www.rudmet.ru

ISSN 0372-2929

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1926 г.
(№ 912)

12. 2018

Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов»

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Журнал выпускается при участии: ПАО «ГМК «Норильский никель», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ФГБУК «Государственный Эрмитаж»;

при содействии: ГП «Навоийский горно-металлургический комбинат», Научно-технического союза по горному делу, геологии и металлургии (Республика Болгария)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор **Ю. А. Король**

Первый зам. главного редактора **А. В. Сысоев**

Зам. главного редактора **А. Г. Воробьев**

З. С. Абишева, Р. Х. Акчурин, М. В. Астахов (редактор раздела «Наноструктурированные металлы и материалы»), **В. Ю. Бажин, Н. А. Белов** (редактор раздела «Металлообработка»), **В. А. Бочаров** (редактор раздела «Обогащение»), **Г. Ю. Боярко, В. Н. Бричкин, В. А. Брюквин, Г. М. Вольдман** (редактор раздела «Редкие металлы, полупроводники»), **Н. В. Воробьев-Десятовский, В. В. Генеvски, Л. А. Глазунов, Ю. Ф. Гнедин, В. А. Дмитриев, А. М. Дриц, А. В. Зиновьев, В. А. Игнаткина, М. Г. Исаенкова, В. С. Кальченко, С. В. Киреев, С. С. Киров, Б. Г. Киселёв, П. А. Козлов, С. И. Корнеев, Б. А. Котляр** (редактор раздела «Экономика и управление производством»), **Ю. А. Котляр, В. А. Крюковский** (редактор раздела «Легкие металлы, углеродные материалы»), **Ф. Д. Ларичкин, А. Б. Лебедь, Е. А. Левашов** (редактор раздела «Композиционные материалы и многофункциональные покрытия»), **Ю. В. Левинский, Г. С. Макаров, Н. Е. Мальцев** (редактор раздела «Автоматизация»), **Ю. Н. Мансуров, М. А. Меретуков, А. М. Мицик, В. И. Москвитин, С. С. Набойченко, А. И. Николаев, В. В. Пронников, А. М. Птицын, В. К. Румянцев, А. Г. Рыжов, Ф. М. Сафин, Е. Н. Селиванов, Л. С. Стрижко, А. В. Тарасов, А. Н. Фёдоров, Л. Ш. Цемехман, Л. Б. Цымбулов** (редактор раздела «Тяжелые цветные металлы»), **И. И. Чернов, М. Р. Шапировский, Н. В. Шаркина** (редакционный координатор), **В. И. Щёголев**.

Зарубежные члены редколлегии: **Ж. Баатархуу** (Монголия), **В. В. Генеvски** (Болгария), **Д. Дрейсингер** (Канада), **Е. Жак** (Австралия), **К. Кнуути** (Финляндия), **Б. Фридрих** (Германия).

РЕДАКЦИЯ:

зам. главного редактора **А. Г. Воробьев**; редакционный координатор и выпускающий редактор **Н. В. Шаркина**;

ведущий редактор **А. Ю. Слепцова**; редактор **Е. Ю. Рахманова**;

корректор **Ю. И. Королёва**;

ответственные за предпечатную подготовку издания **О. Ю. Жукова, Д. И. Воробьева**.

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, а/я № 71

Адрес редакции: Москва, Ленинский просп., д. 6,
стр. 2, НИТУ «МИСиС», комн. 624
Почтовый адрес: 119049, Москва, а/я № 71
Тел./факс: (495) 955-01-75; моб.: 8-926-504-89-75
Эл. почта: tsvetmet@rudmet.ru; интернет: www.rudmet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)
(Свидетельство ПИ № ФС77-69818 от 29.05.2017 г.).
Товарный знак и название «Цветные металлы»
являются исключительной собственностью
Издательского дома «Руда и Металлы».

Материалы, отмеченные «Реклама», публикуются
на правах рекламы.

За достоверность рекламной информации
ответственность несет рекламодатель.

Все публикуемые материалы научно-технического
характера проходят обязательную стадию рецензи-
рования.

За достоверность научно-технической информации
ответственность несет автор.

За сроки размещения опубликованных статей
в базе данных Scopus редакция ответственности
не несет.

Перепечатка, все виды копирования
и воспроизведение материалов, публикуемых
в журнале, возможна только с письменного
разрешения редакции.

При перепечатке ссылка на журнал «Цветные
металлы» обязательна.

Отпечатано в типографии «Канцлер»
Адрес типографии: 150044, Россия, Ярославль,
ул. Полушкина роща, д. 16, стр. 66А,
тел.: 8(4852)58-76-33

Подписано в печать с оригинал-макета 21.12.2018.
Формат 60х90 1/8. Печ. л. 12,5. Бумага офсетная.
Печать офсетная.
Тираж 1500 экз. Цена свободная.
Дата выхода из печати 14.01.2019.

ISSN 0372-2929

9 770372 292006 >

Содержание

Экономика и управление производством

Международный обзор рынка цветных металлов	4
Мамаджанов Х. А., Сергеева А. М., Мансуров С. Ю., Мансуров Ю. Н. Особенности технологии непрерывного литья алюминиевых сплавов и оценки ее эффективности	6

Обогащение

Горлова О. Е., Юн А. Б., Синянская О. М., Медяник Н. Л. Разработка и опытно-промышленные испытания комбинированной технологии переработки отвала труднообогатимых смешанных медных руд месторождения Тасгора	14
Плотникова А. А., Брагин В. И. Повышение сортности свинцовых концентратов магнитными методами	21

Тяжелые цветные металлы

Заблюцкая Ю. В., Садыхов Г. Б., Хасанов М. Ш., Смирнова В. Б. Кинетика выщелачивания никеля серной кислотой из восстановленной лимонитовой руды Буруктальского месторождения	27
---	----

Благородные металлы и их сплавы

Рогожников Д. А., Русалев Р. Э., Дизер О. А., Набойченко С. С. Азотнокислотное вскрытие упорных сульфидных концентратов, содержащих благородные металлы	38
Гуляшинов П. А., Палеев П. Л., Субанакоев А. К., Гуляшинов А. Н. Исследование процесса термического разложения золотосодержащих концентратов с повышенным содержанием мышьяка	44

Редкие металлы, полупроводники

Смирнова К. А., Дробот Д. В., Мусатова В. Ю., Светогоров Р. Д. Синтез и свойства ниобата меди (I), полученного методом сверхкритического флюидного антисольвентного осаждения	49
--	----

Композиционные материалы и многофункциональные покрытия

Акопян Т. К., Летягин Н. В., Дорошенко В. В. Алюмоматричные композиционные сплавы на основе системы Al – Ca – Ni – Se, упрочняемые наночастицами фазы L_{12} без использования закалки	56
Сокорев А. А., Мишуров С. С., Наумова Е. А., Летягин Н. В. Исследование гранулометрического состава промышленных отходов для литейного производства	63

Материаловедение

Исаенкова М. Г., Перлович Ю. А., Юдин А. В., Рубанов А. Е. Формирование кристаллографической текстуры в образцах различной геометрии из сплава ВТ1-0, полученных методом селективного лазерного плавления порошка	69
Маркова Г. В., Касимцев А. В., Володько С. С., Алимов И. А. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства порошкового сплава TiNi. Часть 2	75

Металлообработка

Дриц А. М., Овчинников В. В., Бакшаев В. А. Механические свойства соединений плит сплава АД0 при аргонодуговой сварке и сварке трением с перемешиванием	82
Ямников А. С., Ямникова О. А., Чуприков А. О., Харьков А. И. Влияние заднего угла и параметров упрочняющей фаски керамических резьбовых резцов на стойкость	88

Хроника

Король Ю. А. Комбинату «Южуралникель» — 80 лет	32
Коллеги: о плодотворном сотрудничестве с журналом «Цветные металлы»	55
ПОРТНОЙ Владимир Кимович	92
Памяти большого учителя. Ю. Н. Мансуров	92
ТИМОФЕЕВ Николай Иванович	93
Содержание журнала «Цветные металлы» за 2018 год	94

Реклама

23-я Международная выставка Mining World Russia	4-я с. обл.
---	-------------

*Журнал включен в Международные базы данных Scopus (2-й квартиль, 2017),
а также Chemical Abstracts Service*

Пятилетний импакт-фактор **РИНЦ** (2017) без самоцитирования **0,334**

Журнал по решению ВАК Минобразования РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по разработке месторождений твердых полезных ископаемых, по металлургии, по экономике, по химии.

*Статьи всех авторов, в том числе аспирантов, публикуются в порядке общей очереди бесплатно
(за исключением статей рекламного характера).*

Повышение сортности свинцовых концентратов магнитными методами

УДК 622.778:669.4

А. А. Плотникова, аспирант¹, эл. почта: alena_plotnikova_0909@inbox.ru
В. И. Брагин, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Основная проблема получения кондиционных концентратов при переработке свинцово-цинковых руд обусловлена прежде всего особенностями их вещественного состава, а также характером ассоциаций ценных минералов как между собой, так и с минералами пустой породы. Повышение показателей обогащения свинцово-цинковых руд может быть достигнуто применением технологических схем, основанных на использовании нескольких методов обогащения, базирующихся на различных физических свойствах минералов. С целью изучения состава сфалерита в рудах Горевского месторождения выполнен анализ вещественного состава фабричного цинкового концентрата. Оценены причины повышенной магнитной восприимчивости сфалерита. Установлено, что сфалерит в цинковом концентрате в основном ассоциирован с галенитом, в меньшей степени — с пиритом, пирротинном, кварцем и сидеритом. Сфалерит — сильно железистый, среднее содержание железа в нем 6,63 % (мас.). Поэтому более 64 % всего железа, содержащегося в концентрате, приходится на сфалерит.

С целью повышения сортности флотационного свинцового концентрата и снижения потерь в нем цинка рассмотрена возможность использования метода высокоградиентной магнитной сепарации. При этом в магнитный продукт переходят железосодержащий сфалерит, свободные зерна пирротина и сидерита, галенит остается в немагнитной фракции. Определено, что введение операции высокоградиентной магнитной сепарации при напряженности магнитного поля 880 кА/м в качестве перечистной для фабричного свинцового концентрата Горевского месторождения позволяет в один прием повысить содержание свинца в перечищенном свинцовом концентрате на 23,04 % и снизить содержание в нем цинка с 4,91 до 1,5 %, извлечение свинца при этом составляет 73,41 %. Извлечение цинка в магнитный продукт составляет 84,07 % при его содержании 8,6 %.

Ключевые слова: свинцово-цинковые руды, фазовый состав, микрорентгеноспектральный анализ, высокоградиентная магнитная сепарация, концентрат, содержание, извлечение.

DOI: 10.17580/tsm.2018.12.03

Введение

Месторождения свинца и цинка наряду с месторождениями меди выступают основным источником сырья для цветной металлургии, в том числе благородных металлов, и для химической промышленности [1, 2]. Руды свинцово-цинковых месторождений являются комплексными и содержат помимо свинца и цинка, медь, сурьму, висмут, олово. Попутными компонентами руд являются кадмий, серебро, золото, селен, теллур, германий, таллий, галлий, индий [3]. По минеральному составу свинцово-цинковые руды относительно простые, содержат галенит, сфалерит, пирит, марказит, церуссит и др., но чаще всего тонко вкраплены и затронуты процессами окисления, вследствие чего являются труднообогащаемыми. Основным методом обогащения свинцово-цинковых руд является флотация [4, 5]. Гравитационные методы обычно используют лишь в качестве предварительного обогащения [6, 7]. Магнитные методы обогащения для свинцово-цинковых руд не находят широкого применения, кроме случаев, когда цинк в рудах представлен магнитным минералом — франклинитом [8, 9]. Основные сложности получения

кондиционных концентратов для свинцово-цинковых руд связаны прежде всего с особенностями их вещественного состава. В последнее время в связи с отработкой запасов сырья относительно высокого качества обогатительным предприятиям приходится перерабатывать руды с низким содержанием ценных компонентов, тесным их взаимопроращением между собой и с минералами пустой породы [10, 11].

Таким образом, вовлечение в переработку сложных свинцово-цинковых руд предопределяет актуальность совершенствования технологического процесса переработки с целью повышения технологических показателей обогащения и повышения уровня комплексности использования сырья.

Основным носителем цинка в свинцово-цинковых рудах выступает сульфид цинка — сфалерит [12, 13]. Разновидностями сфалерита являются: клейофан — светлоокрашенная или бесцветная (почти без примесей); марматит — черная железистая; пршибраммит — богатая кадмием (до 5 % Cd) [14]. Чистый сфалерит редко присутствует в природе, обычно он содержит до 15 % (мол.) Cd и до 4 % Mn, замещающих Zn, а также небольшие количества Ga, Ge, In, Co и Hg [15]. Наиболее распространенной примесью сфале-

рита является железо, содержание которого может достигать 26 % (мол.), хотя существуют данные о его содержании до 56 % (мол.) [16, 17]. Присутствие железа в решетке сфалерита оказывает существенное влияние на его поверхностные и флотационные свойства [18–20]. Изоморфная примесь железа также оказывает ярко выраженное влияние на магнитные и электрические свойства сфалерита и ведет к увеличению его удельной магнитной восприимчивости, которая может достигать $25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$. Дополнительное влияние на магнитные свойства сфалерита оказывает тонкодисперсная примесь железосодержащих минералов (оксиды железа, сидерит и пирротин) [21, 22].

Таким образом, особенность железосодержащего сфалерита, выражающаяся в проявлении им слабомагнитных свойств, является предпосылкой использования методов магнитной сепарации с целью его извлечения.

Цель работы заключалась в повышении сортности фабричного свинцового концентрата и снижении содержания в нем цинка путем его перемелывания на высокоградиентном магнитном сепараторе.

Объект исследований

Исследованию подвергали фабричный свинцовый концентрат Горевского месторождения. Руды Горевского месторождения относятся к пирротин-сфалерит-галенитовому минеральному типу с различным соотношением свинца и цинка. В настоящее время наиболее активно разрабатывают руды с явным преобладанием свинца над цинком — 4:1. Основные рудные минералы представлены галенитом и сфалеритом. Отличительной особенностью руд является состав сфалерита, основными компонентами которого являются сера, цинк и железо, причем содержание Fe варьирует от 7,07 до 10,16 % (мас.), в среднем составляя 8,31 % (мас.) [23].

Методы исследований

С целью получения дополнительных данных о составе сфалерита Горевского месторождения были проведены различные виды анализов фабричного цинкового концентрата. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3, излучение $\text{Cu } K_\alpha$ с шагом сканирования 0,02 град, временем накопления в точке — 1 с. Микрорентгеноспектральный анализ выполняли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN TIMA (Брно, Чехия).

Высокоградиентную магнитную сепарацию проводили на сепараторе, который относится к группе полиградиентных с подвижными (регенерируемыми) ферромагнитными осадительными элементами. В качестве

осадительных элементов использовали шары и стальную вату. Магнитная система сепаратора замкнутая, позволяет генерировать магнитное поле до 880 кА/м в рабочей зоне (шхдхв) 50×125×120 мм. В качестве носителя магнитного продукта применяли буровую дробь крупностью 5 мм.

Для определения фазового состава полученные магнитный и немагнитный продукты обогащения были исследованы РФА на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3, излучение $\text{Cu } K_\alpha$ с шагом сканирования 0,02 град, временем накопления в точке — 1 с. Дифрактограммы продуктов обогащения приведены на рис. 1.

Для изучения характера микрострастаний и взаимовлияния минералов магнитный и немагнитный продукты исследовали с применением микрорентгеноспектрального анализа, который выполняли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi TM-3000 (Япония) с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия). Результаты микрорентгеноспектрального анализа продуктов обогащения представлены на рис. 2.

Рис. 1. Дифрактограмма магнитного (а) и немагнитного (б) продуктов, полученных при перемелывании фабричного свинцового концентрата

Результаты и их обсуждение

Анализ вещественного состава фабричного цинкового концентрата Горевского месторождения показал, что для него характерно высокое содержание железа. По минеральному составу: цинк в цинковом концентрате представлен сфалеритом, свинец представлен галенитом, железо встречается в виде сидерита, пирротина, пирита. При этом сфалерит в цинковом концентрате в основном ассоциирован с галенитом, в меньшей степени — с пиритом, пирротинном, кварцем и сидеритом. Сфалерит сильно железистый, среднее содержание железа в нем 6,63 % (мас.), в связи с чем более 64 % всего железа, содержащегося в концентрате, приходится на сфалерит. Кроме этого, сфалерит находится в тесной ассоциации с пирротинном и пиритом, что дает вклад в общее содержание железа еще 17,16 и 4,56 % соответственно. Еще одним источником железа в концентрате является сидерит, на долю которого приходится 13 % от общего железа, другие сульфиды и силикаты дают вклад в общее содержание железа менее 1 %. Размер частичек сфалерита в цинковом концентрате, свободного от сростков с другими минералами, варьирует от 5–15 мкм. Отмечается наличие сложных сростков сфалерита с минералами железа, размер включений сфалерита в которых варьирует от 5–15 мкм, часто присутствуют мелкие включения галенита, размером менее 5 мкм.

На основании полученных данных о составе сфалерита в рудах Горевского месторождения в ходе исследований изучали возможность использования метода высокоградиентной магнитной сепарации для удаления из фабричного свинцового концентрата сфалерита, ассоциированного с минералами железа. При этом железосодержащий сфалерит будет переходить в магнитный, а галенит — в немагнитный продукты обогащения.

Фабричный свинцовый концентрат крупностью 85 % класса 0,074 мм, подвергали высокоградиентной магнитной сепарации при напряженности магнитного поля 880 кА/м с получением магнитного (цинковый промпродукт) и немагнитного (перечищенный свинцовый концентрат) продуктов. Затем в три этапа осуществляли перемещение магнитной фракции путем ступенчатого снижения напряженности магнитного поля. Полученные продукты обогащения подвер-

гали исследованию РФА и микрорентгеноспектральным методом.

По данным РФА в магнитный продукт, помимо сфалерита (ZnS , $d = 0,3134; 0,1916; 0,1636$ нм JCPDS, 5-566), переходит галенит (PbS , $d = 0,344; 0,298; 0,2103$ нм JCPDS, 5-592) и незначительное количество пирротина (Fe_7S_8 , $d = 0,265$ нм JCPDS, 5-566). Из породообразующих обнаружен кварц (SiO_2 , $d = 0,427; 0,335; 0,199$ нм JCPDS, 46-1045) и сидерит (FeCO_3 , $d = 0,36; 0,28; 0,235; 0,15; 0,14$ нм JCPDS, 29-696). В немагнитный продукт переходит галенит (PbS , $d = 0,344; 0,298; 0,2103$ нм JCPDS, 5-592), в небольшом количестве присутствует сфалерит (ZnS , $d = 0,3134; 0,1916; 0,1636$ нм JCPDS, 5-566). Из породообразующих обнаружен кварц (SiO_2 , $d = 0,427; 0,335; 0,199$ нм JCPDS, 46-1045) и сидерит (FeCO_3 , $d = 0,36; 0,28; 0,15$ нм JCPDS, 29-696).

По результатам электронно-микроскопического анализа в магнитный продукт переходит сфалерит,

Рис. 2. Изображение, полученное на СЭМ для магнитного (а–с) и немагнитного (д, е) продуктов, полученных при перемещении фабричного свинцового концентрата:
1 — галенит; 2 — сфалерит; 3 — кварц; 4 — минералы железа

ассоциированный с минералами железа, размер включений сфалерита в сложных сростках варьирует от 5 до 15 мкм, часто отмечаются прожилки сфалерита шириной менее 5 мкм. Галенит в магнитном продукте находится в сложных сростках со сфалеритом и минералами железа, размер включений галенита составляет 5–15 мкм, часто отмечаются тонкие включения галенита в виде прожилок. Присутствие в немагнитном продукте сфалерита объясняется тонким срастанием сфалерита с галенитом в богатых по галениту сростках, где размеры включений сфалерита составляют 5–10 мкм.

В ходе дальнейших исследований разрабатывали режим проведения высокоградиентной сепарации фабричного свинцового концентрата руды Горевско-го месторождения. Высокоградиентную сепарацию проб проводили согласно схеме, представленной на рис. 3.

На первом этапе исследований фабричный свинцовый концентрат, полученный по схеме селективной флотации, без предварительной обработки подвергали разделению на высокоградиентном магнитном

Рис. 3. Схема обогащения фабричного свинцового концентрата

сепараторе при различной напряженности магнитного поля. Результаты испытаний представлены в таблице.

По результатам опытов установлено, что при увеличении напряженности поля в интервале 120–880 кА/м содержание свинца в перечищенном свинцовом концентрате увеличивается, а содержание цинка снижается. Установлено, что повышение напряженности магнитного поля до 880 кА/м позволяет увеличить содержание свинца в перечищенном концентрате на 23,04 % и снизить содержание цинка с 4,91 до 1,5 %, извлечение свинца при этом составляет 73,41 %.

Следующие опыты высокоградиентной магнитной сепарации проводили с предварительной десорбцией флотационных реагентов с поверхности флотационного свинцового концентрата. Наличие оставшихся реагентов после флотации может вызывать нежелательную флокуляцию частиц и снизить эффективность разделения магнитными методами [24]. Десорбцию флотационных реагентов с поверхности свинцового концентрата перед его разделением на высокоградиентном магнитном сепараторе осуществляли предварительной обработкой пульпы путем акустического воздействия в ультразвуковой ванне и предварительной пропаркой в среде сернистого натрия.

При десорбции флотационных реагентов с фабричного свинцового концентрата путем акустического воздействия в ультразвуковой ванне время обработки варьировали в интервале 0–10 мин. По результатам испытаний установлено, что обработка ультразвуком свинцового концентрата перед разделением на высокоградиентном сепараторе незначительно влияет на

Результаты высокоградиентной магнитной сепарации свинцового концентрата при различной напряженности магнитного поля						
Продукт	Напряженность магнитного поля, кА/м	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
			Pb	Zn	Pb	Zn
Перечищенный свинцовый концентрат	120	76	71,08	4,70	96,54	72,68
Промпродукт		24	8,05	5,60	3,45	27,38
Итого		100	55,96	4,91	100	100
Перечищенный свинцовый концентрат	240	64,6	79,42	4,48	91,68	58,91
Промпродукт		35,4	13,15	5,70	8,32	41,09
Итого		100	55,96	4,91	100	100
Перечищенный свинцовый концентрат	360	56,8	75,76	3,56	76,90	41,14
Промпродукт		43,2	29,92	6,69	23,10	58,86
Итого		100	55,96	4,91	100	100
Перечищенный свинцовый концентрат	480	52,8	78,57	3,23	74,13	34,73
Промпродукт		47,2	30,67	6,79	25,87	65,27
Итого		100	55,96	4,91	100	100
Перечищенный свинцовый концентрат	880	52	79	1,50	73,41	15,89
Промпродукт		48	31	8,60	26,59	84,11
Итого		100	55,96	4,91	100	100

технологические показатели обогащения. Так, предварительная обработка в течение 10 мин позволяет повысить извлечение в перечищенный свинцовый концентрат до 81,03 %, при этом содержание свинца в нем составляет 77,99 %.

При десорбции флотационных реагентов с фабричного свинцового концентрата пропаркой в среде сернистого натрия получены лучшие технологические показатели обогащения. Так, введение пропарки свинцового концентрата при расходе сернистого натрия 4 кг/т перед разделением на высокоградиентном сепараторе позволяет снизить содержание цинка в перечищенном свинцовом концентрате до 0,95 %, при этом содержание свинца в перечищенном свинцовом концентрате составило 81,6 %, извлечение — 80,74 %.

Заключение

В ходе исследований установлено, что введение операции высокоградиентной магнитной сепарации в качестве перечистной операции фабричного свинцового концентрата свинцово-цинковых руд Горевского месторождения позволяет в одну стадию повысить содержание свинца в нем на 23,04 % и снизить содержание цинка с 4,91 до 1,5 %, извлечение свинца при этом

составляет 73,41 %. Извлечение цинка в магнитный продукт составляет 84,07 % при его содержании 8,6 %.

Дополнительная обработка свинцового концентрата перед разделением на высокоградиентном магнитном сепараторе пропаркой в среде сернистого натрия позволяет улучшить технологические показатели обогащения. При этом в перечищенный свинцовый концентрат извлекается 80,74 % свинца с его содержанием 81,6 %, содержание цинка при этом составляет 0,95 %.

Изучение вещественного состава продуктов высокоградиентной магнитной сепарации показало, что эта операция эффективно удаляет из свинцового концентрата свободные зерна железосодержащих минералов — сфалерита, сидерита, пирротина, а также их сростки с галенитом.

Таким образом, введение высокоградиентной магнитной сепарации как доводочной операции позволяет исправить недостатки рудоподготовки, выделив в отдельный продукт нераскрытые сростки. При промышленной реализации метода промпродукт, полученный после высокоградиентной магнитной сепарации свинцового концентрата, целесообразно направлять на доизмельчение с последующим возвратом раскрытого материала на свинцовую флотацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Контарь Е. С.** Месторождения свинца и цинка в истории формирования земной коры // *Литосфера*. 2016. № 3. С. 5–26.
2. **Precious and base metals overview. Trends and facts for silver, gold, zinc and lead** Sotkamo Silver // *Metals International*. 2014. URL: http://www.silver.fi/tiedostot/reports/Technical%20reports/140303_Metals_International_Precious_and_base_metals_overview_LARGE.pdf (дата обращения 01.11.2018).
3. **Кушакова Л. Б., Шумский В. А., Браилко О. Ю.** Возможность извлечения попутных компонентов при переработке руд цветных металлов // *Цветные металлы*. 2016. № 9. С. 28–34.
4. **Червоний И. Ф., Бредихин В. Н., Грицай В. П.** Цветная металлургия Украины. Т. 1. Ч. 1. Металлы и их классификация, обогащение руд цветных металлов, легкие цветные металлы. — Запорожье : ЗГИА, 2014. — 380 с.
5. **Алгебраистова Н. К., Маркова А. С., Прокопьев И. В., Развязная А. В.** К проблеме подготовки коллективных концентратов к циклу селекции // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016. № 1. С. 187–194.
6. **Jacek Kolacz.** Advanced separation technologies for pre-concentration of metal ores and the additional process control // *Mineral Engineering Conference*. 2017. Vol. 18. P. 1–4.
7. **Siging Liu, Xiujuan Li, Yang Zhao, Tingting Li.** Benefication of a low grade lead ore by gravity pre-concentration and flotation // *Applied Mechanism and Materials*. 2013. Vol. 387. P. 11–14.
8. **Абрамов А. А.** Технология переработки и обогащения руд цветных металлов : учебное пособие для вузов. Кн. 2. — М. : Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. — 470 с.
9. **Абрамов А. А.** Флотационные методы обогащения : учебное пособие. — М. : Горная книга, 2008. — 710 с.
10. **Чантурия В. А., Козлов А. П.** Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // *Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья* (Плак-синские чтения – 2017) : материалы Международной научной конференции, Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. С. 3–6.
11. **Семущкина Л. В., Турысбеков Д. К., Бектурганов Н. С., Муханова А. А.** Совершенствование технологии обогащения тонковкрапленной свинцово-цинковой руды месторождения Шалкия // *Обогащение руд*. 2015. № 2. С. 8–14. DOI: 10.17580/or.2015.02.02
12. **Бетехтин А. Г.** Курс минералогии : учебное пособие. — М. : КДУ, 2007. — 736 с.
13. **Cao L., Huang S., Shulin E.** ZnS/CdS/ZnS quantum dot quantum well produced in inverted micelles // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 273. P. 478–482.
14. **Sue Marcus.** Mineral of the month : Sphalerite // *The Mineral Newsletter*. 2017. Vol. 58, No. 7. P. 2–4.
15. **Cook N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F.** Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73. P. 4761–4791.
16. **Patrick R. A. D., Mosselmans J. F. W., Charnock J. M.** An X-ray absorption study of doped sphalerites // *Eur. J. Mineral*. 1998. No. 10. P. 239–249.
17. **Di Benedetto F., Andreozzi G. B., Bernardini G. P., Borgheresi M., Caneschi A., Cipriani C., Gatteschi D., Romanelli M.** Short-range order of Fe²⁺ in sphalerite by ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy and magnetic susceptibility // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2005. Vol. 32, Iss. 5. P. 339–348.
18. **Gulyaeva R. I., Selivanov E. N., Dorogina G. A., Uporov S. A., Pryanichnikov S. V.** Structure and physical properties of natural sphalerites and galena from the Dal'negorsk deposit in the temperature range 4–300 // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58, No. 8. P. 990–999.
19. **Wright K., Gale J. D.** A first principles study of the distribution of iron in sphalerite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. P. 3514–3520.

20. **Chen Jian-hua, Chen Ye, Li Yu-qiong.** Effect of vacancy defects on electronic properties and activation of sphalerite surface by first-principles // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2010. Vol. 20. P. 502–506.
21. **Pearce C. I., Patrick R. A. D., Vaughan D. J.** Electrical and Magnetic Properties of Sulfides // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2006. Vol. 61. P. 127–180.
22. **Sloboda J.** *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. — USA : Springer Science, 2004. — 576 p.

23. **Глумова А. А., Брагин В. И.** Повышение качества свинцового концентрата путем его перемешивания на высокоградиентном магнитном сепараторе // Сборник материалов XV международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014». — Кемерово, КузГТУ, 2014. С. 85.
24. **Jirestig J., Forssberg E.** Magnetic characterization examples from Sweden // *Magnetic and Electrical Separation*. 1992. Vol. 4. P. 31–45.

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2018. No. 12. pp. 21–26
DOI: 10.17580/tsm.2018.12.03

USE OF MAGNETIC TECHNIQUES FOR LEAD CONCENTRATE UPGRADING

Information about authors

A. A. Plotnikova, Postgraduate Student¹,
e-mail: alena_plotnikova_0909@inbox.ru
V. I. Bragin, Head of Mineral Beneficiation Department¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract

The biggest problem for obtaining commercial concentrates from lead-zinc ores is primarily related to the composition of such ores, as well as the nature of associations formed by valuable minerals with one another and with the gangue minerals. Better beneficiation indicators for lead-zinc ores could be achieved through the use of processes that combine several beneficiation techniques, which are related to different physical properties of minerals. To understand the composition of sphalerite contained in the Gorevsk deposit ores, the authors analysed the composition of zinc concentrate produced by the concentration plant. The authors also looked at possible causes of the high magnetic susceptibility in sphalerite. It was established that in zinc concentrate, sphalerite is mainly associated with galenite, and to a lesser degree — with pyrite, pyrrhotite, quartz and siderite. Sphalerite is rich in iron, the average concentration of iron in it is 6.63 wt.%. That's why sphalerite accounts for more than 64% of all the iron contained in the concentrate.

The authors also looked at the possibility to use high-gradient magnetic separation to enhance the quality of the flotation lead concentrate and reduce zinc losses. During high-gradient magnetic separation, iron-containing sphalerite, as well as unbonded grains of pyrrhotite and siderite, transfer to the magnetic product, while galenite remains in the non-magnetic part. The authors found that the introduction of high-gradient magnetic separation with the magnetic force of 880 kA/m as a recleaner stage for the lead concentrate of the Gorevsk deposit helps increase the lead concentration in the recleaner lead concentrate by 23.04% and, at the same time, reduce the concentration of zinc from 4.91 to 1.5%. The recovery of lead can reach 73.41%. The magnetic recovery of zinc can reach 84.07%, with the concentration of 8.6%.

Key words: lead-zinc ores, phase composition, micro X-ray spectral analysis, high-gradient magnetic separation, concentrate, concentration, recovery.

References

1. Kontar E. S. Lead and zinc deposits in the history of Earth's crust. *Litosfera*. 2016. No. 3. pp. 5–26.
2. Precious and base metals overview. Trends and facts for silver, gold, zinc and lead. *Sotkamo Silver. Metals International*. 2014. Available at: http://www.silver.fi/tiedostot/reports/Technical%20reports/140303_Metals_International_Precious_and_base_metals_overview_LARGE.pdf (Accessed: 01.11.2018).
3. Kushakova L. B., Shumskiy V. A., Brailko O. Yu. Possibility of extraction of secondary constituents during non-ferrous metal ore processing. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 9. pp. 28–34.
4. Chervony I. F., Bredikhin V. N., Gritsay V. P. Non-ferrous metallurgy of Ukraine. Vol. 1. P. 1. Metals and their classification, beneficiation of non-ferrous metal ores, light non-ferrous metals. Zaporozhie : ZGIA, 2014. 380 p.
5. Algebraistova N. K., Markova A. S., Prokoviev I. V., Razvyaznaya A. V. On preparation of bulk concentrates for the selection cycle. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2016. No. 1. pp. 187–194.

6. Jacek Kolacz. Advanced separation technologies for pre-concentration of metal ores and the additional process control. *Mineral Engineering Conference*. 2017. Vol. 18. pp. 1–4.
7. Siging Liu, Xiujuan Li, Yang Zhao, Tingting Li. Beneficiation of a low grade lead ore by gravity pre-concentration and flotation. *Applied Mechanism and Materials*. 2013. Vol. 387. pp. 11–14.
8. Abramov A. A. Processing and beneficiation of non-ferrous metal ores: Guide for university students. Book 2. Moscow : Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005. 470 p.
9. Abramov A. A. Beneficiation through flotation: Learner's guide. Moscow : Gornaya kniga, 2008. 710 p.
10. Chanturiya V. A., Kozlov A. P. Integrated processing of complex ores and manmade materials: Current problems. *Plaksin readings – 2017: Proceedings of the International Science Conference, Krasnoyarsk, 12–15 September 2017*. Krasnoyarsk : Sibirsky federalny universitet, 2017. pp. 3–6.
11. Semushkina L. V., Turybekov D. K., Bekturganov N. S., Mukhanova A. A. The Shalkiya deposit finely disseminated lead-zinc ore processing technology improvement. *Obogashchenie Rud*. 2015. No. 2. pp. 8–14. DOI: 10.17580/or.2015.02.02
12. Betekhtin A. G. A course in Mineralogy: Learner's guide. Moscow : KDU, 2007. 736 p.
13. Cao L., Huang S., Shulin E. ZnS/CdS/ZnS quantum dot quantum well produced in inverted micelles. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 273. pp. 478–482.
14. Sue Marcus. Mineral of the month sphalerite. *The Mineral Newsletter*. 2017. Vol. 58, No. 7. pp. 2–4.
15. Cook N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukut B., Melcher F. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73. pp. 4761–4791.
16. Patrick R. A. D., Mosselmans J. F. W., Charnock J. M. An X-ray absorption study of doped sphalerites. *European Journal of Mineralogy*. 1998. No. 10. pp. 239–249.
17. Di Benedetto F., Andreozzi G. B., Bernardini G. P., Borgheresi M., Caneschi A., Cipriani C., Gatteschi D., Romanelli M. Short-range order of Fe²⁺ in sphalerite by ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy and magnetic susceptibility. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2005. Vol. 32. Iss. 5. pp. 339–348.
18. Gulyaeva R. I., Selivanov E. N., Dorogina G. A., Uporov S. A., Pryanichnikov S. V. Structure and physical properties of natural sphalerites and galena from the Dal'negorsk deposit in the temperature range 4–300. *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58. No. 8. pp. 990–999.
19. Wright K., Gale J. D. A first principles study of the distribution of iron in sphalerite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. pp. 3514–3520.
20. Chen Jian-hua, Chen Ye, Li Yu-qiong. Effect of vacancy defects on electronic properties and activation of sphalerite surface by first-principles. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010. Vol. 20. pp. 502–506.
21. Pearce C. I., Patrick R. A. D., Vaughan D. J. Electrical and Magnetic Properties of Sulfides. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2006. Vol. 61. pp. 127–180.
22. Sloboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. USA : Springer Science, 2004. 576 p.
23. Glumova A. A., Bragin V. I. Improving the quality of lead concentrate by recleaning in a high-gradient magnetic separator: *Proceedings of the 15th international conference "Natural and intellectual resources of Siberia. Sibresurs 2014"*. Kemerovo, KuzGTU, 2014. p. 85.
24. Jirestig J., Forssberg E. Magnetic characterization examples from Sweden. *Magnetic and Electrical Separation*. 1992. Vol. 4. pp. 31–45.