

Горбатова Е.А.¹, Емельяненко Е.А.², Ожогина Е.Г.^{1,2} (1 — ФГБУ «ВИМС», 2 — Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ
ОБОГАТИМОСТИ КОЛЧЕДАНЫХ РУД**

*Медно-колчеданные и медно-цинково-колчеданные руды характеризуются сложным строением и непостоянным минеральным составом, что непосредственно оказывает влияние на технологические свойства руды и показатели обогащения в целом. Значительный практический опыт и огромный массив данных, накопленный исследовательскими коллективами требует систематизации в виде разработки методических документов, позволяющих проводить оценку колчеданных руд разного генезиса на обогатимость. **Ключевые слова:** колчеданные руды, технологические свойства, обогатимость, методические документы.*

Gorbatova E.A.¹, Emelyanenko E.A.², Ozhogina E.G.^{1,2} (1 — VIMS, 2 — Nosov Magnitogorsk State Technical University)
THE APPROPRIATENESS OF FORECAST EVALUATION
OF ENRICHMENT OF SULFIDE ORES

*Copper-pyrite and copper-zinc-pyrite ores are characterized by a complex structure and unstable mineral composition, which directly affects the technological properties of the ore and enrichment indicators in General. Significant practical experience and a huge amount of data accumulated by research teams requires systematization in the form of development of methodological documents that allow for the assessment of pyrite ores of different Genesis for enrichment. **Key-words:** sulfide ore, technological properties, obogatimost, guidance documents.*

Медно-колчеданные и медно-цинково-колчеданные руды — весьма сложный для флотационного обогащения объект. Руды комплексные, характеризуются наличием сложного текстурно-структурного рисунка, обусловленного присутствием нескольких полезных минералов, нередко тесно ассоциирующих между собой; обладают варьирующим гранулярным составом и морфометрическими характеристиками минералов, присутствием вторичных сульфидов. Прогнозной оценкой обогатимости колчеданных руд на основе изучения их природных характеристик и технологических свойств занимаются давно и не безуспешно под руководством ведущих ученых и специалистов коллективы российских, зарубежных научно-исследовательских лабораторий, институтов, горно-обогатительных предприятий [2, 7]. Однако до сих пор нет четких методических до-

кументов, позволяющих по установленным технологическим характеристикам давать рекомендации по обогащению колчеданных руд разного генезиса.

К общим и основным характеристикам руды, позволяющим провести прогнозную оценку их обогатимости, относятся:

— текстура определяет конечную крупность дробления руды на стадии рудоподготовки;

— структура (гранулярный состав минералов, их морфология и характер поверхности границ сростаний) обуславливает конечную тонину помола измельчения руды на стадии обогащения процессом флотации;

— особенности минерального состава (наличие вторичных сульфидов, сульфатов, карбонатов, оксидов) влияют на выбор технологической схемы обогащения;

— элементный состав главных рудных минералов позволяет дать прогнозную оценку возможных потерь ценных компонентов.

При проведении исследований на обогатимость медно-колчеданных и медно-цинково-колчеданных руд южноуральского региона применялся современный комплекс минералого-аналитических методов оптической микроскопии, количественный рентгенографический анализ с методами электронной микроскопии и рентгеноспектральный микроанализ, позволяющий получить полную и достоверную информацию о вещественном составе и морфоструктурных особенностях минеральных фаз, давать прогноз обогатимости минерального сырья. Минералогические исследования регламентированы методической документацией, утвержденной Научным советом по минералогическим методам исследования.

В качестве объектов исследований выбраны колчеданные месторождения Южного Урала — Александринское, Учалинское, Узельгинское. Предметом исследования явились обладающие сложным строением руды этих месторождений.

Состав колчеданных руд весьма разнообразен [3, 5, 8–11]. Руды, по количеству и характеру распределения слагающих их сульфидов, подразделяются на вкрапленные (до 35 % серы) и сплошные (более 35 % серы). Вкрапленные руды имеют прожилково-вкрапленные текстуры, а сплошные — массивные, полосчатые и слоистые, сланцеватые и сланцевато-полосчатые, брекчиевые и брекчиевидные, коломорфные.

Руды, характеризующиеся однородным сложением — массивным или вкрапленным, при условии отсутствия тонких сростаний с нерудными минералами и минералами носителями вредных примесей в процессе рудоподготовки легко разрушаются, разделяя минеральный агрегат на обломки или зерна с минеральной поверхностью одинаковой активности.

Неоднородные руды — полосчатого, слоистого, сланцеватого, сланцевато-полосчатого, брекчиевого и

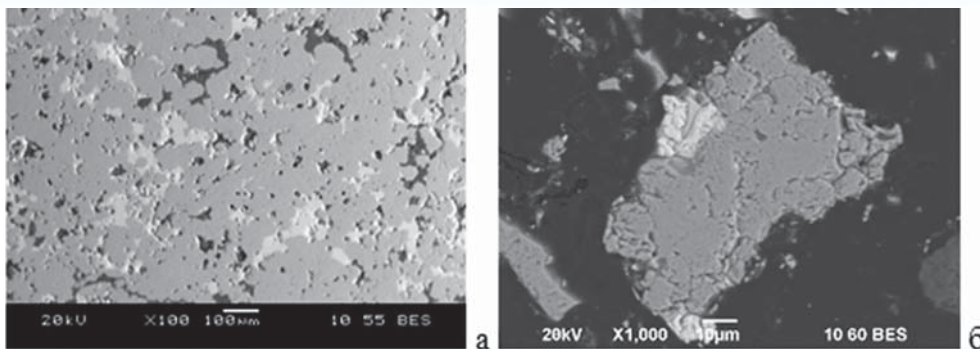


Рис. 1. Аллотриоморфные зерна сульфидов цветных металлов (белое) в руде (а) и в хвостах обогащения (б). Изображение в обратно-рассеянных электронах

брекчиевидного сложения обусловлены более сложным характером поверхностей границ между минеральными агрегатами, что ухудшает процесс разделения. Руды коломорфной текстуры, где минералы и минеральные агрегаты образуя сложные взаимопространства, требуют многостадийного дробления.

К основным структурам колчеданных руд можно отнести: кристаллически-зернистую, кристаллобластическую, метазернистую, коллоидную, коррозионную, распад твердых растворов, катакластическую.

В рудах кристаллически-зернистого строения с высокой степенью идиоморфизма встречается пирит, поэтому гипидиоморфнозернистая структура свойственна сростаниям идиоморфных или гипидиоморфных зерен пирита с аллотриоморфными выделениями более поздних сульфидов — сфалерита, халькопирита, галенита и др. Такие сростания характеризуются простым строением с ровными и прямыми границами. В процессе дезинтеграции происходит довольно легкое раскрытие сростков с последующим высвобождением зерен. В случае сростания аллотриоморфных выделений сфалерита и халькопирита минеральным агрегатам свойственны более неровные, заливообразные границы.

Кристаллобластические структуры характерны для пирита и проявляются в результате перекристаллизации агрегатов зернистого, метазернистого и коллоидного строения. По степени идиоморфизма кристаллобластов в рудах различают идиоморфнобластическую, гипидиоморфнобластическую и аллотриоморфнобластическую структуры.

Минеральные агрегаты кристаллозернистых и кристаллобластовых структур в процессе разделения их физическими методами максимально раскрываются с выделением минералов цветных металлов. Если размер зерен минералов менее 44 мкм, то большая вероятность их накопления в хвостах обогащения в виде полиминеральных агрегатов с идиоморфными и гипидио-

морфными выделениями пирита и сульфидами цветных металлов аллотриоморфной формы (рис. 1).

Метазерна образуются в результате собирательной перекристаллизации глобулярного пирита и метасоматического замещения минералов вмещающих пород и сульфидов. По степени идиоморфизма метазерен в рудах различают идиоморфнозернистые, гипидиоморфнозер-

нистые и аллотриоморфнозернистые структуры, характеризующиеся разной поверхностью границ сростаний минералов: от ровной ортогональной до искривленной с частичным проникновением минералов друг в друга. Поэтому в процессе разделения пиритные минеральные агрегаты с реликтами других минералов концентрируются в хвостах обогащения.

Коллоидные и метаколлоидные микроstructures — тонкое прорастание минералов с выделением концентрических, сферолитовых, фестончатых и шариковых минеральных агрегатов пиритного, сфалерит-пиритного и халькопирит-сфалерит-пиритного составов. Строение таких агрегатов неоднородное, сетчатое, пористое с радиальными и концентрическими трещинками усыхания, что увеличивает сорбционную способность агрегатов и ухудшает флотационные характеристики минералов. Трещины усыхания могут быть выполнены рудными и нерудными минералами.

Коррозионные структуры характерны для поздних минеральных ассоциаций руд. Они проявляются при замещении ранее выделившихся минералов — кварца, пирита, халькопирита, сфалерита и других более поздними — пиритом, халькопиритом, сфалеритом, блеклой рудой, галенитом, борнитом, халькозином, минералами висмута и серебра.

В медно-колчеданных и медно-цинково-колчеданных рудах вторичные минералы могут унаследовать состав первичного минерала или не иметь ничего общего с составом замещаемого минерала. Замещение сульфидов и минералов вмещающих пород начинается

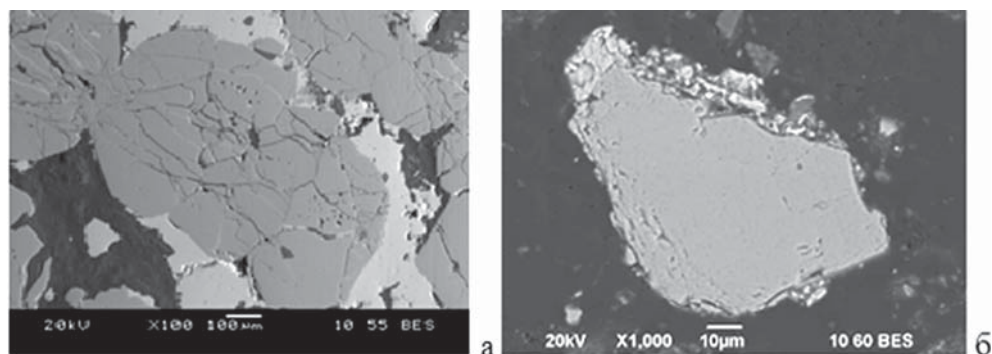


Рис. 2. Замещение пирита халькопиритом (белое) в руде (а) и в хвостах обогащения (б). Изображение в обратно-рассеянных электронах

Таблица 1
Физические свойства рудных минералов [2]

Минерал	Формула	Физические свойства		
		Спайность	Твердость по шкале Мооса	Хрупкость
Пирит	FeS ₂	Весьма несовершенная	6-6,5	Относительно хрупок
Пирротин	FeS _{1-x}	Несовершенная	4	Довольно хрупок
Халькозин	Cu ₂ S	Несовершенная	2,5-3	Слабо ковок
Ковеллин	CuS	Совершенная	1,5-2	Хрупок, в тонких пластинках несколько гибок
Борнит	Cu ₅ FeS ₄	Практически отсутствует	3	Сравнительно хрупок, но несколько более пластичен, чем халькопирит
Халькопирит	CuFeS ₂	Несовершенная	3-3,5	Довольно хрупок
Теннантит	Cu ₁₀ Cu ₂ As ₄ S ₁₃	Практически отсутствует	3-4	Хрупок
Сфалерит	ZnS	Совершенная	3-4	Хрупок

с выполнения трещины и развивается по контурам зерен поздних минералов, образуя тонкие нитеобразные прожилки, микровключения и каемочные выделения (рис. 2). Поверхность границ срастания неровная, зубчатая, заливообразная с глубоким проникновением вторичных минералов в первичные, что обуславливает переизмельчение и потери.

Структура распада твердых растворов — это срастание двух минералов, обладающих близкими кристаллохимическими свойствами, в основном халькопирита и сфалерита. В рудах наиболее часто встречаются эмульсионные и пластинчатые морфологические виды структур, представляющие собой тонкозернистые срастания минералов. Такие минеральные агрегаты затруднительно или практически невозможно раскрыть, в результате чего образуются минеральные сростки закрытого типа. Вследствие повышенной сорбционной способности границ раздела минеральные агрегаты активно флотируются с получением некондиционного концентрата, в котором теряется и разубоживается ценный минерал. Небольшая часть сростков уходит в хвосты [1, 4].

Катакластические структуры выражены в рудах в виде трещиноватых, раздробленных минеральных агрегатов пирита и кварца. Полости трещин залечиваются более мягкими минералами — халькопиритом, сфалеритом и теннантитом. Такие руды склонны к переизмельчению, что приводит к образованию шламуемого материала и накоплению его в хвостах обогащения. Анализ минерального состава колчеданных руд показал, что главными рудными минералами являются пирит, халькопирит, сфалерит, борнит; второстепенными — блеклая руда (теннантит), халькозин, ковеллин, магнетит, пирротин, галенит; редкие — гематит, арсенипирит, теллурувисмутит. К нерудным минералам относятся кварц, серицит, хлорит, кальцит, сидерит, флюорит, барит [5, 8–11].

Главные рудные минералы по физическим свойствам (твердости, спайности и хрупкости) практически не обладают контрастностью. Пирит, слагающий основ-

ную массу руды (до 85 %), характеризуется более высокой твердостью, чем сульфиды меди и цинка, что непосредственно оказывает влияние на результаты процессов измельчения (табл. 1). Более мягкие минералы подвержены переизмельчению, теряются в хвостах.

Наличие в руде повышенного содержания вторичных сульфидов меди — борнита, халькозина, ковеллина осложняет процесс селективной флотации. При обогащении подобных руд применяются сложные технологические схемы и реагентные режимы.

Непостоянство элементного состава рудных минералов отражается на их технологических свойствах (табл. 2). Так, в сфалерите часто наблюдается примесь двухвалентного железа, которая оказывает непосредственное влияние на его флотируемость. Следует отметить, что флотационные свойства сфалерита зависят не только от содержания примесного железа, но и от того, в какой форме оно находится — в виде изоморфной примеси или в виде эмульсионной вкрапленности пирротина. При изоморфной форме примесного железа флотируемость сфалерита возрастает с уменьшением содержания железа. Если железо присутствует в виде пирротина, такой связи не наблюдается. Увеличение содержания железа в кристаллической структуре минерала повышает его способность к окислению и снижению флотируемости неактивированного сфалерита [6].

С целью установления целесообразности прогнозной оценки обогатимости колчеданных руд рассмотрены технологии обогащения, применяемые на Александринской и Учалинской обогатительных фабриках.

Руды Александринского месторождения представлены в основном вкрапленными разновидностями, поэтому необходимая крупность измельчения составляет до 90–95 % класса -0,074 мм. Наличие множества вторичных минералов меди — борнита, халькозина и

Таблица 2
Химический состав и кристаллохимическая формула сфалерита на примере руд Александринского и Учалинского месторождений (по данным локального рентгеноспектрального микроанализа)

Fe	Cu	Zn	S	Кристаллохимическая формула
0,54		72,68	6,77	(Zn _{1,33} Fe _{0,01}) _{1,34} S _{1,0}
14,33	2,3	51,03	2,34	(Zn _{0,77} Fe _{0,25} Cu _{0,04}) _{1,06} S _{1,0}
2,18		67,13	0,69	(Zn _{1,07} Fe _{0,04}) _{1,11} S _{1,0}
4,73	2,69	61,84	0,74	(Zn _{0,99} Fe _{0,09} Cu _{0,04}) _{1,12} S _{1,0}
5,26		63,29	1,45	(Zn _{0,99} Fe _{0,1}) _{1,09} S _{1,0}

ковеллина предусматривает выделение двух медных «головок» в технологической схеме.

На Александринской ОФ стадия рудоподготовки — двухстадиальное дробление с предварительным и поверочным грохочением во второй стадии и трехстадиальное измельчение. Крупность исходной руды составляет — 500+150 мм. Конечная крупность дробленой рудной фракции, направляемой на измельчение — 20+0 мм. Конечная крупность измельчения составляет 90–95 % класса —0,074 мм. Руды обогащаются по схеме прямой селективной флотации с получением медных, цинковых концентратов и отвальных хвостов. В процессе обогащения выделяются две медные «головки»; хвосты медных «головок» направляются на медную флотацию, включающую основную, переречистную и контрольную операции, а также на цинковую флотацию, содержащую основную, три переречистных и контрольную операции. Пенный продукт медных «головок» и переречистки является готовым медным концентратом, пенный продукт основной цинковой флотации — цинковым концентратом. Хвосты контрольной цинковой флотации направляются в хвостохранилище и содержат 0,25 % Cu и 0,52 % Zn, что говорит о недостаточном раскрытии минералов и о необходимости в изменении технологических режимов флотации, позволяющих снизить содержание меди в цинковом концентрате, цинка — в медном концентрате. Все необходимые операции и последовательность их выполнения должны быть строго регламентированы нормативными документами.

Медно-цинково-колчеданные руды Учалинского и Узельгинского месторождений, перерабатываемые на Учалинской ОФ отличаются большим разнообразием минерального состава. Они относятся к категории труднообогатимых и характеризуются высокой флотационной способностью активированного сфалерита, неравномерной вкрапленностью сульфидных минералов, доходящей до эмульсионной, и повышенным содержанием цинка (отношение содержания меди к цинку в руде составляет 1:3).

Обогащение руды Учалинского и Узельгинского месторождений проводится по схеме коллективно-селективной флотации после трехстадиального дробления и трехстадиального измельчения до крупности 96 % класса —0,074 мм. Перед разделением коллективный концентрат доизмельчается до класса —0,044 мм (90–95 %). Медный концентрат перед переречистками измельчается до класса —0,044 мм (100 %), так же как и цинковый, который извлекается из хвостов контрольной медной флотации. Хвосты контрольной цинковой флотации являются готовым пиритным концентратом. Готовый медный концентрат содержит 16–18 % Cu при извлечении 78–82 %, цинковый — 48–49 % Zn.

Медный цикл включает: выделение медной «головки», содержащей 17–18 % меди (на медной руде — до 20 %); I и II коллективную флотацию; цикл селективной, включающий основную и три переречистные операции, позволяющие повысить содержание меди в пенном продукте переречистки до 14–15 %. Цинковый

цикл флотации включает: две основных и три переречистных операции. После трех ступеней переречистки грубый цинковый концентрат подвергается обезжелезиванию и обезжелезению путем проведения медно-пиритовой флотации, с получением камерного продукта — цинкового концентрата и медно-пиритного промпродукта. Хвосты обогащения являются камерным продуктом второй коллективной флотации и содержат 0,2–0,4 % Cu и 0,61–0,95 % Zn, что говорит о необходимости совершенствования технологических схем обогащения и дополнительного изучения вещественного состава руд для исключения попадания переошламованных частиц в хвосты обогащения.

В век прогрессивных современных технологий и истощения минеральных природных ресурсов действующих горно-обогатительных предприятий остро стоит вопрос о рациональном недропользовании, требующем разработки методических документов, основанных на исследованиях научными коллективами организаций различной ведомственной принадлежности, которые позволят учесть все технологические особенности руд при оценке их на обогатимость. Методические документы должны быть ориентированы на традиционный базовый комплекс методов минералогического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамов, Э.В. Технология руд цветных металлов / Э.В. Адамов: Учеб. для вузов — М.: Учеба, 2007. — 514 с.
2. Бетехтин, А.Г. Курс минералогии: Учеб. пособие — 2-е издание, испр. и доп. / А.Г. Бетехтин / Под науч. ред. Б.И. Пирогова и Б.Б. Шкурского. — М.: КДУ, 2008. — 736 с.
3. Горбатова, Е.А. Минералогические и структурно-текстурные особенности колчеданных руд Учалинского месторождения, влияющие на процессы физико-химической геотехнологии / Е.А. Горбатова, Е.А. Емельяненко // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — 2009. — №1 (2). — С. 10–12.
4. Горбатова, Е.А. Минералого-технологическая оценка отходов обогащения колчеданных руд Южного Урала: Автореф. дисс... доктора геол.-минер. наук: 25.00.05. / Е.А. Горбатова. — М., 2013. — 41 с.
5. Масленников, В.В. Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала) / В.В. Масленников. — Миасс: Геотур, 1999. — 348 с.
6. Наинг Лин, У. Повышение селективности флотации колчеданных медно-цинковых руд с использованием модификаторов флотации пирита на основе соединений железа (II): Автореф. дисс... канд. техн. наук: 25.00.13. / Наинг Лин У. — М., 2015. — 26 с.
7. Ожогина, Е.Г. Прогнозная оценка качества минерального сырья / Е.Г. Ожогина // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 4. — С. 68–70.
8. Пшеничный, Г.Н. Текстуры и структуры руд месторождений колчеданной формации Южного Урала / Г.Н. Пшеничный / Отв. ред. Т.Н. Шадлун. — М.: Наука, 1984. — 207 с.
9. Тесалина, С.Г. Александринское медно-колчеданное месторождение / С.Г. Тесалина, В.В. Масленников, Т.Н. Сурин. — Миасс: ИМин УрО РАН, 2001. — 315 с.
10. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала / Под общ. ред. В.А. Чантурия, И.В. Шадруновой; Ин-т проблем комплекс. освоения недр РАН. — М.: Наука, 2016. — 316 с.
11. Ярош, П.Л. Структуры руд и история формирования рудных агрегатов Узельгинского месторождения / П.Л. Ярош, Ф.П. Буславев. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. — 100 с.

© Горбатова Е.А., Емельяненко Е.А., Ожогина Е.Г., 2019

Горбатова Елена Александровна // lena_gorbatova@mail.ru
Емельяненко Елена Алексеевна // emv31@mail.ru
Ожогина Елена Германовна // vims-ozhogina@mail.ru