

ISSN 0132-0890  
www.rudmet.ru

# Черные металлы

Издается с 1961 года  
(№ 1085)

5.2022



ВЕЧНАЯ СЛАВА  
ПАВШИМ ГЕРОЯМ

С праздником  
Победы!

# ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом  
«Руда и Металлы»

№ 5 (1085), май 2022 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал  
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

#### Учредители:

Акционерное общество  
«Издательский дом  
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г. И. Носова»

#### При участии:

ПАО «ММК»  
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»  
Государственного Эрмитажа

Официальный информационный орган  
Федерального УМО  
«Технологии материалов»

#### Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев

Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев

Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников

А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,  
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),  
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,  
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь),  
А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,  
П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

#### Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников

Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Редактор: Э. Э. Бабали

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»  
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,  
стр. 2, МИСиС, оф. 622

#### Адрес редакции:

фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,  
стр. 2, МИСиС, оф. 617

почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75

Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал  
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения  
«Черные металлы» № 5 (1085), май 2022 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере  
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Свидетельство ПИ № ФЦ77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной  
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов  
в типографии «Канцлер»  
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.  
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 09.06.2022. Формат 60x90/8.

Печ. л. 10,5. Офсетная печать. Бумага офсетная.

Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель  
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор  
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции  
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна  
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы  
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции  
и редсовета журнала

ISSN 0132-0890



Подписные индексы:  
12985 («Пресса России»)

9 770132 089006 >

## СОДЕРЖАНИЕ

### 30 лет Новотроицкому филиалу НИТУ «МИСиС»

<i>Д. Р. Ганин, А. А. Панычев, А. Ю. Фукс.</i> Новый способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья . . . . .	4
<i>Г. А. Куницын, М. С. Кузнецов, А. Н. Шаповалов, И. В. Бакин.</i> Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям . . . . .	9
<i>А. А. Токарев, А. В. Каляскин, А. В. Бархатов, Е. В. Братковский.</i> Совершенствование технологии позднего графитизирующего модифицирования при производстве тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна . . . . .	16
<i>А. В. Нефедов, А. А. Китанов, Н. А. Чиченев.</i> Реинжиниринг роликовой закалочной машины листопрокатного цеха АО «Уральская Сталь» . . . . .	22
<i>Д. А. Болдырев, С. П. Нефедьев, М. В. Харченко, Р. Р. Дема.</i> Влияние технологических факторов на остаточные напряжения и вибрации в системе «диск – колодка» . . . . .	27
<i>А. В. Цуканов, К. В. Лицин, С. Н. Басков.</i> Разработка системы управления асинхронным электродвигателем на основе адаптивной модели в условиях листопрокатного производства . . . . .	34

### Подготовка сырьевых материалов

<i>А. Б. Лебедев, П. В. Мусинова.</i> Формирование прочности окомкованного многофазного спека двухкальциевого силиката . . . . .	40
--	----

### Прокатка

<i>В. А. Пименов.</i> Анализ влияния технологических режимов и состояния оборудования на возникновение вибраций при непрерывной холодной прокатке . . . . .	47
<i>Д. Ю. Алексеев, А. Е. Гулин, Д. Г. Емалеева, А. С. Кузнецова.</i> Разработка конечно-элементной модели расчета теплового поля рулонного проката в процессе термомеханической обработки . . . . .	55

### Нанесение покрытий и защита от коррозии

<i>Д. Д. Фазуллин, Г. В. Маврин, Л. И. Фазуллина, И. Г. Шайхиев, Н. М. Лядов.</i> Ингибиторы коррозии стали на основе растительного сырья для защиты нефтепромыслового оборудования . . . . .	61
---	----

### Сварка и наплавка

<i>М. А. Шекшеев, С. В. Михайлицын, А. Б. Сычков, А. Н. Емелюшин.</i> Исследование влияния шлаковой системы покрытых электродов на эффективность инокулирования металла сварочной ванны низкоуглеродистой стали. . . . .	68
--	----

### Машиностроительные технологии

<i>А. Н. Малышев, С. А. Бысов, В. Д. Кухарь, Ю. В. Бессмертная.</i> Экспериментальное исследование вытяжки стальных квадратных коробок по схеме круг-квадрат в радиальной и конической матрицах . . . . .	74
---	----

### Технологические измерения

<i>А. Д. Гусев, И. В. Тихонова, Я. А. Стаханова.</i> Применение нейронных сетей для прогнозирования измерения микротвердости в зоне термического влияния листов углеродистых и низколегированных сталей после лазерной резки. . . . .	79
---	----

### Юбилей

Леониду Николаевичу Шевелеву — 85 лет . . . . .	84
---	----

**Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки 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 металлургии**

**Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service**

**Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)**

**(по версии SCIMAGO)**

## Новый способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья

**Д. Р. Ганин**, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования<sup>1</sup>, канд. техн. наук, эл. почта: dmrgan@mail.ru

**А. А. Паньчев**, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования<sup>1</sup>, канд. техн. наук

**А. Ю. Фукс**, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

Рассмотрены вопросы использования слабомагнитного железорудного сырья, значительные запасы которого имеются в РФ и за рубежом. Приведены сведения о разведанных запасах основных месторождений слабомагнитных железных руд на территории Российской Федерации. Показаны недостатки магнетизирующего обжига, применяемого для перевода слабомагнитных минералов — магнетит и маггемит. Предложен новый способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья, включающий подготовку железорудного материала, дробление и измельчение до раскрытия рудных зерен, транспортировку на магнитный сепаратор и разделение на магнитную и немагнитные фракции. При этом транспортировку железорудного материала осуществляют через соленоидную катушку, подключенную к регулируемому источнику постоянного тока. Показано, что воздействие на слабомагнитные железорудные минералы внешнего магнитного поля, создаваемого соленоидом, повышает их магнитные свойства. Новый способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья позволит осуществлять его обогащение и вводить в производство, что удешевит добычу и подготовку железорудного сырья к металлургическому переделу.

**Ключевые слова:** слабомагнитные железные руды, магнитное обогащение, повышение магнитных свойств, соленоидная катушка, магнитный сепаратор, бурожелезняковые руды, гематитовые руды, маритовые руды, сидеритовые руды.

**DOI:** 10.17580/chm.2022.05.01

### Введение

В Российской Федерации (РФ) и за рубежом имеется большое количество запасов и производится добыча труднообогатимых слабомагнитных железных руд [1, 2]. Слабомагнитные железные руды являются основным потенциальным сырьем для перспективного развития железорудного производства, так как запасы наиболее богатых и доступных железорудных месторождений во многом уже исчерпаны. Кроме того, необходимость более широкого использования труднообогатимых слабомагнитных железных руд обусловлена их попутной добычей с магнетитовыми рудами, а также залеганием в более благоприятных горно-геологических условиях [3].

Для обогащения слабомагнитных железных руд в основном применяют магнитную сепарацию, перед которой для перевода слабомагнитных минералов (гематит, мартит, гидроксиды железа, сидерит) в сильномагнитные — магнетит и, с некоторым допущением, маггемит ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), успешно выделяющиеся в концентрат при магнитной сепарации в слабых магнитных полях сепараторов с постоянными магнитами, используют магнетизирующий обжиг руд [4–8]. Для магнетизирующего обжига руд применяют трубчатые вращающиеся печи и печи «кипящего слоя».

Трубчатые вращающиеся печи обычно диаметром 3,6–4,0 м и длиной до 65–70 м устанавливают под углом наклона оси вращения к горизонту около 3–5 град., печи имеют частоту вращения 1–5 об/мин, производительность около 1000 т/сут

при расходе условного топлива 5–6 % от массы [5, 9, 10]. Значительными недостатками магнетизирующего обжига руд в трубчатых вращающихся печах являются: их невысокая удельная производительность (2,5–5,5 т/(м<sup>3</sup>·сут)); повышенный расход топлива; трудности в регулировке температур по длине печи; неодинаковые температуры по сечению слоя руды, в результате чего куски руды оказываются восстановленными в различной степени; загрязнение окружающей среды выбросами вредных веществ (пыль, оксиды серы, углерода и других веществ); большие затраты на содержание и эксплуатацию печей [5, 9].

Недостатками магнетизирующего обжига руд в технологически более совершенных печах «кипящего слоя» являются: необходимость измельчения материала, подвергаемого обжигу, до крупности 2–3 мм для облегчения перевода материала во взвешенное состояние и отсева из него пылевидных фракций для снижения степени выноса материала из печи газовым потоком; ограничение максимальной температуры в зоне обжига значением, при котором рудные зерна размягчаются (при превышении этой температуры частицы слипаются в гроздь, а нормальный характер движения материала в слое нарушается); повышенный расход топлива (газа-восстановителя); необходимость подачи холодного газа (воздуха); необходимость очистки отработанного газа и улавливания пыли для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу; большие затраты на содержание и эксплуатацию печей.

Несмотря на то что магнетизирующий обжиг позволяет получать железорудные концентраты высокого качества, этот способ повышения магнитных свойств железорудного сырья имеет высокую стоимость (затраты составляют до 40 % себестоимости концентрата) [11].

Целью данной работы было создание более производительного, энергетически и экономически эффективного экологического способа увеличения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья.

### Исследования и полученные результаты

Для достижения поставленной цели в Новотроицком филиале НИТУ «МИСиС» разработан и запатентован способ магнитного обогащения железорудного материала, включающий его подготовку, дробление и измельчение до раскрытия рудных зерен, транспортировку на магнитный сепаратор и разделение на магнитную и немагнитную части. При этом транспортировку железорудного материала осуществляют через соленоидную катушку, подключенную к регулируемому источнику постоянного тока высокого напряжения [12]. Регулирование источника постоянного тока осуществляется в зависимости от магнитных свойств железорудного материала (значений удельной магнитной восприимчивости минералов). Напряженность магнитного поля внутри соленоида прямо пропорциональна силе тока и в предлагаемом способе должна достигать 800–1600 кА/м. Чем выше значения удельной магнитной восприимчивости минералов, тем меньшие значения напряженности магнитного поля внутри соленоида и силы тока необходимы для повышения магнитных свойств минералов.

Данный способ повышения магнитных свойств слабомагнитного железорудного сырья основан на природе магнетизма. Все магнитные свойства минералов связаны с электронами атомов или ионов и базируются на элементарных магнитных моментах атома, складывающихся из магнитных моментов электронов, движущихся вокруг

ядра, и магнитного момента самого ядра. Движение электрона по замкнутой орбите вокруг ядра можно рассматривать как круговой электрический ток, возбуждающий вокруг себя магнитное поле.

Известно, что кристаллические вещества, в соответствии с поведением в магнитном поле, делятся на диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнитные. Диамагнитные вещества обладают небольшими значениями отрицательной магнитной восприимчивости  $\chi$  и слабо отталкиваются внешним магнитным полем. Парамагнитные вещества характеризуются небольшими положительными значениями  $\chi$  и слабо притягиваются внешним магнитным полем. При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле в нем происходит преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по направлению внешнего магнитного поля, в котором парамагнитное вещество намагничивается. Ферромагнитные вещества обладают магнитным моментом даже при отсутствии окружающего поля, а антиферромагнитные характеризуются спонтанным возникновением ниже некоторой температуры антипараллельной ориентации элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки, в результате чего возникают магнитные подрешетки, суммарная намагниченность которых равна нулю (под действием внешнего магнитного поля антиферромагнетики приобретают слабую намагниченность) [13]. Ферримагнитные вещества характеризуются антипараллельной ориентацией спинов, когда направление магнитных моментов противоположно, но величина их различна, что приводит к возникновению постоянного результирующего момента; во внешнем магнитном поле намагничиваются подобно ферромагнитным веществам [13, 14].

В таких сильномагнитных рудах, как магнетитовые, у минерала шпинелевой группы — магнетита — наблюдается ферримагнетизм. В результате чего многие ферримагнетики имеют довольно высокие магнитные свойства. Но большинство содержащихся в полезных ископаемых минералов

Таблица 1

### Сведения о разведанных запасах основных месторождений слабомагнитных руд в РФ [1, 5, 9, 17–20]

Месторождение/группа месторождений	Геолого-промышленный тип руд	Запасы руды, млн т		Содержание Fe в рудах, %
		A + B + C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	
Бакcharское (Томская обл.)	Лептохлорит-гидрогетитовые	40 000,0		30,0–46,0
Гостищевское (Белгородская обл.)	Гематит-сидерит-мартитовые	2596,0	7559,0	61,7
Яковлевское (Белгородская обл.)	Гематит-сидерит-мартитовые	1860,1	7740,5	60,5
Висловское (Белгородская обл.)	Гематит-сидерит-мартитовые	1453,0	2500,0	60,7
Нижне-Ангарское (Красноярский край)	Гематитовые	680,0	520,0	40,4
Керченский железорудный бассейн (Республика Крым)	Сидерито-гидрогетитовые	868,7	313,3	37,7
	Сидеритовые	959,7		31,0
Бакальское (Челябинская обл.)	Бурые железняки	34,3		42,6
	Бурые железняки, образованные по сидеритам	437,0	22,0	39,0
Аккермановское (Оренбургская обл.)	Сидерит-лептохлорит-гидрогетитовые	290,0		35,0
Зигазино-Комаровская группа (Башкортостан)	Бурые железняки	69,4	13,7	50,4
Сиваглинское (Республика Саха (Якутия))	Мартитовые	12,3		53,1

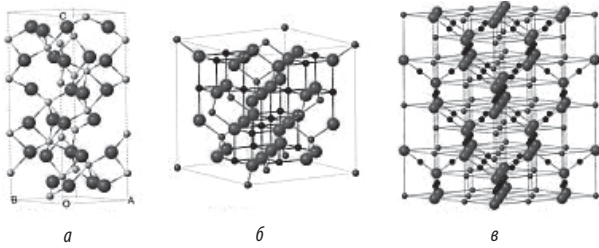


Рис. 1. Кристаллические решетки гематита (а), магнетита (б) и маггемита (в) [21]

Таблица 2

**Технологические показатели обогащения бурожелезняковой руды при помощи магнетирующего обжига и предлагаемого способа [22]**

Технологический показатель, %	Магнетирующий обжиг	Предлагаемый способ
Исходная руда: содержание Fe (α)	37,23	37,23
Концентрат: выход (γ <sub>к</sub> ) содержание Fe (β) извлечение Fe (ε <sub>к</sub> )	43,86 58,72 69,18	53,18 58,73 83,89
Хвосты: выход (γ <sub>хв</sub> ) + потери при обжиге содержание Fe (υ) потери Fe (ε <sub>хв</sub> )	56,14 19,42 30,82	46,82 12,81 16,11

и соединений железа (гематит, гидроксиды железа, карбонаты железа и др.) не проявляет сильномагнитные свойства [15]. Это обусловлено тем, что слабомагнитные минералы в основном представлены антиферромагнетиками, например гематитом (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и сидеритом (FeCO<sub>3</sub>), или парамагнетиками, например гетитом (α-FeOОН) и лепидокрокитом (γ-FeOОН) [16].

Сведения о запасах основных месторождений слабомагнитных железных руд на территории РФ приведены в табл. 1 [1, 5, 9, 17, 20].

В предлагаемом способе повышение магнитных свойств слабомагнитных железорудных материалов достигается упорядочением магнитных полей атомных магнетиков при помощи внешнего воздействия — транспортировки материала через соленоидную катушку [12]. После воздействия внешнего магнитного поля, создаваемого соленоидной катушкой, на слабомагнитный железорудный минерал, например гематит с удельной магнитной восприимчивостью, равной (20–30)·10<sup>-7</sup> м<sup>3</sup>/кг, он изменяет свою кристаллическую решетку на кристаллическую решетку хорошо магнитного маггемита с удельной магнитной восприимчивостью, равной (5000– 6000)·10<sup>-7</sup> м<sup>3</sup>/кг. Химический состав данных минералов при превращении не изменяется. Кристаллические решетки гематита, магнетита и маггемита приведены на рис. 1 [21].

Возможная схема цепи аппаратов для реализации предлагаемого способа магнитного обогащения железорудного материала показана на рис. 2.

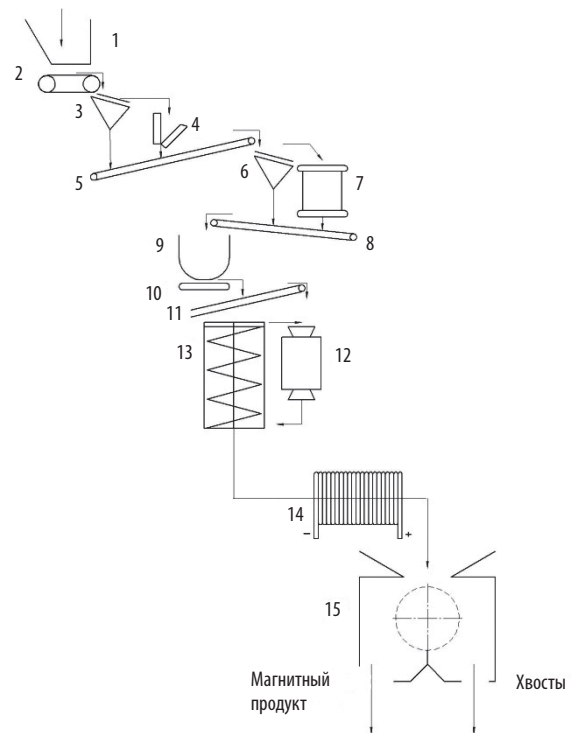


Рис. 2. Схема цепи аппаратов для реализации способа магнитного обогащения железорудного материала:

1 — бункер руды; 2, 5, 8, 11 — конвейеры; 3, 6 — грохоты; 4 — щековая дробилка; 7 — конусная дробилка; 9 — бункер дробленой руды; 10 — питатель; 12 — мельница; 13 — спиральный классификатор; 14 — соленоид; 15 — магнитный сепаратор

Исходная руда, добытая в карьере, транспортируется в приемный бункер 1, откуда конвейером 2 она подается на грохот предварительного грохочения 3. Надрешетный (верхний) продукт грохота поступает в щековую дробилку 4 для первичного (крупного) дробления, подрешетный (нижний) продукт грохота — на конвейер 5, где оба продукта объединяются. Далее сырье транспортируется на грохот 6. Надрешетный продукт грохота поступает в конусную дробилку 7 для вторичного (среднего и мелкого) дробления, подрешетный продукт грохота — на конвейер 8, где оба продукта объединяются и подаются в бункер дробленой руды 9. Из бункера 9 при помощи питателя 10 и конвейера 11 дробленая руда поступает на измельчение в шаровую мельницу 12. Измельченная руда классифицируется в спиральном классификаторе 13, а недоизмельченный продукт вновь направляется в шаровую мельницу 12 для доизмельчения. Измельченный продукт необходимой крупности транспортируется через соленоид 14, где повышаются его магнитные свойства, и поступает на магнитный сепаратор 15. После магнитной сепарации хвосты направляются в хвостохранилище, а магнитный продукт — в сгуститель для сгущения, а затем в вакуум-фильтр для фильтрации и в сушильный барабан для сушки. Готовый концентрат вместе с другими шихтовыми материалами может подвергаться окускованию и использоваться в металлургическом производстве.

Таблица 3

**Результаты повышения магнитных свойств слабомагнитных железных руд известными и предлагаемыми способами [20]**

Способ воздействия на железорудный материал	Характеристика руды		Потери железа в хвостах, %
	до воздействия	после воздействия	
Магнетизирующий обжиг в трубчатой печи 3,6×50	Табачная руда: 38–42 % Fe; 0,1–0,13 % As; 12–14 % п.п.п.	46,6–51% Fe; 0,08–0,1% As	Нет данных
Магнетизирующий обжиг в шахтной печи 0,7×2,2	Сидеритовая руда: 30–32 % Fe	40–45 % Fe	–
Магнетизирующий обжиг в печи кипящего слоя 1,35×13,8×3,52	Лисаковская руда: 36–38 % Fe, 10 % п.п.п., 9 % влаги	40–42 % Fe	–
Магнитное поле соленоида	Бурожелезняковая руда: 37,23 % Fe; 19,43 % SiO <sub>2</sub> ; 6,68 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 2,42 % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 0,83 % NiO	58,73 % Fe	16,11

В опытном исследовании руду (химический состав, % (масс.): 37,23 Fe; 19,43 SiO<sub>2</sub>; 6,68 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2,42 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,83 NiO), измельченную до фракции 0–1 мм, пропускали через анализатор магнитный АМ-2 с комбинированным полем, поставляемый ООО «Научно-технический центр магнитной сепарации МАГНИС ЛТД», Луганск. При этом магнитный продукт не получали. Однако при транспортировке этой же руды через соленоидную катушку выход концентрата с содержанием железа  $\beta = 58,73$  % составил  $\gamma_{\text{к}} = 53,18$  %, а выход хвостов —  $\gamma_{\text{хв}} = 46,82$  %. При использовании данного способа были получены следующие показатели обогащения: извлечение железа в концентрат составило  $\epsilon_{\text{к}} = 83,89$  %, в хвосты ушло  $\epsilon_{\text{хв}} = 16,11$  % с содержанием железа в количестве  $u = 12,81$  %.

Сравнительный анализ результатов повышения магнитных свойств слабомагнитных железных руд известными и предлагаемыми способами представлен в табл. 2 [22] и 3 [20].

Из табл. 2 видны преимущества обогащения бурожелезняковой руды способом повышения магнитных свойств при помощи соленоидной катушки. При получении почти одинакового качества концентрата с содержанием железа 58,73 % выход концентрата увеличен на 9,32 %, извлечение железа — на 14,71 %, потери железа в хвостах уменьшены на 14,71 %. Кроме того, при использовании нового способа снижаются выбросы вредных веществ в атмосферу воздуха, так как около 2–3 % Fe вместе с вредными веществами (S, Zn и др.) улетучиваются при обжиге во вращающихся печах.

Внедрение данного способа, являющегося более производительным, энергетически и экономически эффективным, экологичным, чем магнетизирующий обжиг, позволит увеличить магнитные свойства слабомагнитного железорудного сырья и откроет новые перспективы для широкого вовлечения в промышленное производство труднообогатимых слабомагнитных железных руд, имеющих такие преимущества, как относительная дешевизна добычи и во многих случаях, хорошая транспортная доступность к металлургическому производству.

**Заключение**

1. Труднообогатимые слабомагнитные железные руды, большое количество запасов которых имеется в России и за рубежом, являются основным потенциальным сырьем

для перспективного развития железорудного производства и черной металлургии ввиду значительной истощенности во многих странах запасов наиболее богатых и доступных железорудных месторождений. Для их обогащения в основном применяют магнитную сепарацию, перед которой для перевода слабомагнитных минералов в сильномагнитные используют магнетизирующий обжиг в трубчатых печах и печах «кипящего слоя», обладающих значительными недостатками.

2. В Новотроицком филиале НИТУ «МИСИС» разработан и запатентован более производительный, энергетически и экономически эффективный, экологически безопасный способ магнитного обогащения железорудного материала, позволяющий увеличить магнитные свойства труднообогатимого слабомагнитного железорудного сырья и открывающий новые перспективы для широкого вовлечения его в промышленное производство.

3. Необходимы дальнейшие исследования режимов магнитного воздействия на минералы по предлагаемому способу магнитного обогащения железорудного материала, которые позволят отыскать оптимальные показатели обогащения труднообогатимого слабомагнитного железорудного сырья, являющегося в большинстве случаев комплексным, часто содержащим полезные компоненты, с помощью которых можно улучшить качество стали. Следует также разработать рациональную схему обогащения этих руд. ■

**Библиографический список**

1. Гальянов А. В., Яковлев В. Л. Сырьевая база промышленного комплекса черной металлургии России. — Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. — 340 с.
2. Cook N. J., Ciobanu C. L., Ehrig K., Slattery A., Verdugo-Ihl M. R. et al. Advances and opportunities in ore mineralogy // Minerals. 2017. Vol. 7, Iss. 12. P. 233. DOI: 10.3390/min7120233.
3. Остапенко П. Е. Теория и практика обогащения железных руд. — М. : Недра, 1985. — 270 с.
4. Пелевин А. Е. Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения. — Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2018. — 296 с.
5. Леонтьев Л. И., Юсфин Ю. С., Малышева Т. Я. и др. Сырьевая и топливная база черной металлургии. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. — 304 с.
6. Yu J., Han Y, Li Y, Cao P. Beneficiation of an iron fines by magnetization roasting and magnetic separation // International journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 168, Iss. 10. P. 102–108. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.09.012.

7. Faris N., Tardio J., Ram R., Bhargava S., Pownceby M. I. Investigation into coal-based magnetizing roasting of an iron-rich rare earth ore and the associated mineralogical transformations // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 37–49. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.09.007.
8. Yu J., Han Y., Li Y., Gao P. Recent advances in magnetization roasting of refractory iron ores: a technological review in the past decade // *Minerals Extractive Metallurgy Review*. 2019. Vol. 41, Iss. 6. P. 1–11. DOI: 10.1080/08827508.2019.1634565.
9. Малыгин А. В., Мальцев В. А., Видуецкий М. Г. Рудоподготовительные процессы в плавильном производстве / Под общ. ред. докт. техн. наук А. В. Малыгина. — Екатеринбург : УрФУ, 2016. — 415 с.
10. Тащиенко П. А., Панычев А. А. Теория и технология кричного процесса на основе опытно-промышленного производства // *Черные металлы*. 2005. № 4. С. 14–20.
11. Шумаков Н. С., Дмитриев А. Н., Гараева О. Г. Сырые материалы и топливо для доменной плавки (характеристика и методы подготовки). — Екатеринбург : УрО РАН, 2007. — 392 с.
12. Пат. 2759976 РФ. Способ магнитного обогащения железорудного материала / А. А. Панычев, Д. Р. Ганин ; заявл. 12.01.2021 ; опубл. 19.11.2021, Бюл. № 32.
13. Батми Х., Принг А. Минералогия для студентов. — М. : Мир, 2001. — 492 с.
14. Вайсберг Л. А., Устинов И. Д. Введение в технологию разделения минералов. — СПб. : Русская коллекция, 2019. — 168 с.
15. Вайсберг Л. А., Кононов О. В., Устинов И. Д. Основы геометаллургии. — СПб. : Русская коллекция, 2020. — 376 с.
16. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых: уч. в 2 т. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. — 3-е изд., стер. — М. : Горная книга, 2017. — 672 с.
17. Аликберов В. М., Тизунов Л. П. Природно-легируемые железные руды России: состояние и перспективы использования в металлургии легируемых чугунов и сталей // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 5. С. 3–12.
18. Коршиков Г. В. Энциклопедический словарь-справочник по металлургии. — Липецк : Липецкое издательство Госкомпечати РФ, 1998. — 780 с.
19. Панычев А. А. Особенности свойств и технологии обогащения руд Орско-Халиловской группы месторождений // *Горный журнал*. 2007. № 12. С. 65–69.
20. Ладыхичев М. Г., Чижикова В. М., Лобанов В. И. и др. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: В 2-х т. Т. 1. Сырьевая база и производство окискованного сырья (сырье, технологии, оборудование) — М. : Машиностроение-1, 2001. — 896 с.
21. Aschikbayeva Zh., Daniele T., Ballmassov D., Schena E., Saccomandi P., Inglezakis V. Application on Nanoparticles and Nanomaterials in Thermal Ablation Therapy of Cancer // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9, Iss. 9. 1195. P. 1–35. DOI: 10.3390/nano9091195.
22. Панычев А. А. Исследование магнетизирующего обжига природно-легируемых Аккермановских руд для разработки рациональной технологии обогащения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Ленинград, 1981. — 24 с.

“*Chernye metally*”, 2022, No. 5, pp. 4–8  
DOI: 10.17580/chm.2022.05.01

#### New method to increase magnetic properties of low magnetic iron ore raw materials

##### Information about authors

**D. R. Ganin**, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment<sup>1</sup>, e-mail: dmrgan@mail.ru;

**A. A. Panychev**, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment<sup>1</sup>;

**A. Yu. Fuks**, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Novotroitsk Branch of NUST MISIS, Novotroitsk, Russia.

**Abstract:** The issues of the use of low magnetic iron ore raw materials, significant reserves of which are available in our country and abroad, are considered. The information on the explored reserves of the main deposits of weakly magnetic iron ores in the territory of the Russian Federation (RF) is given. The disadvantages of magnetizing roasting, which are used to convert weakly magnetic minerals into highly magnetic ones – magnetite and maghemite, are shown. A new method of increasing the magnetic properties of low magnetic iron ore raw materials is proposed, in which the iron ore material is prepared, crushed and crushed until the ore grains are opened, the iron ore material is transported to a magnetic separator and the iron ore material is divided into magnetic and non-magnetic parts. In this case, the transportation of iron ore material is carried out through a solenoid coil connected to an adjustable DC source. It is shown that the effect of an external magnetic field created by a solenoid on lowly magnetic iron ore minerals increases their magnetic properties. The use of a new method of increasing the magnetic properties of little-used low magnetic iron ore raw materials will make it possible to widely enrich it and put it into production, which, in general, will sharply reduce the cost of mining and preparation of iron ore raw materials for metallurgical processing.

**Key words:** weakly magnetic iron ores, magnetic enrichment, enhancement of magnetic properties, solenoid coil, magnetic separator, limonite ores, hematite ores, martite ores, siderite ores.

##### References

1. Galyanov A. V., Yakovlev V. L. Raw material base of the industrial complex of ferrous metallurgy in Russia. Vologda: Infra-Inzheneriya. 2022. 340 p.
2. Cook N. J., Ciobanu C. L., Ehrig K., Slattery A., Verdugo-Ihl M. R. et al. Advances and opportunities in ore mineralogy. *Minerals*. 2017. Vol. 7, Iss. 12. p. 233.
3. Ostapenko P. E. Theory and practice of iron ore beneficiation. Moscow: Nedra. 1985. 270 p.
4. Pelevin A. E. Magnetic and electrical methods of beneficiation. Magnetic beneficiation methods. Ekaterinburg: Izdatelstvo UGTU, 2018. 296 p.
5. Leontyev L. I., Yusfin Yu. S., Malysheva T. Ya. et. al. Raw materials and fuel base of ferrous metallurgy. Moscow: IKTs «Akademkniga». 2007. 304 p.

6. Yu J., Han Y., Li Y., Gao P. Beneficiation of an iron fines by magnetization roasting and magnetic separation. *International Journal of Mineral Processing*. 2017. Vol. 168, Iss. 10. pp. 102–108.
7. Faris N., Tardio J., Ram R., Bhargava S., Pownceby M. I. Investigation into coal-based magnetizing roasting of an iron-rich rare earth ore and the associated mineralogical transformations. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 114. pp. 37–49.
8. Yu J., Han Y., Li Y., Gao P. Recent advances in magnetization roasting of refractory iron ores: a technological review in the past decade. *Minerals Extractive Metallurgy Review*. 2019. Vol. 41, Iss. 6. pp. 1–11.
9. Malygin A. V., Maltsev V. A., Viduetskiy M. G. Ore preparation processes in smelting production. Ekaterinburg: UrFU. 2016. 415 p.
10. Tatsienko P. A., Panychev A. A. Theory and technology of the bloomery process based on pilot production. *Chernye Metally*. 2005. No. 4. pp. 14–20.
11. Shumakov N. S., Dmitriev A. N., Garaeva O. G. Raw materials and fuel for blast-furnace smelting (characteristics and preparation methods). Ekaterinburg: Uro RAN. 2007. 392 p.
12. Panychev A. A., Ganin D. R. Method for magnetic enrichment of iron ore material. Patent RF. No. 2759976. Applied: 12.01.2021. Published: 19.11.2021. Bulletin No. 32.
13. Battey H., Pring A. Mineralogy for students. Moscow: Mir. 2001. 492 p.
14. Vaisberg L. A., Ustinov I. D. Introduction to mineral separation technology. Saint Petersburg: Russkaya kolleksiya. 2019. 168 p.
15. Vaisberg L. A., Kononov O. V., Ustinov I. D. Fundamentals of Geometallurgy. Saint Petersburg: Russkaya kolleksiya, 2020. 376 p.
16. Karmazin V. V., Karmazin V. I. Magnetic, electrical and special methods of mineral processing: tutorial in 2 volumes. Vol. 1: Magnetic and electrical methods of mineral processing. 3<sup>rd</sup> reprint edition. Moscow: Gornaya kniga. 2017. 672 p.
17. Alikberov V. M., Tigonov L. P. Naturally alloyed iron ores in Russia: state of the art and prospects for the use of alloyed cast irons and steels in metallurgy. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2018. No. 5. pp. 3–12.
18. Korshikov G. V. Encyclopedic dictionary – reference book on metallurgy. Liptskoe izdatelstvo Goskompechati RF. 1998. 780 p.
19. Panychev A. A. Features of the properties and technology of beneficiation of ores of the Orsk-Khalilovsk deposit group. *Gornyi Zhurnal*. 2007. No. 12. pp. 65–69.
20. Ladygichev M. G., Chizhikova V. M., Lobanov V. I. et. al. Raw materials for ferrous metallurgy: reference book: In 2 volumes. Vol. 1. Raw material base and production of agglomerated raw materials (raw materials, technologies, equipment). Moscow: Mashinostroenie-1. 2001. 896 p.
21. Aschikbayeva Zh., Daniele T., Ballmassov D., Schena E., Saccomandi P., Inglezakis V. Application on Nanoparticles and Nanomaterials in Thermal Ablation Therapy of Cancer. *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9, Iss. 9. 1195. pp. 1–35.
22. Panychev A. A. Study of magnetizing roasting of naturally alloyed Akkerman ores for the development of a rational beneficiation technology: thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Leningrad, 1981. 24 p.