

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСКРЫТИЯ ЗЕРЕН МИНЕРАЛА МАГНЕТИТ НА СТАДИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ ГУСЕВОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

INVESTIGATION OF THE DISCLOSURE OF GRAINS OF THE MINERAL MAGNETITE AT THE STAGE OF ORE GRINDING OF THE GUSEVOGORSKY DEPOSIT

R. Titov,
senior researcher;
V. Kantemirov,
candidate of technical sciences,
head of the laboratory;
A. Yakovlev,
senior researcher,
Institute of Mining of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg

The article presents the results of studies on the assessment of the disclosure of the mineral magnetite in samples of magnetic material of titanomagnetite ores of different categories of enrichment crushed to a size class of -0,071 mm. It is determined that when the interspersed ores are crushed to a fraction of -0,071 mm, the maximum disclosure of the mineral magnetite occurs.

The results of the research allow us to establish optimal enrichment parameters at the stage of ore grinding to a fraction of -0,071 mm.

Keywords: titanomagnetite ore, mineral disclosure during grinding, grain size, size class, magnetic fraction, magnetite, mineralogical analysis.

Р. С. Титов,
старший научный сотрудник;
В. Д. Кантемиров,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией;
А. М. Яковлев,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
г. Екатеринбург.

Ключевые слова: титаномagnetитовая руда, раскрытие минерала при измельчении, размер зерна, класс крупности, магнитная фракция, магнетит, минералогический анализ.

принятые на предприятии технологические типы руд – легко, нормально и труднообогащаемые (табл. 1) [1-3].

Таблица 1

Характеристики проб титаномagnetитовой руды.

№ пробы	Характеристика отобранных проб		
	Обогащаемость руды	Содержание Fe _{общ}	Вмещающие породы
1	легкообогащаемая	14,6	Пироксениты диаллаговые крупнозернистого строения с крупношлировым типом оруденения
2	нормальнообогащаемая	16,6	Пироксениты диаллаговые среднезернистые с средневкрапленным оруденением
3	труднообогащаемая	16	Пироксениты диаллаговые тонкозернистого строения с тонкой вкрапленностью титаномagnetита

Химический состав проб представлен в табл. 2 [4].

Таблица 2

Содержание Fe в исследуемых исходных пробах.

№ пробы	Обогащаемость проб	Содержание Fe _{общ} в пробах, %		
		Fe _{общ}	FeO _{общ}	Fe ₂ O ₃ общ
1	Легкообогащаемая	14,94	19,23	21,37
2	Нормальнообогащаемая	14,00	18,01	20,01
3	Труднообогащаемая	15,38	19,79	21,99

В процессе исследований были установлены количественные распределения размеров зерен магнетита в недробленной руде разной категории обогащаемости и доля раскрытых зерен магнетита в магнитных фракциях измельченного рудного материала до фракции -0,071 мм.

Дробление кускового материала производилось на лабораторной щековой дробилке типа ДЛЩ 80×150 до круп-

Измельчение титаномagnetитовой руды Гусевогорского месторождения до фракции -0,071 мм является одной из основных стадий подготовки рудной массы к мокрой магнитной сепарации (ММС) на обогатительной фабрике (ОФ). Практикой установлено, что именно при измельчении вкрапленных руд до указанной фракции происходит максимальное раскрытие зерен магнетита и создаются условия для последующего его эффективного извлечения в концентрат. В процентном отношении содержание фракции -0,071 мм должно составлять в общем объеме измельченного материала не менее 90%.

Результаты исследований раскрываемости зерен магнетита позволяют обосновать оптимальную продолжительность и режимы измельчения вкрапленной руды в технологических процессах обогащения, установить стадийность выделения промпродуктов обогащения.

Лабораторные исследования проводились на крупнокусковых пробах (крупностью -60+40 мм) с различных участков Гусевогорского месторождения титаномagnetитов включая

ности -10 мм, с последующим его додроблением в валковой дробилке типа ДГ 200×125 и дроблением до фракции -1+0 мм.

Измельчение дробленого материала выполнялось на дисковом истирателе типа ИД-175 до крупности -0,5+0 мм.

Измельченный материал подвергался сухой магнитной сепарации на сепараторе валкового типа СМС-20М, с напряженностью магнитного поля не менее 19000Э (1,9 Тл). Выделение магнитной фракции производилось при помощи постоянных магнитов. Электромагнитная фракция проб № 2 и № 3 отделялась при значениях силы тока, подаваемого на катушку электромагнита в $I = 7,5$ А. Для пробы № 1 (см. табл. 1) разделение по фракциям производилось при токах нагрузки $I = 2,5$ А и $I = 7,5$ А. После выделения электромагнитной фракции оставшийся материал отнесен к немагнитной фракции [5].

Полученные продукты магнитной сепарации использовались для химико-минералогического исследования магнитной и немагнитной фракций на содержания в них магнетита и железа общего.

Измельчение магнитной фракции производилось на вибрационном истирателе типа ИВ-2, с получением навесок с содержанием класса крупности -0,071 мм в объеме 85, 90, 95, 100 %.

Оценка количества и размеров зерен магнетита в не измельченных пробах

Характеристики распределения зерен магнетита в исследуемых пробах получены с использованием метода «имидж-анализа». Метод заключается в оценке и анализе информации о количестве и размере минеральных зерен в пробах из цифровых изображений специально изготовленных образцов, шлифов и полировок.

Качественно-количественная оценка распределения зерен магнетита в не измельченных пробах методом «имидж-анализа» выполнена на основе прозрачных петрографических шлифов и их цифровых изображениях:

- ✧ для образцов с крупновкрапленным и средневкрапленным магнетитом (пробы № 1 и 2) получены «скан-образы» с разрешением не менее 1200 точек на дюйм (рис. 1);
- ✧ для образца с мелковкрапленным магнетитом (проба № 3), цифровые изображения (рис. 1), полученные при помощи петрографического микроскопа Zeiss Axio-plan 2, с увеличением в 25 раз. При этом в зависимости от степени неоднородности образца по содержанию магнетита делалось от одного до 4-х кадров.

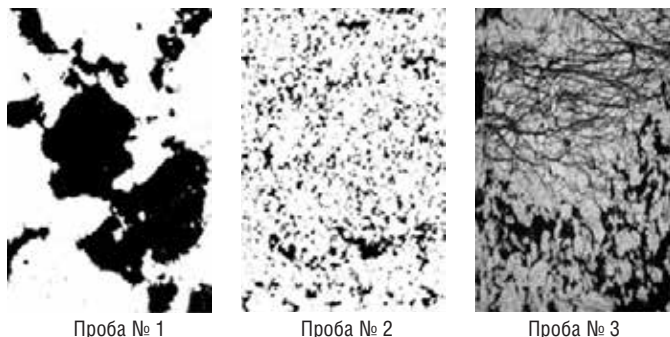


Рис. 1. «Скан-образы» исследуемых проб титаномагнетитовой руды на изображении: черный цвет - магнетит; светлый - силикаты; для пробы № 3 - цифровое изображение.

Подготовка изображений к «имидж-анализу» производилась в многофункциональном графическом редакторе. В шлифах были выделены анализируемые участки и получены изображения-маски, на которых рудные минералы отмечены черным цветом, а силикатные — белым.

Расчет содержания и геометрических параметров зерен выполнялся с использованием программного обеспечения Image-Tool 3.0, которое позволяет анализировать площадь и геометрические параметры объектов, имеющих различные цветовые характеристики.

Результаты определения количества и размера зерен магнетита в не измельченном состоянии проб методом «имидж-анализа» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Количество магнетита в рудных пироксенитах исследуемых проб по результатам «имидж-анализа» на «скан-образцах».

№ обр.	Количество зерен магнетита, шт.	Количество зерен силикатов, шт.	Содержание зерен магнетита, %	Содержание зерен силикатов, %
9	510 308	797 932	39,01	60,99
13	200 056	1 068 080	15,78	84,22
25	853 861	3 063 195	21,8	78,2

В процессе экспериментов выполнено большое количество измерений в каждом исследуемом шлифе пробы (в среднем около 500 шт.), что позволило выделить классы крупности зерен магнетита с шагом 0,1 мм.

Во всех пробах установлено близкое к логнормальному распределение размера зерна магнетита [6-9]. Этот результат означает, что количественно в рудах преобладают зерна минерала размером 0,1-0,2 мм. Тип статистического распределения размеров зерна от тонковкрапленных к крупновкрапленным рудам не меняется — возрастает объемная доля в руде более крупных зерен по отношению к более мелким зернам.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения размеров зерен в исследуемых образцах проб № 1, № 2 и № 3, построенные по данным результатов «имидж-анализа» и график распределения содержания зерен магнетита, класса крупности 0,1-0,2 мм, в зависимости от категории обогащенности руды.

Анализ результатов оценки количества и размеров зерен магнетита в не измельченном состоянии проб № 1, № 2 и № 3 позволяет сделать следующие выводы:

- ✧ во всех изученных пробах титаномагнетитовой руды, в т.ч. крупновкрапленной руде (проба № 1 легкообогащаемая), количественно преобладающими зернами магнетита являются зерна класса крупности 0,1-0,2 мм, что подтверждается распределением их размера близким к логнормальному;
- ✧ характер статистического распределения размеров зерна, как в тонковкрапленных так и в крупновкрапленных типах руд, не меняется, возрастает только объемная доля в руде более крупных зерен по отношению к более мелким зернам, т.е. наблюдается относительное постоянство содержания зерен класса крупности 0,1-0,2 мм во всех типах руд.

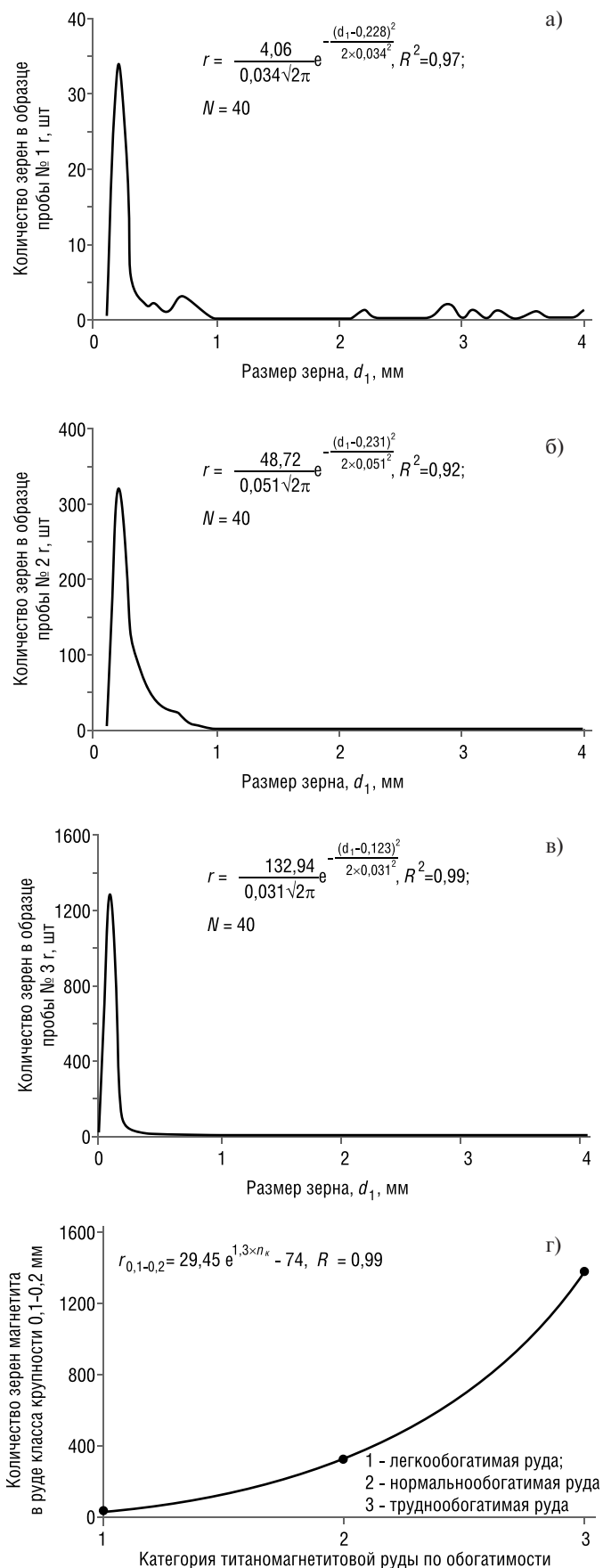


Рис. 2. Гистограмма распределения размеров зерен в исследуемых пробах а - проба № 1, б - проба № 2, в - проба № 3, г - график зависимости содержания зерен магнетита класса крупности 0,1-0,2 мм от категории обогатимости титаномагнетитовой руды.

Анализ характера раскрытия зерен магнетита в магнитной фракции измельченной руды

Раскрытие минерала магнетит в измельченных пробах оценивалось по искусственным полированным шлифам под поляризационным микроскопом в проходящем и отраженном свете, с микрофотографированием препаратов для соответствующего содержания класса крупности -0,071 мм в 85, 90, 95 и 100 % [10, 11].

В качестве примера, на рис. 3 и 4 представлены фотографии (в проходящем и отраженном свете) измельченного магнитного материала пробы № 1 (легкообогатимая руда) до крупности 85, 90, 95 и 100 % класса -0,071 мм.

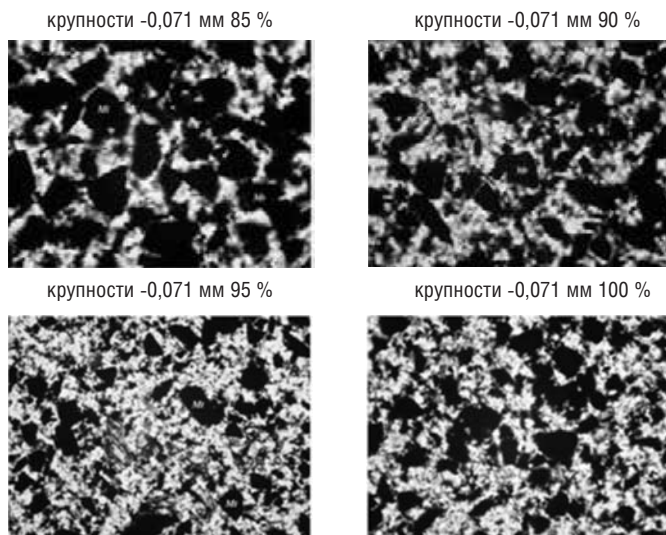


Рис. 3. Искусственные шлифы измельченной магнитной фракции пробы № 1 (увеличение 200 $\times$, в проходящем свете).

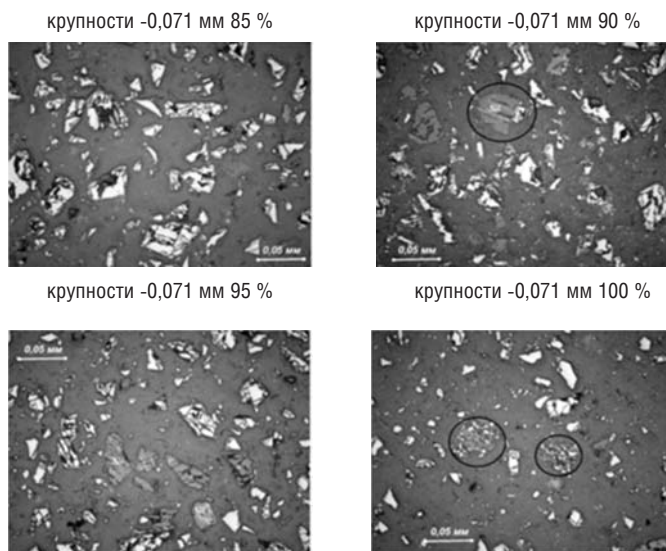


Рис. 4. Искусственные шлифы измельченной магнитной фракции пробы № 1 (увеличение 200 $\times$, в отраженном свете).

Анализ шлифов и оценка количества не раскрывшихся зерен магнетита

Проба № 1 (легкообогатимая). Анализ шлифов, изготовленных из магнитной фракции пробы № 1, показал, что магнетит в исследуемом материале раскрывается практически полностью уже при степени измельчения 85 % крупности –

0,071 мм. Сrostки магнетита с силикатными минералами, для степени измельчения 85 % и 90 % в пределах исследуемой области материала шлифов, единичные и их количество не превышает 1-2 %. На рис. 4 показано срастание магнетита с пироксеном (обведено кружком) – единственный сrostок, установленный в пределах шлифа. Ильменит в измельченном материале установлен в виде отдельных обособленных зерен.

При степени измельчения с содержанием фракции -0,071 мм в 95 % сrostки их с магнетитом в материале шлифа не обнаружены.

При степени измельчения 100 % в материале шлифа обнаружены изометричные микрообломочные стяжения полиминерального состава со значительным содержанием магнетита рис. 5.

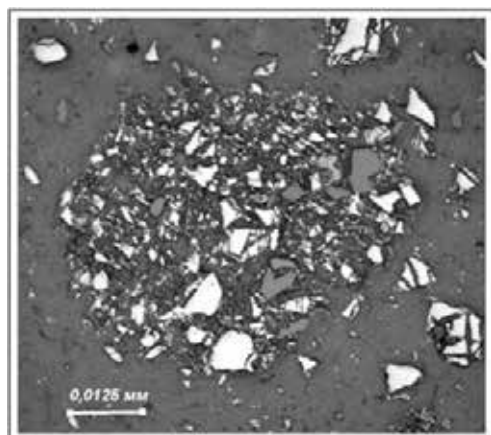


Рис. 5. Микрообломочное стяжение в измельченной магнитной фракции пробы № 1 содержащем 100 % класс крупности -0,071 мм. Фото в отраженном свете, увеличение 400 $\times$.

Проба № 2 (нормальнообогатимая). Анализ шлифов, изготовленных из магнитной фракции пробы № 2, показал, что магнетит раскрывается практически полностью уже при степени измельчения 85 % до крупности -0,071 мм. Сrostки магнетита с силикатными минералами единичные и их количество не превышает 1 % в пределах исследуемой области материала шлифа.

В шлифе, изготовленном из магнитной фракции при степени измельчения 90 %, несмотря на относительно высокое содержание зерен силикатов (пироксена), сrostки с магнетитом не обнаружены.

При степени измельчения 95 % в материале шлифа установлены единичные изометричные микрообломочные стяжения техногенного происхождения, аналогичные описанным в материале шлифа, содержащем 100 % класс крупности -0,071 мм, пробы № 1 (рис. 7).

Проба № 3 (труднообогатимая). Анализ шлифов, изготовленных из магнитной фракции пробы № 3, показал, что магнетит раскрывается практически полностью уже при степени измельчения 85 % до крупности -0,071 мм. Сrostки с силикатами единичные и их количество не превышает 1-2 % в пределах исследуемой области материала шлифа.

В шлифе, изготовленном из магнитной фракции при степени измельчения 85 %, количество сrostков силикатов с магнетитом несколько больше, чем при более высокой степени измельчения, 90 % и более.

При степени измельчения 90 % и более в материале шлифов появляются единичные изометричные микрообломочные стяжения техногенного происхождения, аналогичные описанным в измельченном магнитном материале шлифов проб № 1 и № 2.

Оценка раскрытия зерен магнетита в руде в зависимости от степени ее измельчения

Оценка степени раскрытия минерала магнетит в титано-магнетитовой руде в зависимости от ее измельчения производилась по известной методике [12-14], в которой установлены следующие градации степени раскрытия зерен магнетита в зависимости от пропорции в сrostках зерен магнетита и зерен силикатных минералов (рис. 8):

- ✧ бедные сrostки - < 25 % магнетита остальное силикаты;
- ✧ рядовые сrostки - 25-50 % магнетита остальное силикаты;
- ✧ богатые сrostки - ≥ 75 % магнетита остальное силикаты.

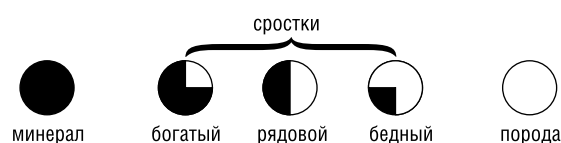


Рис. 6. Модели раскрытия зерен минерала в измельченном материале.

На основании данной модели, численную оценку раскрытия минерала, можно произвести по следующим выражениям [12-14]:

$$P_m = \frac{n_m}{n_m + 0,25n_{\text{бд}} + 0,5n_p + 0,75n_{\text{бг}}}; \quad (1)$$

$$P_n = \frac{n_n}{n_n + 0,75n_{\text{бд}} + 0,5n_p + 0,25n_{\text{бг}}}; \quad (2)$$

$$P_{cp} = \frac{n_{cp}}{n} = \frac{n_{cp}}{n_m + n_n + n_{cp}}, \quad (3)$$

где n_m , n_n , n_{cp} – число зерен минерала, породы и сrostков, шт.; $n_{\text{бд}}$, n_p , $n_{\text{бг}}$ – число бедных, рядовых и богатых сrostков, шт.; n – общее число отобранных зерен в рассматриваемом классе, шт.

По результатам исследований и выполненной оценки раскрытия минерала магнетит, на основе изучения магнитных фракций класса крупности -0,071 мм 85, 90, 95 и 100 % установлено следующее:

- ✧ при степени измельчения магнитных фракций 85 % класса крупности -0,071 мм, во всех пробах, в т.ч. в труднообогатимой руде (проба № 3), количество сrostков магнетита с силикатными минералами не превышает 1-2 %;
- ✧ при степени измельчения магнитных фракций 90 % и более класса крупности -0,071 мм, в пробах № 1 (легкообогатимой) и № 2 (нормальнообогатимой), сrostки с магнетитом не обнаружены, что свидетельствует о полном раскрытии зерен минерала магнетит, а в пробе № 3 (труднообогатимой), сrostки с магнетитом еще присутствуют, что свидетельствует о неполном раскрытии магнетит;
- ✧ при степени измельчения магнитных фракций 95 % и 100% класса крупности -0,071 мм, во всех исследованных пробах, сrostки с магнетитом не обнаружены,

что свидетельствует о полном раскрытии зерен минерала магнетит;

Выводы.

По результатам исследований раскрытия минерала магнетит в пробах измельченного до класса крупности -0,071 мм магнитного материала титаномагнетитовых руд разной категории обогатимости установлено следующее:

- ✦ преобладающим размером зерен магнетита в титаномагнетитовой руде всех категорий обогатимости, является класс крупности 0,1-0,2 мм;
- ✦ содержание зерен магнетита преобладающего класса крупности (0,1-0,2 мм), увеличивается с изменением категории обогатимости руды, от легкообогатимой до труднообогатимой, и характеризуется экспоненциальной тенденцией;
- ✦ отмечается рост количества зерен магнетита от легкообогатимой до нормальнообогатимой руды в 9,4 раза, от нормальнообогатимой до труднообогатимой руды в 4,1 раза;
- ✦ при измельчении рудной массы ее разрушение происходит не по границам зерен магнетита и силикатов,

а по поверхности зерна силиката, т.к. оно обладает меньшей прочностью;

- ✦ раскрытие минерала магнетит в измельченной руде, в соответствии с принятой методикой оценки, происходит по модели «минерал» с единичным содержанием бедных сростков магнетита с силикатными минералами, преимущественно с пироксеном;
- ✦ измельчение титаномагнетитовой руды, до содержания класса крупности -0,071 мм в 85 %, не достаточно для полного (100 %) раскрытия минерала магнетита, особенно для труднообогатимых руд, требующих более продолжительного по времени измельчения;
- ✦ полное раскрытие минерала магнетит в лабораторных условиях происходит при содержании класса крупности -0,071 мм в 90 %, что позволяет обеспечить извлечение магнетита в концентрат на уровне свыше 95%.

Таким образом, для полного раскрытия зерен магнетита в технологических промышленных процессах обогащения титаномагнетитовой руды рекомендуется обеспечивать степень измельчения не менее 90-93% класса крупности -0,071 мм. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантемиров В.Д. Оценка влияния минерального состава титаномагнетитовой руды на результаты магнитного обогащения /В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев// Обогащение руд. - 2017. - № 4. - С. 36 - 40.
2. Кантемиров В.Д. Предварительная оценка технологических типов титаномагнетитовых руд/ В.Д. Кантемиров, А.М. Яковлев, Р.С. Титов, М.В. Козлова// Обогащение руд. - 2018. - № 3. - С. 56 - 59.
3. Ляпунов А.В. Обогащительные перспективы ЕВРАЗ КГОКа /А.В. Ляпунов, С.Ю. Макушев// Глобус. - 2019. - № 4. - С. 139-145.
4. Лютоев В.П. Исследование возможности определения минерального состава титаномагнетитовых руд по данным спектроскопии/ В.П. Лютоев, А.Б.Макеев, А.Ю. Лысюк// Обогащение руд. - 2017. - № 5 - С. 28-36.
5. Кармазин В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых : учебник в 2 т. /В.В. Кармазин, В.И. Кармазин// 3 изд., стер. - Москва: Горная книга, 2017 [б. г.]. - Т. 1: Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. - 672 с.
6. Горбатова Е.А. Определение возможности разделения титаномагнетита и ильменита при селективной сепарации титаномагнетитовых руд /Е.А. Горбатова, Б.И. Пирогов, М.С. Колкова, О.С. Колесатова// Известия Уральского государственного горного университета. - 2020. - Вып.1 (57). - С. 140-149.
7. Газалеева Г.И. Современные тенденции переработки титансодержащих руд /Г.И. Газалеева, Н.В. Шихтов, Н.А. Сопина, А.А. Мушкетов// Черная металлургия, 2015. - Вып. 12. - С. 30 - 36.
8. Изоитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд /В. М. Изоитко// - СПб.: Наука, 1997. - 582 с.
9. Zhang W. A literature review of titanium metallurgical processes /W. Zhang, Z. Zhu, C.Y. Cheng// Hydrometallurgy. - 2011. - Volume 108, Issues 3-4. - p. 177-188.
10. Горбатова Е.А. Анализ раскрываемости минералов ильменитовых руд Медведевского месторождения в процессе их дезинтеграции/ Е.А. Горбатова, О.П. Шавакулева, М.С. Колкова, Д.В. Чернов// Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. - 2014. - № S 2-4. - С. 43-51.
11. Jankovic A. Effect of circulating load and classification efficiency on HPGR and ball mill capacity /A. Jankovic, W. Valery, B. S?nmez, R. Oliveira// XXVII IMPC. Santiago, Chile, 2014. Chap. 9. Energy efficiency in comminution. p. 2-14.
12. Козин В.З. Технологический баланс обогатительных фабрик /В.З. Козин// Научная монография. Урал. гос. горный ун-т. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. - 150 с.
13. Козин В.З. Опробование минерального сырья /В.З. Козин// - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. - 316 с.
14. Козин В.З. Исследование руд на обогатимость /В.З. Козин// Урал. гос. горный ун-т - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. - 304 с.



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

Информируем Вас

При содействии Международного союза машиностроителей ДонНТУ издает Международный студенческий научно-технический журнал «ИНЖЕНЕР», в 2022 году выйдут № 1(31) – 2 (32). Срок подачи статей до 10.09.2022 г.
Более детальная информация приведена на сайтах: <http://tm.donntu.org>, <http://tm.donntu.org>