

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.1

Чувашов Д.Н., Немчинова Н.В.

## ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗОМАГНЕЗИАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТА РУДЫ БАКАЛЬСКОГО РУДОУПРАВЛЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО ЧУГУНА

**Аннотация.** В последние годы становится актуальной разработка способов переработки бедных и труднообогатимых железосодержащих руд ввиду истощения богатых железорудных месторождений. Цель исследований – рассмотреть возможность получения гранулированного чугуна при переработке концентрата сидеритовой руды Бакальского месторождения Южного Урала. Объектом исследований явились образцы концентрата с содержанием оксида железа ~69,6 мас.%, железа в пробах в среднем составило 48,72%. Основными соединениями в пробе концентрата являются магнезиоферрит, в незначительном количестве возможно присутствие кварца, полевого шпата, гематита, доломита, сидерита, глинистого минерала. В качестве углеродистого восстановителя использовался каменный уголь Шубаркольского месторождения (г. Караганда, Казахстан). В качестве флюсов в шихту добавляли оксиды кальция и кремния до получения легкоплавкого (с температурой плавления ~1360°C) шлака следующего состава, мас.%: CaO – 25, SiO<sub>2</sub> – 55, MgO – 20. Плавку окомкованной шихты проводили в лабораторной печи LHT 08/17 (Nabertherm, Германия) при начальной температуре загрузки 1200 °C и постепенным нагревом до 1400 °C с выдержкой при этой температуре в течение 5 мин. Далее температура снижалась до 1150 °C. В результате проведенных экспериментов подтвердилась возможность получения гранулированного чугуна из исследуемого концентрата, извлечение железа составило 65,9%. Рекомендовано использовать данный концентрат в качестве дополнительного компонента железосодержащей шихты для получения гранулированного чугуна.

**Ключевые слова:** Бакальское рудоуправление, железомagneзиальный концентрат, окатыши, флюсы, гранулированный чугун, шлак

### Введение

Производство чугуна и стали занимает первое место по объемам производства во всем мире, играет важную роль в промышленном секторе экономики [1-5]. Разрабатываются новые виды марок стали более высокого качества, что обеспечивает ее более широкое использование в различных отраслях. При этом известно, что высококачественные сорта стали можно получить только при использовании руды в качестве сырья [6].

Традиционно для производства чугуна используется доменный процесс [7], однако развитие данного способа переработки железосодержащих руд и концентратов ограничивается рядом проблем: отсутствием коксующихся углей и выбросом углекислого газа в атмосферу. В связи с этим в последние годы успешно развиваются и внедряются альтернативные технологии по получению высококачественных чугуна и стали, направленные в том числе на переработку низкокачественных железосодержащих сырьевых материалов при использовании недорогих углеродистых восстановителей [8, 9].

### Объект исследований

Сырьем для лабораторных исследований по получению гранулированного чугуна методом прямого восстановления явился концентрат руды ООО «Бакальское рудоуправление» (БРУ) Южного Урала, расположенного в г. Бакал Саткинского района Челябинской области. К преимуществам использования железосо-

держащего рудного сырья Бакальского месторождения относятся благоприятное географическое расположение месторождения, разведанные запасы сидеритовых руд (с низким содержанием S и P) в достаточно большом количестве. Все это способствует низким затратам на доставку сырья потребителям [10].

В работе [11] описаны результаты экспериментов по переработке сидеритовой руды БРУ без предварительного обогащения, которые показали возможность получения гранулированного чугуна прямым восстановлением, однако извлечение Fe оказалось довольно низким – лишь 38%.

В связи с этим нами были продолжены эксперименты по изучению возможности получения гранулированного чугуна из данного природного материала, но уже обогащенного – из концентрата руды БРУ.

При получении концентрата из сидеритовой руды проводились две стадии обогащения: 1 – декарбонизация и с увеличением содержания железа с 30–32 до 44–46% (за счет сокращения общей массы руды при сохранении количества железа); 2 – магнитная сепарация в полях низкой напряженности (80–95 А/м) с дальнейшим увеличением содержания железа с 44–46 до 48–49% (за счет удаления алюмосиликатной пустой породы).

Химический анализ образцов данного железосодержащего сырья на содержание железа и основных компонентов осуществляли рентгеноспектральным флуоресцентным методом (РФА) при помощи спектрометра с волновой дисперсией S8 TIGER (Bruker, Германия), результаты представлены в табл. 1.

Химический состав железомagneзиального концентрата БРУ

Наименование компонентов																
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Na <sub>2</sub> O	Cr	SrO	ZnO	ZrO <sub>2</sub>
Содержание, мас. %																
69,6	17,36	2,06	6,32	1,78	2,07	0,11	0,0933	0,02	0,21	0,07	0,0046	0,29	0,0029	0,0026	0,0046	0,002

Полуколичественный анализ, выполненный согласно ГОСТ 41-08-205-04 «Методики количественного химического анализа», относится к V категории точности. Результаты анализа получены при помощи метода QUANT EXPRESS. Общее содержание железа в пробах в среднем составило 48,72 %.

Фазовый состав пробы исследуемого материала был определен методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН 3.0 (Россия) и расшифрован с помощью программы поиска фаз (Diffraplus, PDF-2, 2007 г). На рис. 1 приведена рентгенограмма исследуемого образца концентрата руды БРУ.

Согласно данным рентгенофазового анализа, проба концентрата руды БРУ содержит магнезиоферрит, в незначительном количестве возможно присутствие кварца, полевого шпата, гематита, доломита, сидерита, глинистого минерала.

#### Теоретические основы получения гранулированного чугуна

Как указывалось ранее в [11], химизм процесса металлизации железорудного сырья заключается в

превращении оксидного железа (находящегося в материале в виде Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и FeO) в элементное железо. Процесс восстановления металла из оксидов (по принципу А.А. Байкова о последовательности превращений) проходит путем ступенчатого перехода от высших оксидов к низшим по схеме: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> → FeO → Fe [12].

При температуре 300–350°C Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> начинает восстанавливаться до Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Далее Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> начинает разлагаться с поглощением тепла при температуре более 450°C с получением оксида железа (II). Реакция (с выделением тепла) взаимодействия FeO с активным восстановителем – угарным газом СО – с получением элементного железа начинается при более высоких температурах (~ 750–800°C).

Восстановитель СО образуется при взаимодействии углекислого газа, образующегося при сжигании топлива, с углеродом угля, входящего в состав окомкованной шихты, по известной реакции Будуара [13]. Также в исследуемой системе протекает реакция науглероживания металлического железа, которая приводит к образованию карбида железа (3Fe + C = Fe<sub>3</sub>C).

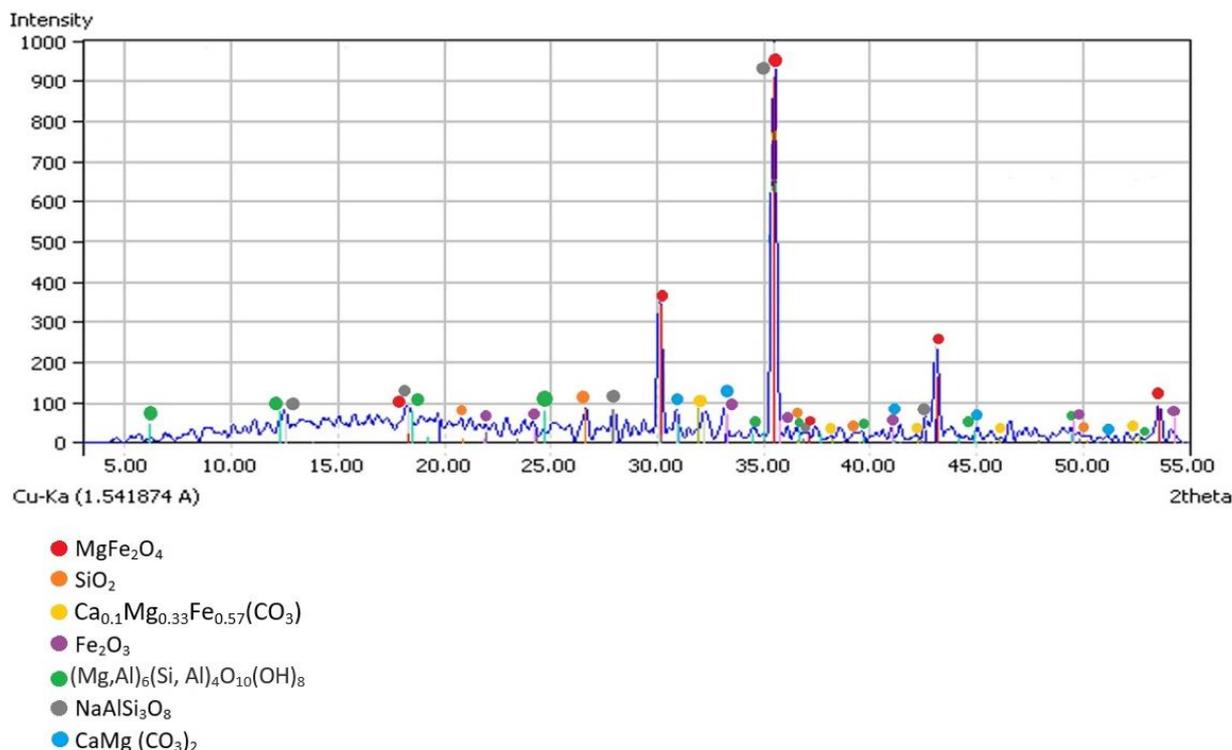


Рис. 1. Рентгенограмма образца железомagneзиального концентрата руды БРУ

Науглероженное железо имеет более низкую температуру плавления, чем чистое железо. Так, если у чистого железа температура плавления равна 1539°C, то при содержании углерода 2 и 4 мас.% эта температура снижается до 1380 и 1170°C соответственно. В результате расплавления науглероженное железо переходит в жидкое состояние, и вследствие когезии мелких частичек в более крупные образуются капли расплавленного чугуна.

Для получения чугуна и выделения его в самостоятельную фазу необходимо формировать шлак, температура плавления которого должна находиться в интервале температур 1300–1380°C. Состав шлакообразующих компонентов рассчитывается на основе системы CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO [14, 15].

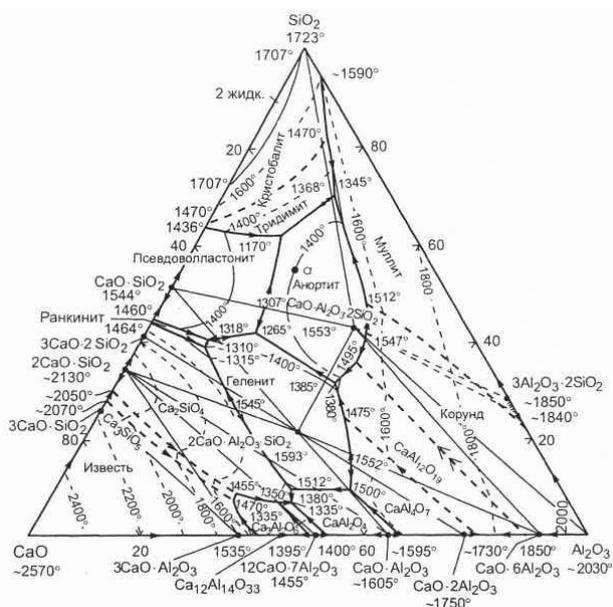


Рис. 2. Диаграмма состояния системы CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO

В расплавленном состоянии металл и шлак представляют собой несмешивающиеся жидкости, разделяющиеся в связи с различием в плотностях и имеющие границу раздела с разной поверхностной энергией (межфазным натяжением). При охлаждении расплав железа и шлака кристаллизуется с образованием отдельных самостоятельных фаз: шлака и чугуна. В общем виде стадии процесса получения гранулированного чугуна можно представить в виде следующей последовательности операций [11]:

*Окомкованная шихта на основе концентрата руды БРУ* →

*Плавка с восстановлением железа и выделением CO<sub>2</sub> (300–1200°C)* →

*Расплавление железа (1200–1300°C),*

*Расплавление шлака (1350–1400°C), формирование металлической и шлаковой фаз* →

*Разделение фаз (1400°C)* →

*Охлаждение и разделение фаз на чугун и шлак (1150–800°C)*

### Лабораторные эксперименты по получению гранулированного чугуна из концентрата руды БРУ

В качестве углеродистого восстановителя в экспериментах по восстановлению железа из концентрата руды БРУ использовали каменный уголь Шубаркольского месторождения (г. Караганда, Казахстан) [16], крупность частиц которого не превышала 0,25 мм. Согласно данным проведенного технического анализа, данный углеродный материал имеет в своем составе 1,7% золы, что является очень хорошим показателем с точки зрения получения в последующем товарного продукта (гранулированного чугуна). Химический состав золы каменного угля Шубаркольского месторождения следующий, мас.% [11]: SiO<sub>2</sub> – 56,374, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,8, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 25,3, CaO – 10,7, TiO<sub>2</sub> – 0,62, NiO – 0,022, MnO – 0,094, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,014, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1,05, CuO – 0,026. Влажность угля составляет 14,5%, а количество летучих – 43,5%. По данным элементного анализа данный углеродный материал содержит, мас.%: углерода – 54,1, водорода – 10,86, кислорода – 31,63, азота – 3,01, серы – 0,4.

Железomagнезиальный концентрат БРУ содержит большое количество MgO в своем составе, в пересчете на шлакообразующую часть концентрата содержание которого составляет 60%. Для получения шлака с температурой плавления в требующем для технологии интервале температур (1300–1380°C) следует снизить содержание MgO в шлакообразующей части до 20% путем добавления флюсов (CaO и SiO<sub>2</sub>), что увеличивает количество образующегося шлака. В качестве флюсов в шихте для образования шлака в наших экспериментах использовали магнезит и химические реагенты марки «Ч»: оксиды кальция и кремния. Количество вводимых в шихту флюсов рассчитывали таким образом, чтобы сформировать легкоплавкий шлак с температурой плавления ~ 1360°C и примерным составом, мас.%: CaO – 25, SiO<sub>2</sub> – 55 MgO – 20 (см. рис. 2).

Для проведения экспериментов необходимо использовать окомкованную шихту. В качестве связующего применяли карбоксилметилцеллюлозу (КМЦ).

Методика лабораторных исследований заключалась в отработке технологии углетермического восстановления железа из железосодержащего сырья с получением гранулированного чугуна и шлака.

Взвешивание компонентов шихты и продуктов плавки проводилось на лабораторных весах DL-200 («AND», Япония) с точностью измерения 0,001 г. Навески компонентов шихты высыпались в фарфоровую ступку и перемешивались до однородного состояния; после добавления воды формировались окатыши массой 10–15 г, которые сушились при температуре 200°C в течение 30 мин в лабораторной муфельной электропечи ЭКПС 10 (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия).

Высокотемпературную обработку окатышей

осуществляли в высокотемпературной печи LHT 08/17 («Nabertherm», Германия). Управление лабораторной печью LHT 08/17 осуществлялось с помощью электронного блока управления, который позволяет установить программу термообработки – задать температуру, продолжительность и скорость нагрева. Широкий спектр возможностей регулирования печи обеспечивает высокую точность воспроизводства режима пирометаллургического процесса.

В корундовый тигель объемом ~55 мл помещали 20–30 г восстановителя, на поверхность которого помещался подготовленный окатыш из концентрата руды БРУ. Тигель загружали в печь при температуре 1200°C, далее температура повышалась в течение 10 мин до 1350°C и далее также в течение 10 мин до 1400°C (с выдержкой в течение 5 мин при данной температуре). На 25-й минуте температуру снижали до 1150°C. Далее тигель с продуктами плавки (грану-

лированным чугуном и шлаком) извлекали из печи и охлаждали (в емкости с водой). Результаты плавки приведены в табл. 2.

Шлак анализировали на содержание основных компонентов методом РФА, пробы чугуна исследовали на содержание в нем железа и основных примесей на рентгеноспектральном микроанализаторе САМЕВАХ SX50 (Самеса, Франция).

В результате экспериментов получен шлак и гранулы чугуна визуально хорошего качества (рис. 3), при охлаждении в воде чугун отделяется от шлака. Образующийся шлак – черного цвета, стекловидный. В ходе опытов установлено, что большой объем шлакообразующей части в шихте оказывает негативное влияние на извлечение железа в чугун. В среднем извлечение железа составило 65,9%, а соотношение чугуна/шлак составило ~25/75. Состав получаемого чугуна представлен в табл. 3.

Таблица 2

Результаты экспериментов по плавке шихты из концентрата руды БРУ

Номер опыта	Содержание в шихте, %						Масса, г			Извлечение Fe в чугун, %
	Концентрат руды БРУ	Уголь	CaO	SiO <sub>2</sub>	КМЦ	Вода	Вес окатыша после сушки	Чугун	Шлак	
1	6,699	2,133	1,314	2,776	0,1	4,5	14,301	2,519	6,519	72,62
2	6,699	2,133	1,314	2,776	0,1	4,5	15,03	2,228	6,291	63,12
3	6,699	2,133	1,314	2,776	0,1	4,5	14,994	2,322	6,325	65,84
4	6,699	2,133	1,314	2,776	0,1	4,5	15,03	2,188	6,391	61,99



Рис. 3. Продукты плавки шихты из концентрата руды БРУ

Таблица 3

Химический состав гранулированного чугуна, полученного при переработке шихты на основе железосодержащего концентрата руды БРУ

Элементы	Fe	C	Si	S	Mn	Ni
Содержание, мас.%	96,78	2,93	0,13	0,08	0,05	0,03

### Заключение

Проведены эксперименты по переработке железомагнезиального концентрата (с содержанием железа 48,72%) руды Бакальского месторождения, при которых подтвердилось получение гранулированного чугуна.

Концентрат руды БРУ содержит в своем составе большое количество MgO, который негативно влияет на процесс получения гранулированного чугуна. Это связано с тем, что при большом количестве MgO температура плавления шлака резко возрастает в шлакообразующей части шихты. Требованием технологии получения гранулированного чугуна является получение относительно легкоплавкого шлака с температурой плавления 1300–1380°C. Вследствие этого в шихту необходимо добавлять большое количество флюсов, что, в свою очередь, приводит к образованию значительного количества шлака. В продуктах плавки соотношение чугун/шлак составило ~25/75. Вместе с тем проведенные опыты показали, что извлечение железа в конечный продукт составило 65,9%, что выше на ~28% при переработке руды БРУ по аналогичному методу [10]. Данные характеристики говорят о невысокой эффективности переработки концентрата руды БРУ с получением гранулированного чугуна при его использовании в качестве единственного железосодержащего сырья в шихте. Кроме того, обогащение данного материала с целью снижения оксида магния в его составе невозможно традиционными методами обогащения, поскольку железо в основном находится в виде магнезиоферрита, который относится к шпинелям и является прочным химическим соединением, что и затрудняет его разделение на силикатную и железооксидную составляющие.

В связи с этим рекомендовано использовать концентрат руды БРУ в качестве компонента шихты при необходимости вовлечения данного сырьевого материала в переработку.

### Список источников

1. Backman J., Kyllönen V., Helaakoski H. Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods // IFAC PapersOnLine. 2019. Vol. 52. Issue 13. P. 1174–1179. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.355>.
2. Каскин К.К. Жидкофазные процессы прямого получения чугуна и стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 4. С. 18–21.
3. Ботников С.А. Новый подход к разработке эффективной технологии производства стали с низким содержанием неметаллических включений // Черные металлы. 2023. № 7. С. 22–29. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.07.02>.
4. Birat J.-P. Steel cleanliness and environmental metallurgy // Metallurgical Research and Technology. 2016. Vol. 113. No. 2. 201.
5. Nielsen H. Technology and scale changes: The steel industry of a planned economy in a comparative perspective // Economic History of Developing Regions. 2018. Vol. 33. Issue 2. P. 90–122. <https://doi.org/10.1080/20780389.2018.1432353>.
6. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления: монография. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2021. 324 с.
7. Металлургия чугуна: учебник для вузов / Е.Ф. Вегман, Н.Ф. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин, И.Ф. Курунов, А.Е. Пареньков, П.И. Черноусов. М.: Академкнига, 2004. 774 с.
8. Улучшение эколого-экономических параметров технологий литейного производства на основе использования рентгеновской вычислительной томографии / В.Н. Самочкин, В.И. Барахов, Л.А. Васин, В.А. Курский // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2018. № 4. С. 33–41.
9. Леонтьев Л.И., Колпаков С.В., Селиванов Е.Н. Современные проблемы металлургии России и Урала // Недвижимость и инвестиции. Правовое регулирование. 2007. № 3–4(32–33). С. 1–6.
10. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Дудчук И.А. Опыт проблемы и перспективы переработки шпатовых железняков Бакальского месторождения // Теория и технология металлургического производства. 2017. № 1(20). С. 7–15.
11. О возможности переработки сидеритовых руд месторождения Южного Урала с получением гранулированного чугуна / Д.Н. Чувашов, Н.В. Немчинова, В.Е. Черных, А.А. Тютрин // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 3(42). С. 31–38.
12. Рощин В.Е., Рощин А.В. Физика пирометаллургических процессов. М: Инфа-Инженерия, 2021. 301 с.
13. Теория металлургических процессов: учебник / Г.Г. Минеев, Т.С. Минеева, И.А. Жучков, Е.В. Зелинская. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. техн. ун-та, 2010. 522 с.
14. Бобкова Н.М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. Минск: Вышэйш. шк., 2007. 301 с.
15. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск третий. Тройные силикатные системы / Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, В.В. Ланин, Н.Н. Курцева, А.И. Бойкова; под ред. В.П. Барзаковского. Л.: Наука. Ленингр. отд., 1972. 448 с.
16. Анализ возможного использования углей месторождения Шубарколь при выплавке технического кремния / А.А. Сафонов, А.Д. Маусымбаева, В.С. Портнов, В.И. Парафилов, С.В. Коробко // Уголь. 2019. № 2(1115). С. 68–72.

**Сведения об авторах**

**Чувашов Дмитрий Николаевич** – аспирант кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: dimachuvashov@list.ru

**Немчинова Нина Владимировна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: ninavn@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

---

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

**PROCESSING OF IRON MAGNESIA ORE CONCENTRATE OF THE BAKAL MINE DEPARTMENT TO PRODUCE GRANULATED CAST IRON**

**Chuvashov Dmitrii N.** – post-graduate student of the Department of Non-Ferrous Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: dimachuvashov@list.ru

**Nemchinova Nina V.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Non-ferrous Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: ninavn@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

**Abstract.** In recent years, the development of methods for processing poor and difficult-to-process iron ores has become important due to the depletion of rich iron ore deposits. The purpose of the research is to consider the possibility of obtaining direct reduced iron (granulated cast iron) by processing the siderite ore concentrate of LLC Bakalskoe Mining Administration of the Southern Urals (Bakal, Chelyabinsk region). The object of research was samples of concentrate containing iron oxide ~69.6% wt.; iron in the samples averaged 48.72%. The main compounds in the concentrate sample are magnesioferrite; in small quantities, quartz, feldspar, hematite, dolomite, siderite, and clay mineral may be present. Coal from the Shubarkol deposit (Karaganda, Kazakhstan) with a particle size of 0.25 mm was used as a carbonaceous reducing agent. Calcium and silicon oxides were added to the charge as fluxes to obtain a low-melting slag (with a melting point of ~1360 °C) of the following composition, wt.%: 25 CaO, 55 SiO<sub>2</sub>, 20 MgO. Melting of the pelletized charge was carried out in a laboratory furnace LHT 08/17 (Nabertherm, Germany), at an initial charging temperature of 1200°C, followed by gradual (within 10 min) heating to 1350 °C. Next, the crucible with the charge was also gradually heated to 1400°C and held at this temperature for 5 minutes. Then the temperature decreased to 1150 °C. As a result of the experiments, the possibility of obtaining granulated cast iron from the studied concentrate was confirmed; iron extraction was 65.9%. It is recommended to use this concentrate as an additional component of an iron-containing charge to produce granulated cast iron.

**Keywords:** Bakal Mining Administration, ferromagnesian concentrate, pellets, flux, granular pig iron, slag.

---

Ссылка на статью:

Чувашов Д.Н., Немчинова Н.В. Переработка железомagneзиального концентрата руды бакальского рудоуправления с целью получения гранулированного чугуна // Теория и технология металлургического производства. 2024. №1(48). С. 4-9.  
Chuvashov D.N., Nemchinova N.V. Processing of iron magnesia ore concentrate of the bakal mine department to produce granulated cast iron. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 48, no. 1, pp. 4-9.