

Твердофазное восстановление оксидов Fe_xO_y и Mn_xO_y углеродом в условиях низкотемпературного обжига шихты на основе марганцевых отходов

¹**ТАЖИЕВ Елеусиз Болатович**, PhD, старший преподаватель, eleusiz_t1990@mail.ru,

¹**АРГЫН Айдар Абдилмаликулы**, PhD, старший научный сотрудник, aidarargyn@gmail.com,

²***ЖОЛДАСБАЙ Ержан Есенбайулы**, PhD, доцент, zhte@mail.ru,

¹**ҚҰРМАНСЕЙТОВ Мұрат Бауыржанұлы**, PhD, главный научный сотрудник, murat.kmb@mail.ru,

¹**ҚОЙШИНА Гүлзада Мынғышқызы**, PhD, ассоциированный профессор, gulzada.koishina@mail.ru,

¹НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан,

²АО «Жезказганский университет имени О.А. Байконурова», пр. Алашахана, 16, Жезказган, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. На основании комплексных аналитических исследований, включающих методы атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и рентгенофазового анализа промежуточных и конечных продуктов, изучен вещественный и минералогические составы марганцевых отходов Джездинского ГОКа. Показано, что низкое содержание железа и марганца в отходах предопределяет необходимость проведения предварительной операции по их обогащению. Изучен механизм поведения оксидов железа и марганца в условиях низкотемпературного обжига шихты, составленной на основе марганцевых отходов. На основании термодинамических расчетов реакций восстановления оксидов железа и марганца углеродом показана возможность полного восстановления железа до металла из высших и низших его оксидов. Твердофазному восстановлению углеродом подвергаются высшие оксиды марганца. Устойчивый оксид марганца при температурах проведения обжига до металла практически не восстанавливается в силу положительных значений свободной энергии Гиббса. Для повышения содержания железа в шихте необходимо предусмотреть добавление в шихту железосодержащих отходов с высоким содержанием железа, например, прокатной окалины и др. При компоновке окончательной шихты необходимо учитывать оптимальный расход углерода: расход углерода не должен превышать стехиометрически необходимое его количество для восстановления оксидов железа и марганца. Неиспользованный для восстановления MnO избыточный углерод останется в шихте и полностью будет использован в качестве восстановительного реагента при плавке. Полученный после обжига металлизированный продукт должен быть подвергнут грануляции с целью получения прочных гранулированных окатышей, которые будут представлять окончательную моношихту для получения ферромарганца высокого качества.

Ключевые слова: марганцевый отход, вещественный состав, фазовый состав, термодинамика, энергия Гиббса, углерод, твердофазное восстановление, оксид железа, оксид марганца.

Введение

Мировая практика технологии производства ферросплавов построена на восстано-

вительной плавке шихты, составленной из кусковых руд, кокса и флюса.

Одной из кардинальных проблем для

предприятий является переработка мелких материалов, получаемых при сортировке сырья основного производства стали, и мелких отходов от обогащения марганцевых и хромовых руд [1, 2, 3].

Мелкие материалы, образующиеся при сортировке исходного окускованного сырья на предприятиях не могут быть возвращены к переработке традиционными технологическими процессами, что связано с определенными издержками. Возвращение их в традиционный технологический цикл возможно постольку, поскольку они поддаются окускованию с максимально низкими издержками подготовки. Сегодня накопленные объемы отходов определяют критический уровень их влияния на грунтовые воды, водную флору и окружающую среду [4, 5, 6].

Наиболее распространенный способ окускования мелких рудных материалов, концентратов, а также мелкодисперсных отходов от обогащения руд – агломерация, которая реализуется при температуре 1450°C, не обеспечивает необходимой кондиции получаемого материала: для оптимального размягчения мелких частиц необходимы более высокие температуры (1600-1700°C), которые обычные агломерационные машины не выдерживают. Сегодня агломерация не представляется эффективной, как с точки зрения технологии, так и с экологической стороны.

Второй широко используемый способ подготовки мелкодисперсного материала к переработке – окускование путем организации производства окатышей. Процесс требует значительных издержек: измельчения мелких отходов до дисперсного состояния, расход связующих материалов, использование дополнительного оборудования.

Перечисленные недостатки сдерживают переработку мелких рудных материалов, концентратов и мелкодисперсных отходов от обогащения марганцевых и хромовых руд. В научной литературе известен ряд работ, направленных на решение вопроса переработки мелких отходов [7-11]. Несмотря на высокие технолого-экономические показатели, ни один из них не нашел широкого применения на практике. Сегодня выбор и обоснование технологии диктуются не только с точки зрения экономической целесообразности, но и с учетом обеспечения ее экологической безопасности. Разработанные технологии предполагают использование сложного оборудования, требуют большого расхода реагентов и сопровождаются большим выходом промежуточных продуктов, которые необходимо подвергать дальнейшей переработке.

Целесообразным представляется создание технологий для переработки сбалансиро-

ванной шихты на основе мелких отходов с получением конечного металла (ферросплава) путем проведения предварительно твердофазного низкотемпературного обжига. Это требует пересмотра устоявшегося положения классической теории о том, что восстановление металлов из их оксидов коксом осуществляется исключительно в жидкой фазе при высоких температурах.

Вещественный и минералогические составы марганцевых и хромовых отходов от обогащения соответствующих руд уже определяют их переработку путем не жидкофазного, а твердофазного восстановления металлов из их оксидов твердым углеродом. При этом задача по переработке отходов сводится к составлению комплексной системы (шихты) на основе марганец- или хромсодержащих отходов с добавлением восстановительного реагента (углерода), которая подвергается низкотемпературному обжигу. Использование для приготовления шихты в качестве восстановителя не природного, а древесного угля, получаемого пиролизом из биологических отходов, начиная от сорняковых трав до отходов сельхозугодий (соломы, стеблей хлопчатника и др.), существенно повышает эффективность технологии с точки зрения экологических требований.

В настоящей работе на основании термодинамического анализа реакций взаимодействия оксидов железа и марганца с углеродом проведена оценка поведения оксидов железа и марганца, применительно к условиям низкотемпературного обжига шихты, составленной на основе марганцевых отходов.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использованы пробы марганцевых отходов, полученные от обогащения марганцевых руд Джездинского ГОКа. Предварительно отобранные пробы фракции 5-8 мм были измельчены до крупности менее 1 мм.

Элементные составы исходных компонентов шихты и усредненные составы шихты определяли с помощью масс-спектрометра Agilent 7700 Series ICP-MS (США), методом оптической эмиссионной спектрометрии (Optima 2000 DV с индукционно-связанной плазмой фирмы «Perkin Elmer SCIEX»), а также с использованием гравиметрического и химического методов анализа.

Рентгенофазовый анализ проведен на приборе D8 Advance (Bruker AXS GmbH), α -Cu, напряжение на рентгеновской трубке 40/40. Обработка полученных данных дифрактограмм и расчет межплоскостных расстояний проводили с помощью программного обеспечения EVA. Расшифровка

проб и поиск фаз осуществляли с помощью программы Search/match с использованием Базы данных карточек ASTM. Ошибка количественного анализа $\pm 5\%$.

Кристаллооптические анализы проб проводили с использованием растрового электронного микроскопа и микроскопов Olympus BX-51 и Leica DM2500.

Основным методологическим принципом технологии является теоретическое описание металлургических процессов на основе термодинамического анализа реакций взаимодействия компонентов шихты с твердым углеродом, протекающих в условиях низкотемпературного обжига шихты (773-1873 K). Расчеты сводились к определению убыли свободной энергии Гиббса реакций в зависимости от температуры. Исходные данные получены из веб-сайта NIST-JANAF Thermochemical Tables (<http://kinetics.nist.gov/janaf>). Расчеты проведены с использованием специальной программы.

Результаты и их обсуждение

Элементный и фазовый состав марганец-содержащих отходов Джездинского ГОК показаны в таблицах 1 и 2.

Результаты рентгенофазового анализа отходов показали высокое содержание свободного кварца в них – 13% (таблица 2).

Железо и марганец, в основном, представлены в виде высших и низших оксидов. Шлакообразующие компоненты (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO) представлены в виде свободного кварца, алюмосиликатов и кальцита.

В основу исследования поведения компонентов марганцевого отхода положен термодинамический анализ реакций взаимодействия между высшими и низшими оксидами железа и марганца с твердым углеродом. Выбранный температурный интервал (773-1873 K) охватывает область низкотемпературного обжига, применительно к переработке шихты, составленной на основе марганцевых отходов и угля.

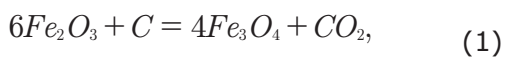
Таблица 1 – Элементный анализ марганцевых отходов

Элементы	Содержание компонентов, % масс.	Элементы	Содержание компонентов, % масс.
O	44,64	K	0,258
Mn	16,32	Ca	16,631
Fe	4,68	Ti	0,167
Na	0,28	As	0,04
Mg	0,831	Cu	0,012
Al	1,38	Zn	0,072
Si	7,04	Pb	0,244
P	0,022	Sr	0,133
Cl	0,038	Ba	6,521
S	0,682	Pb	0,002

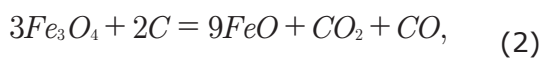
Таблица 2 – Результаты полуколичественного анализа отходов

Минералы	Формула	Содержание
Calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	41,2%
Quartz, syn	SiO_2	13,0%
Braunite-1Q, syn	$\text{Mn}_7\text{O}_8(\text{SiO}_4)$	10,1%
Bixbyite, ferrian	FeMnO_3	9,9%
Baryte	BaSO_4	6,6%
Pigeonite	$\text{Mg}_{0.69}\text{Fe}_{0.23}\text{Ca}_{0.08}\text{SiO}_3$	6,0%
Dickite-2M1	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5,6%
Hematite, syn	$\text{Fe}_{1.957}\text{O}_3$	4,6%
Iron Manganese	Fe_3Mn_7	3,0%

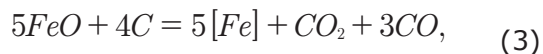
Механизм восстановления оксидов железа и марганца можно представить системой следующих реакций:



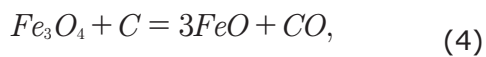
$$\Delta G_T^\circ = 69,913 - 0,298 \cdot T$$



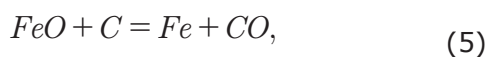
$$\Delta G_T^\circ = 422,48 - 0,43 \cdot T$$



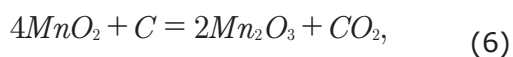
$$\Delta G_T^\circ = 512,25 - 0,43 \cdot T$$



$$\Delta G_T^\circ = 196,96 - 0,2 \cdot T$$



$$\Delta G_T^\circ = 153,37 - 0,15 \cdot T$$



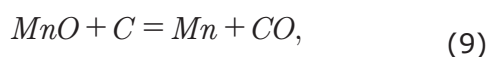
$$\Delta G_T^\circ = -232,8 - 0,2 \cdot T$$



$$\Delta G_T^\circ = -199,25 - 0,15 \cdot T$$



$$\Delta G_T^\circ = 45,74 - 0,23 \cdot T$$



$$\Delta G_T^\circ = 276,22 - 0,16 \cdot T$$

Зависимость свободной энергии Гиббса (ΔG_T°) от температуры для реакций взаимодействия оксидов железа и марганца с углеродом показана на рисунках 1, 2.

Как показывают результаты термодинамических расчетов, фазовое превращение гематита, соответствующее его восстановлению углеродом по реакции (1), начинается уже при температуре ~ 773 К, о чем свидетельствует высокое значение свободной энергии Гиббса, равное $\Delta G_{773K} = -158$ кДж/моль. Дальнейший рост температуры усиливает протекание реакции (1) и в пределах температуры обжига 1473 К достигает $\Delta G_{773K} = -370,5$ кДж/моль (рисунок 1).

Образующийся по реакции (1) магнетит, вступая во взаимодействие с углеродом по реакциям (2) и (4), переходит в стабильный низший оксид железа – вюстит (FeO). Реакции начинаются при температуре 973 К и, с ростом температуры, повышаются (рисунок 1). При температуре 1473 К значения свободной энергии Гиббса для реакций (2) и (4) составляют: $\Delta G_{1473K} = -207,4$ кДж/моль и $\Delta G_{1473K} = -98$ кДж/моль, соответственно.

Установлена возможность восстано-

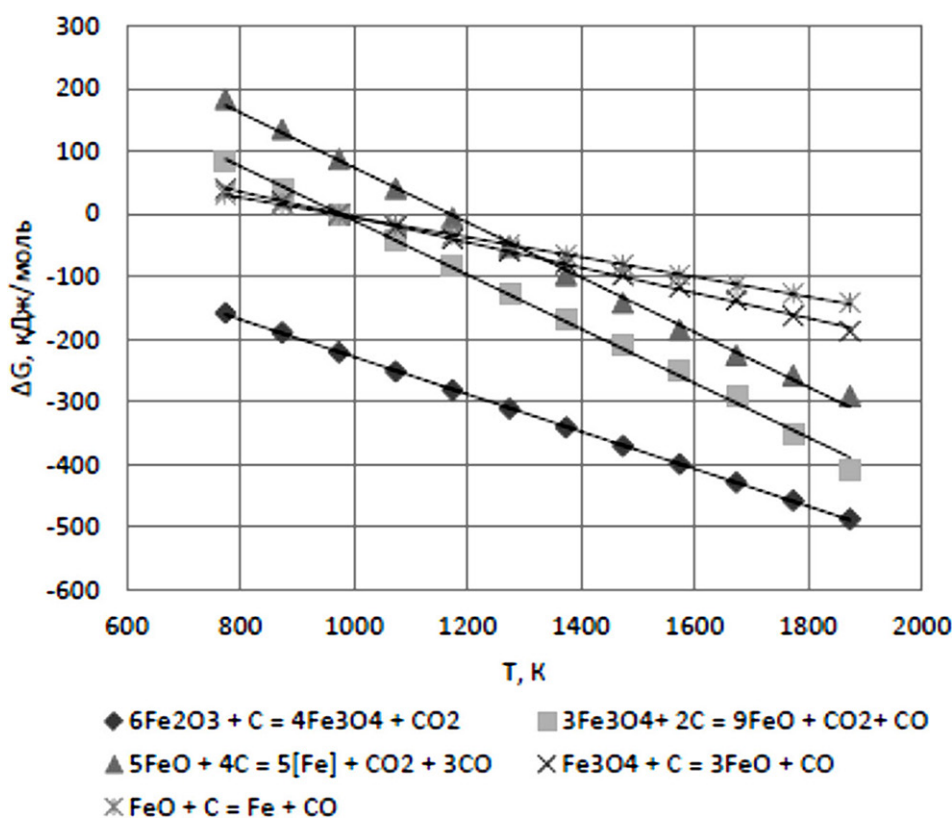


Рисунок 1 – Убыль свободной энергии Гиббса реакций (1)-(5) в зависимости от температуры

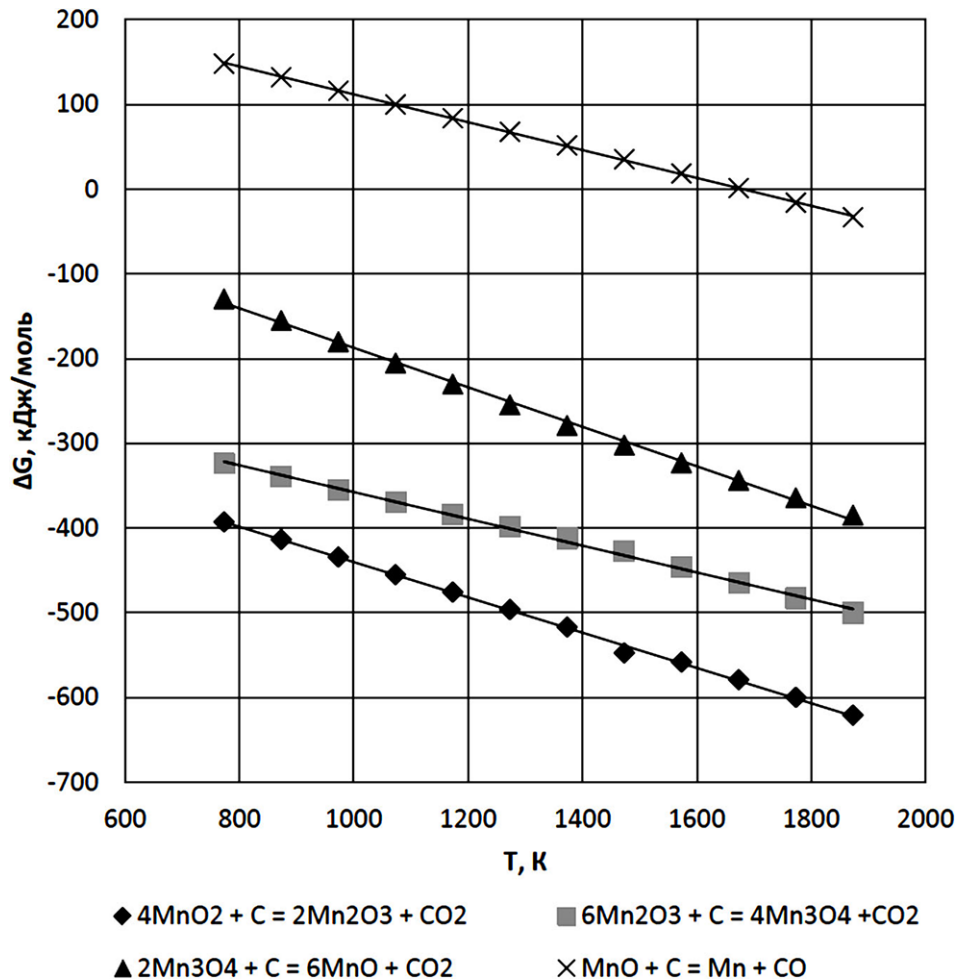


Рисунок 2 – Убыль свободной энергии Гиббса реакций (6)-(9) в зависимости от температуры

ния прочного вюстита углеродом до металлического железа, по реакциям (3), (5). Причем восстановление вюстита при стехиометрическом расходе углерода начинается несколько раньше, при температуре 973 К ($\Delta G_{973\text{К}} = -0,63$ кДж/моль). При избыточном расходе углерода протекание реакции (5) при данной температуре невозможно, в силу положительного значения свободной энергии Гиббса, $\Delta G_{973\text{К}} = 87,71$ кДж/моль. Протекание реакции (5) начинается при температуре 1073 К. Данное положение имеет важное значение для практики. При организации технологии получения ферромарганца из предварительно подготовленной шихты и твердофазного ее восстановления наличие избыточного расхода углерода не требуется.

Несколько иначе протекает механизм фазового превращения высших оксидов марганца до металлического состояния при обжиге.

На рисунке 2 видно, что высшие оксиды марганца начинают восстанавливаться углеродом до прочного его оксида MnO, по реак-

циям (6), (7) и (8), при температуре 773 К. Причем значения свободной энергии Гиббса указанных реакций при данной температуре, равные: $\Delta G_{973\text{К}} = -392,8$ кДж/моль; $\Delta G_{973\text{К}} = -324$ кДж/моль и $\Delta G_{973\text{К}} = -129,6$ кДж/моль, соответственно, намного превышают значение свободной энергии Гиббса реакции (1) – восстановления гематита углеродом. Однако дальнейшее восстановление MnO до металла практически невозможно, о чем свидетельствуют положительные значения энергии Гиббса реакции (9) вплоть до температуры 1773 К. Восстановление низшего прочного оксида марганца возможно исключительно при высоких температурах – выше 1773 К (рисунок 2).

Из полученных результатов можно сформулировать механизм поведения оксидов железа и марганца в условиях низкотемпературного восстановительного обжига шихты, составленной на основе марганцевых отходов и твердого углерода. В процессе обжига железо полностью восстанавливается из своих оксидов до металлического

состояния. Высшие оксиды марганца полностью восстанавливаются до прочного своего оксида MnO, причем дальнейшее его восстановление в условиях низкотемпературного обжига до металлического марганца, практически невозможно. В результате в процессе обжига формируется металлизированный материал, готовый к дальнейшей восстановительной его плавке при высоких температурах.

Полученные результаты позволяют сделать ряд рекомендаций для практики. Учитывая, что содержание марганца в отходах незначительно (16-20%), перед подготовкой и компоновкой шихты необходимо проведение предварительной операции обогащения отхода. Для повышения содержания железа в шихте необходимо предусмотреть добавление в шихту железосодержащих отходов с высоким содержанием железа, например, прокатной окалины и др. При компоновке окончательной шихты необходимо учитывать оптимальный расход углерода: расход углерода не должен превышать стехиометрически необходимое его количество для восстановления оксидов железа и марганца по реакциям (1), (4), (5) и (6)-(9). При этом не использованный для восстановления MnO избыточный углерод, останется в шихте и полностью будет использован в качестве восстановительного реагента при восстановительной плавке.

После проведения обжига полученный металлизированный материал подвергается грануляции с целью получения прочных гранулированных окатышей, которые представляют окончательную моношихту для получения ферромарганца высокого качества путем восстановительной плавки при высокой температуре.

Выводы:

1. Обоснована возможность переработки

марганцевых отходов от обогащения марганцевых руд Джездинского ГОКа путем проведения низкотемпературного обжига предварительно приготовленной шихты на основе отходов и угля.

2. На основании термодинамического анализа изучено поведение оксидов железа и марганца в условиях восстановительного обжига. Установлено, что при твердофазном взаимодействии оксидов железа и марганца с углеродом железо полностью восстанавливается из своих оксидов до металлического железа.

3. Результатами термодинамических расчетов показано, что в условиях обжига высшие оксиды марганца практически полностью восстанавливаются до MnO. Дальнейшее восстановление MnO до металлического марганца в условиях обжига не представляется возможным, о чем свидетельствуют положительные значения свободной энергии Гиббса реакции (9).

4. Полученные результаты будут использованы для проведения дальнейших экспериментальных исследований по переработке марганцевых и других отходов, направленных на разработку концептуальной технологии их переработки.

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023-2025 годы по приоритетному направлению «Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технологии, безопасные изделия и конструкции» проекта AP19576391 «Разработка инновационной технологии получения новых сплавов из накопленных некондиционных многокомпонентных хром-, марганец содержащих отходов с применением Big Data».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xie, M.Y.; Xu, H.; Dong, X.B.; Liu, J.H. Thermodynamic analysis of decarburization and hold manganese by mixed blowing carbon dioxide in high manganese stainless steel. *Ferroalloy* 2021, Vol. 52, Pp. 16-18.
2. Norberg, N.; et al. Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low – CO₂ steel production technologies. *Appl. Energy* 2018, Vol.213, Pp. 384-407.
3. Mousa E., Wang C., Riesbeck J., Larsson M. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. No. 65. Pp. 1247-1266.
4. Matveeva V.A., Alekseenko A.V., Karthe D., Puzanov A.V. Manganese Pollution in Mining-Influenced Rivers and Lakes: Current State and Forecast under Climate Change in the Russian Arctic. *Water.* 2022, Vol. 14, No. 1091. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14071091>

5. Monaci, F.; Ancora, S.; Bianchi, N.; Paoli, L.; Loppi, S. Combined use of native and transplanted moss for post-mining characterization of metal(loid) river contamination. *Sci. Total Environ.* – 2021. – Vol. 750. No. 141669 DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.141669
6. Kim, Y. Geochemical Behavior of Potentially Toxic Elements in Riverbank-Deposited Weathered Tailings and Their Environmental Effects: Weathering of Pyrite and Manganese Pyroxene. *Minerals* 2020, Vol. 10, No. 413. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10050413>
7. Есенгалиев Д.А., Исагулов А.З., Байсанов С.О. и др. Термографические исследования марганцевого сырья и шихт на его основе // Труды университета КарТУ. 2019. № 3. С. 23-26.
8. Байсанов С.О., Байсанов А.С., Есенгалиев Д.А. и др. Разработка технологии выплавки рафинированного ферромарганца с применением специальных комплексных восстановителей // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 689-694.
9. Akar Sen G. Application of full factorial experimental design and response surface methodology for chromite beneficiation by Knelson concentrator // *Minerals.* – 2016. Vol. 6, Iss. 1. P. 5.
10. Kumar C.R., Tripathy S.K., Rao D.S. Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator // *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 2009. Vol. 8, Iss. 5. Pp. 367-378.
11. Tripathy S.K., Ramamurthy Y., Singh V. Recovery of chromite values from plant tailings by gravity concentration // *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 2011. Vol. 10, Iss. 1. Pp. 13-25.

Марганец қалдықтарына негізделген шихтаны төмен температуралы күйдіру жағдайында Fe₃O₄ және Mn₂O₃ оксидтерін көміртегімен қатты фазалы тотықсыздандыру

¹**ТАЖИЕВ Елеусиз Болатович**, PhD, аға оқытушы, eleusiz_t1990@mail.ru,

¹**АРГЫН Айдар Әбділмәлікұлы**, PhD, аға ғылыми қызметкер, aidarargyn@gmail.com,

²***ЖОЛДАСБАЙ Ержан Есенбайұлы**, PhD, доцент, zhte@mail.ru,

¹**ҚҰРМАНСЕЙТОВ Мұрат Бауыржанұлы**, PhD, бас ғылыми қызметкер, murat.kmb@mail.ru,

¹**ҚОЙШИНА Гүлзада Мынғышқызы**, PhD, қауымдастырылған профессор, gulzada.koishina@mail.ru,

¹«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Сәтбаев көшесі, 22а, Алматы, Қазақстан,

²«Ө.А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті» АҚ, Алашахан даңғылы, 1б, Жезқазған, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Индуктивті байланысқан плазмамен атомдық-эмиссиялық спектрометрия және рентгендік фазалық талдау әдістерін қамтитын аралық және соңғы өнімдерді кешенді аналитикалық зерттеулер негізінде Жезден КБК марганец қалдықтарының заттық және минералогиялық құрамы зерттелді. Қалдықтардағы темір мен марганецтің аз мөлшері оларды алдын-ала байыту операциясын жасау қажеттілігін анықтайды. Марганец қалдықтары негізінде жасалған шихтаны төмен температурада күйдіру жағдайында темір және марганец оксидтерінің бөлініп таралу механизмі зерттелді. Темір және марганец оксидтерінің көміртегімен тотықсыздану реакцияларының термодинамикалық есептеулеріне сүйене отырып, темірді оның жоғары және төменгі оксидтерінен металға толық тотықсыздандыру мүмкіндігі көрсетілген. Жоғары марганец оксидтері көміртектің қатты фазалық тотықсыздануына ұшырайды. Күйдіру температурасында Гиббстің еркін энергиясының оң мәндеріне байланысты іс жүзінде тұрақты марганец оксиді металға дейін тотықсызданбайды. Шихтадағы темірдің мөлшерін арттыру үшін құрамында темірі жоғары қалдықтарды, мысалы, илектеу окалинаны және т.б. шихтаға қосуды қамтамасыз ету қажет. Соңғы шихтаны дайындау кезінде көміртектің оңтайлы шығынын ескеру қажет: көміртегі шығыны темір мен марганец оксидтерін тотықсыздандыру үшін стехиометриялық қажетті мөлшерінен аспауы керек. MnO-ны тотықсыздандыру үшін пайдаланылмаған артық көміртек шихтада қалады және тотықсыздандырып балқыту кезінде тотықсыздандырғыш реагент ретінде толығымен пайдаланылады. Жоғары сапалы ферромарганец алу мақсатында күйдіруден кейін

алынған металдандырылған өнім соңғы моношихта болып берік түйіршіктер алу үшін грануляциялауға жіберілуі қажет.

Кілт сөздер: марганец қалдықтары, заттық құрамы, фазалық құрамы, термодинамика, Гиббс энергиясы, көміртегі, қатты фазалық тотықсыздандыру, темір оксиді, марганец оксиді.

Solid-phase Reduction of $FexOy$ and $MnxOy$ Oxides by Carbon Under Conditions of Low-temperature Firing of a Charge Based on Manganese Waste

¹**TAZHIYEV Yeleussiz**, PhD, Senior Lecturer, eleusiz_t1990@mail.ru,

¹**ARGYN Aidar**, PhD, Senior Researcher, aidarargyn@gmail.com,

²***ZHOLDASBAY Erzhan**, PhD, Associate Professor, zhte@mail.ru,

¹**KURMANSEITOV Murat**, PhD, Chief Researcher, murat.kmb@mail.ru,

¹**KOISHINA Gulzada**, PhD, Associate Professor, gulzada.koishina@mail.ru,

¹NCJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev», Satpayev Street, 22a, Almaty, Kazakhstan,

²JSC «Zhezkazgan Baikonurov University», Alashakhan Avenue, 1b, Zhezkazgan, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. Based on complex analytical studies, including methods of atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma and X-ray phase analysis of intermediate and final products, the material and mineralogical compositions of manganese wastes of the Dzhezdzinsky GOK have been studied. It is shown that the low content of iron and manganese in waste determines the need for a preliminary operation for their enrichment. The mechanism of behavior of iron and manganese oxides under conditions of low-temperature firing of a charge composed on the basis of manganese waste has been studied. Based on thermodynamic calculations of reactions of reduction of iron and manganese oxides by carbon, the possibility of complete reduction of iron to metal from its higher and lower oxides is shown. Higher manganese oxides are subjected to solid-phase reduction by carbon. Stable manganese oxide at the temperatures of firing to metal is practically not restored due to the positive values of the Gibbs free energy. To increase the iron content in the charge, it is necessary to provide for the addition of iron-containing waste with a high iron content to the charge, for example, rolling scale, etc. When arranging the final charge, it is necessary to take into account the optimal carbon consumption: carbon consumption should not exceed the stoichiometrically necessary amount for the reduction of iron and manganese oxides. The excess carbon not used for the reduction of MnO will remain in the charge, and will be fully used as a reducing reagent during the reduction melting. The metallized product obtained after firing must be subjected to granulation in order to obtain durable granular pellets, which will represent the final monoshift for the production of high-quality ferromanganese.

Keywords: manganese waste, material composition, phase composition, thermodynamics, Gibbs energy, carbon, solid-phase reduction, iron oxide, manganese oxide.

REFERENCES

1. Xie, M.Y.; Xu, H.; Dong, X.B.; Liu, J.H. Thermodynamic analysis of decarburization and hold manganese by mixed blowing carbon dioxide in high manganese stainless steel. *Ferroalloy* 2021, Vol. 52, Pp. 16-18.
2. Norberg, N.; et al. Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low – CO₂ steel production technologies. *Appl. Energy* 2018, Vol.213, Pp. 384-407.
3. Mousa E., Wang C., Riesbeck J., Larsson M. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. No. 65. Pp. 1247-1266.
4. Matveeva V.A., Alekseenko A.V., Karthe D., Puzanov A.V. Manganese Pollution in Mining-Influenced Rivers and Lakes: Current State and Forecast under Climate Change in the Russian Arctic. *Water.* 2022, Vol. 14, No. 1091. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14071091>
5. Monaci, F.; Ancora, S.; Bianchi, N.; Paoli, L.; Loppi, S. Combined use of native and transplanted moss for post-mining characterization of metal(loid) river contamination. *Sci. Total Environ.* – 2021. – Vol. 750. No. 141669 DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.141669
6. Kim, Y. Geochemical Behavior of Potentially Toxic Elements in Riverbank-Deposited Weathered Tailings and Their Environmental Effects: Weathering of Pyrite and Manganese Pyroxene. *Minerals* 2020, Vol. 10, No. 413. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10050413>
7. Esengaliev D.A., Isagulov A.Z., Bajsanov S.O. i dr. Termograficheskie issledovanija margancevogo syr'ja i shiht na ego osnove // Trudy universiteta KarTU. 2019. No. 3. Pp. 23-26.
8. Bajsanov S.O., Bajsanov A.S., Esengaliev D.A. i dr. Razrabotka tehnologij vyplavki rafinirovannogo ferromarganca s primeneniem special'nyh kompleksnyh vosstanovitelej // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. 2018. T. 61. No. 9. Pp. 689-694.
9. Akar Sen G. Application of full factorial experimental design and response surface methodology for chromite beneficiation by Knelson concentrator // *Minerals.* – 2016. Vol. 6, Iss. 1. P. 5.
10. Kumar C.R., Tripathy S.K., Rao D.S. Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator // *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 2009. Vol. 8, Iss. 5. Pp. 367-378.
11. Tripathy S.K., Ramamurthy Y., Singh V. Recovery of chromite values from plant tailings by gravity concentration // *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 2011. Vol. 10, Iss. 1. Pp. 13-25.