

ВЫПЛАВКА ФЕРРОХРОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХРОМОРУДНЫХ БРИКЕТОВ

Аблай Каиртасович Жунусов, канд. техн. наук, zhunusov_ab@mail.ru; **Лязат Байгабылова Толымбекова**, канд. техн. наук, lyazat-t@mail.ru; **Петр Олегович Быков**, канд. техн. наук, bykov_petr@mail.ru; **Олег Вадимович Заякин**, д-р техн. наук, zferro@mail.ru

Некоммерческое акционерное общество «Торайгыров университет», г. Павлодар, Республика Казахстан

Аннотация. В данной статье приводятся результаты опытно-промышленных испытаний выплавки высокоуглеродистого феррохрома с частичной заменой базовой хромовой руды хроморудными брикетами производства ОАО «Донской горно-обогатительный комбинат» в количестве 20–40% от подаваемого хроморудного сырья в АО ТНК Казхром Аксуский завод ферросплавов (Казахстан). Проведенные испытания показали, что применение хроморудных брикетов имеет целый ряд технологических преимуществ. При использовании брикетов вместо руды наблюдается снижение расхода электроэнергии с 7201 до 6184 кВт·ч/т, извлечение хрома возрастает с 80,3 до 85,3%. Применение брикетов решает вопрос вовлечения некондиционного хроморудного сырья в производство и улучшения технико-экономических показателей работы печи.

Ключевые слова: хромовая руда, высокоуглеродистый феррохром, брикеты, ферросплавы, опытные плавки

MELTING OF FERROCHROME WITH THE USE OF CHROME-ORE BRIQUETTES

Ablay K. Zhunusov, Lyazat B. Tolymbekova, Petr O. Bykov, Oleg V. Zayakin

Non-commercial Joint Stock Company «Toraigyrov University», Pavlodar, Republic of Kazakhstan

Abstract. This article presents the results of experimental-industrial tests of high-carbon ferrochrome smelting with partial replacement of the base chromium ore with chromium ore briquettes produced by OJSC «Donskoy Ore Mining and Processing Plant» in the amount of 20–40% of the supplied chromium ore raw materials at TNC Kazchrome JSC Aksu Ferroalloys Plant (Kazakhstan).

The tests carried out have shown that the use of chromium ore briquettes has a number of technological advantages. When using briquettes instead of ore, there is a decrease in electricity consumption from 7201 to 6184 kWh/t, the extraction of chromium increases from 80.3 to 85.3%. The use of briquettes solves the issue of involving substandard chromium ore raw materials in production and improving the technical and economic performance of the furnace.

Keywords: chrome ore, high-carbon ferrochrome, briquettes, ferroalloys, pilot smelting

Технология производства высокоуглеродистого феррохрома в рудовосстановительных электропечах предъявляет ряд требований к шихтовым материалам и, в частности, к фракционному составу сырья: применение материалов крупностью менее 10 мм приводит к снижению технико-экономических показателей ее работы, связанному со значительным пылевыносом и расстройствами хода печи.

Проблема образования мелкой фракции хромовой руды и ее вовлечения в производство ферросплавов актуальна на протяжении многих лет. Попадание хромовой руды в виде мелкой фракции (-10 mm) в количестве 20–50% от общего объема добычи в отвалы влечет дефицит и рост стоимости кусковой руды [1–3].

В условиях Донского ГОКа (г. Хромтау, Казахстан), являющегося основным поставщиком хромовой руды для казахстанских ферросплавных заводов, на долю мелких фракций данного сырья приходится до 60–70%, а доля руды порошко-

образного и пылеватого вида достигает 30% [4, 5]. Использовать мелкие фракции руды в качестве шихтового материала в электропечах неэффективно. При этом плавка будет характеризоваться интенсивным пылевыносом, что приведет к безвозвратным потерям, нестабильной работе печи, снижению технико-экономических показателей и загрязнению окружающей среды. Поэтому для нормальной эксплуатации электропечей, выплавляющих ферросплавы, используют окускованные материалы (брикеты, окатыши, агломераты) [6].

Из способов окускования мелочи руд перед выплавкой ферросплавов в рудовосстановительных печах во многих странах получили развитие все способы – окомкование, брикетирование и агломерация мелких фракций руд [6, 7]. Многие исследователи [7–14] показывают, что использование брикетов и других окускованных материалов при выплавке ферросплавов приводит к сокращению расхода восстановителей и повышению производительности печей. В работе [15]

использование брикетов из хромовой руды при опытной плавке феррохрома показывает снижение расхода электроэнергии на 2,4% и увеличение производительности печи на 3,7%.

В работе [16] также приведены результаты лабораторных исследований, опытно-промышленных испытаний и промышленного использования брикетов экструзии (брэксов) на основе техногенных и природных материалов и топлива для производства ферросплавов. Показана возможность достижения существенной экономии электроэнергии, снижения расхода кокса и повышения степени извлечения основного компонента при работе на брикетированной шихте.

На Аксуском заводе ферросплавов (АЗФ, Казахстан) были проведены опытно-промышленные плавки, направленные на установление возможности применения хроморудных брикетов на крупных и мощных рудовосстановительных печах мощностью 63 МВт с целью вовлечения некондиционного хроморудного сырья в производство и улучшения технико-экономических показателей работы печи. При проведении опытных испытаний была использована партия хроморудных брикетов Донского горно-обогатительного комбината (Донской ГОК, г. Хромтау) для выплавки высокоуглеродистого феррохрома, которые проводили в ферросплавном цехе № 6 АЗФ на печи № 62.

Химический состав хроморудных брикетов, масс. %: 52,4 Cr₂O₃; 6,0 SiO₂; 17,2 MgO; 0,4 CaO; 12,8 FeO; 7,9 Al₂O₃; 0,003 S; 0,01 P.

До начала испытаний перед загрузкой брикетов в печные бункера была отобрана партия брикетов и произведен рассев. Выход мелочи <10 мм составил в среднем 36,8%.

Физико-механические свойства хроморудных брикетов:

- влага, % – 4,40;
 - прочность на сжатие, МПа (кг/см²) – 18,0 (180);
 - прочность, % – 28;
 - размер брикетов, мм – 10×50×40;
 - массовая доля мелочи 0–10 мм, % – 36,8.
- Состав шихты в опытной «колоше», кг:
- хроморудные брикеты – 200–300;
 - хромовая руда (фракции 5–80 мм) – 700;
 - Заринский кокс (Россия) – 215;
 - отсев кварцита – 60;
 - отсев кокса 20–30.

Опытные плавки проводили в пять этапов. На первом этапе – плавки на базовой шихте по принятой в цехе технологии.

На втором этапе мощность печи, согласно утвержденной программе, должна была поддерживаться на уровне 50 МВт. Количество мелкой фракции 0–5 мм в хромовых брикетах составляло 30–40% после рассева отобранный партии. Низкая прочность приводила к дальнейшему их разрушению при прохождении трактов шихтоподачи, печных карманов и труботечек. Наблюдались обвалы шихты с резким подъемом давления под сводом печи, увеличилось количество выбросов шихты на свод из-под электродов, приходилось часто чистить наклонные газоходы. Первые несколько суток затруднений с выпуском продуктов плавки не было. В дальнейшем работа печи стала неустойчивой как по электрическому режиму, так и по работе «летки». Постоянные обвалы шихты приводили к неустойчивой посадке электродов и колебаниям токовой нагрузки. Поступление больших масс «холодной» шихты в печной расплав снижало его температуру и изменяло состав шлака. Наблюдались случаи неполного выхода шлака из печи. Очевидно, поступление большого количества мелкой шихты повлияло на электропроводность расплава в печи и обусловило потерю токовой нагрузки на электродах. Для поддержания токовой нагрузки подавали под электроды от 1 до 2,5 т кокса. При этом навеска кокса возросла с 210 до 235 кг на 1 «колошу». Часть кокса при неравномерном сходе шихты ошлаковывалась и практически не участвовала в процессе восстановления, т.е. образовался избыток восстановителя в печи. Поэтому навеску кокса начали снижать, но работа летки продолжала ухудшаться: шлак выпускали «холодным».

Таким образом, второй этап испытаний с хромовыми брикетами характеризовался неустойчивой работой печи по токовой нагрузке и по действию «летки».

На протяжении третьего этапа испытаний печь работала также неустойчиво. Вводили разовые порции кокса под электроды. Для повышения токовой нагрузки повысили навеску кокса с 215 до 225 кг на 1 колошу. Для выведения шлака загружали 30 колош шихты без флюса и снизили навеску отсевов кварцита с 60 до 55 кг на 1 колошу. При этом произошел прогар выпускного отверстия в результате снижения в феррохроме содержания углерода, так как сплав предыдущего выпуска содержал 7,35% углерода. Таким образом, весь третий этап работы печи был неудовлетворительным.

Четвертый этап испытаний характеризовался более стабильной работой печи по сравнению с предыдущими этапами. Было принято решение

всю партию брикетов, подаваемых в цех № 6, подвергнуть полному рассеву, т.е. отсечь фракцию 0–10 мм. На протяжении всего этапа испытаний выполнялась оценка температурного режима плавки. С этой целью в сменах на каждом выпуске посредством пирометра «Проминь» производили замеры температуры металла и шлака, выпускаемых из печи. В зависимости от технологического хода печи температурный показатель находился в пределах 1600–1680 °C для высокоуглеродистого

феррохрома и 1720–1780 °C для конечного шлака.

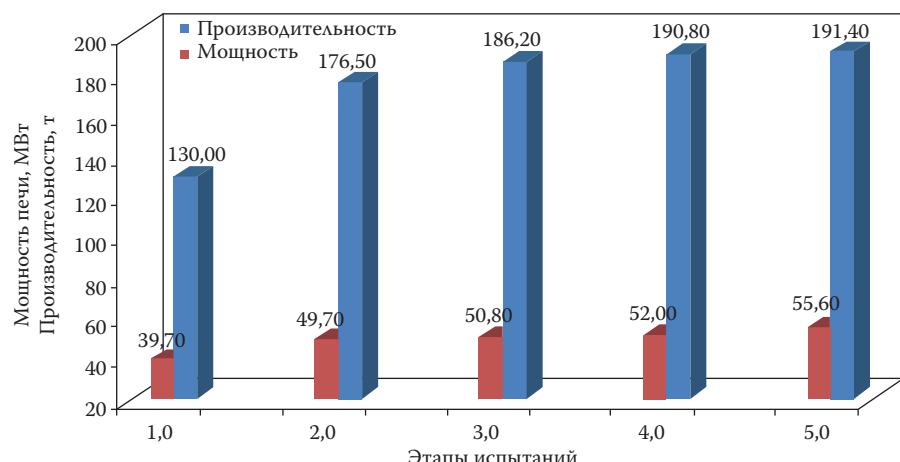
Проведенное сравнение с работой на базовой шихте (первого этапа) показывает, что после введения в состав шихты хроморудных брикетов температурный режим печи не претерпел существенных изменений применительно к температурам шлака и металла в печи.

На пятом этапе также, как и на четвертом этапе, всю партию подаваемых брикетов рассеивали в цехе подготовки шихты (ЦПШ). После рассева брикетов и исключения мелкой фракции (0–10 мм) постепенно была отработана технология применения хроморудных брикетов при выплавке высокоуглеродистого феррохрома на печи № 62 мощностью 63 МВ·А.

Из данных табл. 1 видно, что в период опытно-промышленных испытаний в пятый период достигнуты наилучшие технико-экономические показатели работы печи. На первом (базовом), втором и третьем этапах подаваемые брикеты не рассеивались, а подавались вместе с мелочью. Как отмечалось выше, брикеты имели слабую прочность. Из-за слабой прочности брикетов мелкая фракция во всех партиях составляла до 30–40%. Однако, несмотря на повышенное количество мелкой фракции, со второго этапа наблюдается повышение активной мощности печи и повышение суточной производительности печи. Из рисунка видно повышение активной мощности печи с 39,7 до 55,6 МВт и повышение суточной производительности печи в сравнении с базовым периодом (первый этап) со 130 до 191,4 т в пятом периоде. Удельный расход электроэнергии снижается по сравнению с базовым периодом с 7201 до 6184 кВт·ч/т. Извлечение хрома за период испы-

Таблица 1. Показатели работы печи № 62

Показатели	1 этап (базовые плавки)	2 этап	3 этап	4 этап	5 этап
Фактическая мощность, кВт	39797	49718	50884	52066	55623
Производительность печи, т/сут	130,03	176,50	186,24	190,83	191,4
<i>Расход основных материалов и электроэнергии, кг/т</i>					
Хромовая руда (50% Cr ₂ O ₃)	3642	2376	2317	2315	2247
Хромовые брикеты (50% Cr ₂ O ₃)	–	1127	1171	1179	1206
Итого, рудных материалов	3642	3582	3486	3445	3425
Кокс	785	827	806	802	780
Антрацит красногорский	148	–	–	–	–
Отсев кокса	100	127	90	80	70
Всего восстановителя (пересчет на кокс)	770	900	850	800	750
Электродная масса	37,9	49,6	39,9	36,8	33,1
Отсевы кварцита	165	200	180	170	165
Оборотные отходы	496	–	–	–	–
Металлолонгентрат	168	–	–	–	–
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	7201	6786	6656	6539	6184
Извлечение хрома, %	80,3	81,6	83,9	84,9	85,3



Используемая мощность и суточная производительность при испытаниях по освоению полной мощности печи РКЗ-63 (№ 62 цеха № 6) с применением в шихте хроморудных брикетов

Таблица 2. Химический состав металла базового периода и опытно-промышленных испытаний выплавки высокоуглеродистого феррохрома

Период испытаний, этапы	Количество брикетов, кг	Химический состав феррохрома, %					
		Cr	C	S	Si	P	Mn
1	—	68,84	7,99	0,036	0,92	0,023	0,15
2	1127	68,75	7,83	0,037	0,95	0,023	0,15
3	1171	68,97	8,28	0,038	0,50	0,022	0,16
4	1179	68,68	8,25	0,034	0,87	0,027	0,17
5	1206	68,74	8,40	0,032	0,79	0,027	0,16

Таблица 3. Химический состав шлаков высокоуглеродистого феррохрома за опытный период

Периоды плавки	Содержание компонентов, масс. %						$\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$
	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	FeO	Cr_2O_3	
1 этап	33,4	28,0	26,1	1,14	1,73	6,5	1,07
	31,0	36,4	24,1	1,02	1,26	4,5	1,51
2 этап	36,0	38,2	18,7	2,5	0,78	4,1	2,04
	35,9	38,5	17,1	2,9	1,6	6,8	2,25
3 этап	37,4	40,4	17,0	3,3	0,61	3,7	2,37
	36,0	41,0	18,0	1,26	0,20	4,8	2,27
4 этап	29,9	28,1	24,9	1,05	1,47	6,14	1,12
	29,3	30,3	22,1	1,13	1,25	5,17	1,35
5 этап	29,5	29,4	24,5	1,83	1,04	4,73	1,20
	29,2	28,3	25,6	1,46	1,02	4,57	1,10

таний с хроморудными брикетами по сравнению с базовым повышается с 80,3 до 85,3%.

В пятый период опытных плавок состояние печи оставалось удовлетворительным. Далее доля брикетов в шихте была увеличена до 1206 кг на 1 т феррохрома и оставалась такой до конца опытных плавок. Технологический ход печи № 62 в заключительный этап испытаний характеризовался спокойной работой колошника с равномерным газовыделением. Шихта сходила равномерно, с редкими обвалами и выбросами, электроды перемещались в нормальном технологическом режиме.

Организационно и технологически плавки высокоуглеродистого феррохрома с использованием хроморудных брикетов существенных отличий от базовой технологии не имели. Работали с установкой емкостно-продольной компенсации (УПК) и за смену производили 2–3 выпуска металла и шлака. Всего за время испытаний с использованием хроморудных брикетов были проведены 244 опытных плавки и получено около 7200 т высокоуглеродистого феррохрома.

Показатели работы печи № 62 представлены в табл. 1.

Из табл. 2 видно, что за время работы печи № 62 с использованием разных навесок хромо-

рудных брикетов химический состав выплавленного высокоуглеродистого феррохрома, за исключением содержания углерода, не отличался от сплава, полученного в базовый период плавки. С введением хроморудных брикетов в состав шихтовых материалов наблюдается незначительное увеличение количества углерода в выплавляемом феррохроме с 7,99 до 8,40%. Увеличение количества углерода в сплаве связано с науглероживанием металла, так как в опытный период со второго этапа количество кокса увеличили с 785 до 827 кг/т из-за наблюдавшегося недостатка кокса. Соответственно, низкая прочность опытной партии хроморудных брикетов привела к разрушению «рудного слоя», рафинирующего выплавляемый феррохром от углерода.

Недостаток восстановителя наблюдался со второго этапа при выпуске металла. Расплав выпускался тяжело, был холодным и вязким, содержал невосстановленную руду. На третьем этапе плавки для исправления хода печи начинали уменьшать навеску флюса и восстановителя. Из табл. 1 видно, что на последующих этапах количество восстановителя и флюса продолжали снижать.

Металлургические свойства хромовых руд во многом определяются составом рудообразующего хромшпинелида. В результате высокого количества магния в хроморудных брикетах (см. выше), фазовый состав хромшпинелида увеличивает долю трудновосстановимой магнезиохромитовой шпинели $\text{MgO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$, восстанавливаемого в области высоких температур [15, 17]. Это отрицательно повлияло на восстановительные процессы, протекающие в ферросплавной печи при опытных плавках высокоуглеродистого феррохрома второго и третьего этапов. Состав шлаков определяется главным образом составом хромовых руд. Из табл. 3 видно, что с увеличением доли хроморудных брикетов при опытных плавках происходит увеличение содержания оксида магния (с 28 до 41%) и уменьшение оксида алюминия (с 26 до 17%), в то время как содержание диоксида кремния осталось на необходимом уровне (с 29–33,4%). Это подтверждается динамикой изменения состава конечных шлаков электротермии высокоуглеродистого феррохрома, представленной в табл. 2, из которой видим, что

отношение MgO/Al_2O_3 увеличивается на 2-м этапе до 2,25 и на 3-м этапе – до 2,37.

Уменьшение отношения MgO/Al_2O_3 наблюдается в 4-м и 5-м этапах опытных плавок. Объяснить уменьшение отношения MgO/Al_2O_3 можно тем, что в 4–5 этапах опытных плавок, учитывая высказанное о фазовом составе, начинали снижать количество флюсов (отсевов кварцита). При проведении опытных плавок во 2-м и 3-м этапах плавок наблюдался избыток флюсов, поэтому количество флюсов снижали постепенно с 200 кг/т во 2-м этапе до 165 кг/т в 5-м периоде. Таким образом, в пятом периоде вернулись на базовое количество флюсов.

Использование хроморудных брикетов при производстве хромистых ферросплавов позволяет вовлечь в металлургический передел высокомагнезиальные хромитовые материалы с содержанием MgO 17–22% при концентрациях Al_2O_3 7–9%. Из работ [4, 18] известно, что определенному составу сплава по содержанию хрома и углерода соответствует определенный состав шлака. Увеличение концентрации магнезии в шлаках приводит к увеличению потерь хрома со шлаками. Значительное количество хрома может теряться в виде металлической фазы. Это связано с ухудшением физико-химических свойств образующихся высокомагнезиальных шлаков. Как утверждают авторы работы [19–21], с повышением MgO в шлаке происходит увеличение их вязкости и электропроводности. Однако опытные испытания показали целесообразность использования высокомагнезиальных хроморудных брикетов.

Для использования такого материала необходимо предварительно отсеивать брикеты, т. е. исключать мелкую фракцию 0–10 мм и обязательно использовать флюсы, во избежание нежелательных проблем в технологическом процессе. При использовании флюса – отсева кварцита на 2-м этапе опытных испытаний наблюдался избыток флюса, который характеризовался понижением температуры плавления шлака. Металл из печи выходит «холодный» ввиду недостаточности его нагрева, и из-за легкоплавкого шлака такой металл «козлится» в ковше, повышается содержание углерода в сплаве ввиду низкой температуры процесса, восстановление окислов хрома происходит до карбидов с повышенным содержанием углерода, (табл. 2). Избыток флюса также подтверждается данными табл. 3, из которой видно, что содержание кремнезема в шлаке высокое. На 2-м этапе кремнезем в шлаке возрастает до 35,9–36,0% и на 3-м этапе возрастает до 37,4%.

Анализируя данные табл. 3, можно предположить, что в процессе проведения опытных плавок (2-й, 3-й этапы плавки) наблюдается диффузионный характер торможения реакции восстановления хроморудных брикетов. Данное явление можно объяснить следующим образом: основным компонентом флюса (отсев кварцита) является кремнезем, а также глинозем. Кремнезем ускоряет восстановление оксидов железа и хрома. При фронтальном восстановлении оксидов железа и хрома углеродом вокруг зерен хромшпинелидов хромовых руд и брикетов образуется металлошлаковая оболочка. Толщина ее зависит от строения руд, температуры, времени и степени восстановления [22]. Эта оболочка представляет собой металлошлаковый барьер для развития восстановления по глубине зерен хромовых руд. Из данных табл. 3 наблюдается в химическом составе шлака высокоуглеродистого феррохрома уменьшение SiO_2 , MgO , Al_2O_3 в шлаках на 4-м и 5-м этапах. Объяснить это можно тем, что кремнезем и глинозем, содержащиеся в составе отсевов кварцитов, в процессе восстановления растворяются в тугоплавких и вязких шлакообразующих оксидах – продуктах, появляющихся при восстановлении хромшпинелидов. В результате на контактной поверхности происходит образование легкоплавких и жидкокомпактных шлаков. Такие шлаки легко разрушают шлаковый диффузионный барьер и оголяют поверхность ядра хромшпинелидов для нового контакта между оксидами железа и хрома с углеродом.

Таким образом, кремнезем, содержащийся в отсевах кварцита, снимая диффузионный барьер, образующийся при фронтальном восстановлении зерен руды, способствует более полному и интенсивному восстановлению оксидов хрома и железа.

Заключение. Опытно-промышленные испытания показали, что решение проблемы переработки высокомагнезиального хромитового сырья необходимо направить на поиски оптимального шлакового режима, с расширением вопросов рудоподготовки мелочи тех же высокомагнезиальных руд с выбором оптимальных флюсующих материалов. Причем применение различных флюсующих добавок будет оказывать положительное влияние на свойства конечных шлаков, улучшая их физико-химические свойства, тем самым, способствуя довосстановлению хрома из оксидных расплавов.

Несмотря на слабую прочность, применение хромовых брикетов после отсева опытной партии брикетов на 4-м и 5-м этапах позволило увеличить производительность печи со 186,2 до 191,4 т, сократить удельный расход электроэнергии с 7201 до 6184 кВт·ч/т по сравнению с базовым периодом, уменьшить количество применяемой хромовой руды, снизить количество восстановителя. Также в процессе отработки технологического режима плавки феррохрома была достигнута мощность печи 55 МВт лишь на 5-м этапе испытаний. Для снижения энергетических затрат процесс выплавки высокоуглеродистого феррохрома целесообразно вести на предварительно подготовленном сырье (с проведением полного отсева фракции 0–10 мм), используя для этой цели хроморудные брикеты с флюсующими добавками в виде отсевов кварцита при оптимальном количестве, способствующем более полному и интенсивному восстановлению оксидов хрома и железа.

Таким образом, опытно-промышленные плавки показали целесообразность применения хроморудных брикетов на крупных и мощных рудо-восстановительных печах мощностью 63 МВт.

Список источников

1. Гальперин А.П., Заякин О.В., Островский Я.И. Особенности производства высокоуглеродистого феррохрома из хроморудного сырья разных видов // Сталь. 2003. № 11. С. 47–49.
2. Жучков В.И., Гальперин А.П., Кашин В.Б. Окискование хромсодержащего сырья // Электрометаллургия. 2003. № 9. С. 35–42.
3. Сырьевой комплекс России. Хромовые руды. Информационно-аналитический центр «Минерал». [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.mineral.ru/Facts/Russia/161/549/3_06_cr.pdf. (Дата обращения 26.01.2023).
4. Абдулабеков Е.Э., Гриненко В.И., Избембетов Д.Д. Производство хромитовых окатышей для выплавки высокоуглеродистого феррохрома // Сталь. 2003. № 5. С. 39–41.
5. Заякин О.В., Леонтьев Л.И., Афанасьев В.И. Технологические аспекты использования бедных хромсодержащих руд // Сб. докл. науч.-практ. конф. «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург : ИМЕТ УрО РАН, 2013. С. 118–122.
6. Zhunusov A., Tolymbekova L., Abdulabekov Ye., Zholdubayeva Zh., Bykov P. Agglomeration of manganese ores and manganese containing wastes of Kazakhstan // Metallurgija. 2021. No. 60 (1–2). P. 101–103.
7. Pal J., Bandyopadhyay D., Singh D.P., Ghosh S. A comparative study for smelting of chromite ore, pellets, briquettes and sinter // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2008. 117:3, 129–136. DOI: 10.1179/174328508X283469.
8. Гриненко В.И., Петлюх П.С., Такенов Т.Д. и др. Освоение технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома с использованием брикетированной мелочи хромитовой руды // Сталь. 2001. № 12. С. 28–30.
9. Magdziarz A., Kuźnia M., Bembeneck M. etc. Briquetting of EAF dust for its utilisation in metallurgical processes // Chemical and Process Engin. 2015. Vol. 36, No. 2. P. 263–271.
10. Рывкин И.Ю., Еремин А.Я., Литвин Е.М., Бабанин В.И. Брикетирование мелкозернистых и тонкодисперсных материалов со связующим // Кокс и химия. 2000. № 10. С. 36–43.
11. Еремин А.Я., Бабанин В.И. Изменение физико-механических свойств смесей мелкозернистых материалов со связующими на стадиях подготовки и прессования в процессе брикетирования // Кокс и химия. 2003. № 4. С. 17–26.
12. Хорошавин Л. Металлургические брикеты нового поколения сокращают продолжительность плавки металлов // Уральский рынок металлов. 2006. № 7. С. 39–42.
13. Ожогин В.В., Томаш А.А., Ковалевский И.А. Брикетирование как полноправный метод окускования металлургического сырья // Металлургические процессы и оборудование. 2005. № 2. С. 54–58.
14. Сивцов А.В., Егиазарян Д.К., Шешуков О.Ю. и др. Метод контроля параметров и характеристик электрической дуги и его применение к оценке эффективности использования брикетированной металлизированной окалины для выплавки стали // Металлург. 2022. № 1. С. 16–22.
15. Шабанов Е.Ж., Избембетов Д.Д., Байсанов С.О. и др. Технология производства высокоуглеродистого феррохрома с использованием монолитных брикетов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. № 61 (9). С. 695–701.
16. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М. и др. Брикеты экструзии (брэксы) для производства ферросплавов. // Металлург. 2012. № 12. С. 52–57.
17. Гриненко В.И., Поляков О.И., Гасик М.И. Хром Казахстана. М. : Металлургия, 2001. 416 с.
18. Кац М.Ш., Трабина В.П., Аганичев П.П. Исследование восстановимости высокомагнезиальных хромовых руд Актюбинского месторождения // Сталь. 1974. № 10. С. 911–912.
19. Гриненко В.И., Петлюх П.С., Такенов Т.Д. и др. Освоение технологии электротермии высокоуглеродистого феррохрома с использованием окатышей из мелочи хромитовой руды на АО «Феррохром» // Промышленность Казахстана. 2000. № 4. С. 74–76.
20. Островцева И.С. Влияние состава и свойств шлаков углеродистого феррохрома на степень извлечения хрома // Хромистые ферросплавы. М. : Металлургия, 1986. С. 48–53.
21. Жило Н.Л., Острецова И.С., Мизин В.Г. и др. Физико-химические свойства шлаков углеродистого феррохрома // Сталь. 1983. № 3. С. 35–39.
22. Кадарметов Х.Н. Регулирование металло-шлакового барьера при восстановлении хромовой руды углеродом // Производство ферросплавов. 1978. № 6. С. 5–13.

