, при измельчении под прессом. Соответственно, увеличено извлечение в мелкие классы. Чередование положительной и отрицательной степени концентрации в смежных классах наблюдается только в одном случае.

Распределение сфалерита и пирротина по классам крупности вполне сочетается с результатами микроскопических минералогических исследований. Более или менее равномерное распределение сфалерита соответствует равномерной трещиноватости зерен этого минерала во всех классах крупности при измельчении обоими методами, показанное оптической микроскопией. Оптическое исследование пирротинового продукта объясняет распределение пирротина по фракциям и концентрацию его в мелких классах.

В качестве окончательной оценки селективности измельчения принята сумма положительных (или равная ей сумма отрицательных) значений сте-

пени концентрации по классам. Эта величина по результатам проведенных экспериментов для прессового измельчения всегда выше, чем для КИД. Несмотря на наличие определенной закономерности, окончательно оценивать свойства того или иного метода измельчения преждевременно ввиду ограниченности экспериментальной базы и некоторого различия крупности сравниваемых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др.* Селективное разрушение минералов. — М.: Недра, 1988, 286 с.

2. *Федотов П.К.* Разрушение руды в роллер-прессе. — М.: ООО «Геоинформмарк», 2006. 128 с.

3. *Краснов Г.Д., Подгаецкий А.В., Чихладзе В.В.* Дробление рудных материалов методом объемного сжатия. Материалы 1-го Международного научно-практического семинара памяти В.А. Олевского «Проблемы дезинтеграции минерального и техногенного сырья в горной промышленности и строительной индустрии», 10—16 сентября 2007, Ставрополь, с. 21—26.

4. *Краснов Г.Д., Никитин С.М., Подгаецкий А.В., Чихладзе В.В.* Об оценке изменения свойств минеральных материалов при объемном сжатии. VI Конгресс обогатителей стран СНГ. Материалы конгресса, т. 1. — Москва.: Альтекс, 2007, с. 208.

5. *Краснов Г.Д., Никитин С.М., А.В. Подгаецкий, В.В. Чихладзе.* Изменение свойств минеральных ассоциаций в условиях объемного сжатия. ГИАБ, 2008, № 7, с. 381—390.

6. *Д.С. Васьков, П.К. Федотов.* Моделирование процесса межчастичного измельчения в поршневом прессе. «Современные проблемы обогащения и глубокой комплексной переработки минерального сырья» (Плаксинские чтения): Материалы международного совещания. Владивосток, 16—21 сентября 2008 г. — Владивосток: 2008, с. 80—83.

7. *Мелкомасштабное* испытание для определения индекса работы измельчения в валковых дробилках высокого давления. Dave Bulled, Khiratt Husain and Carlos Lozano. SGS-Mineral Services, CANADA.

8. *Мокроусов В.А., Лилеев В.А.* Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М., «Недра», 1979, 192 с.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Краснов Г.Д. — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,
Копорулина Е.В. — кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог,
Краснов А.Н. — главный специалист;
Чихладзе В.В. — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, hely28@mail.ru,
Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук.