DOI 10.52209/1609-1825_2022_4_72 УДК 669.168

Экспериментальные лабораторные исследования по разработке оптимальных технологических параметров выплавки борсодержащего силикохрома

[1]**КИМ Александр Сергеевич,** *д.т.н., главный научный сотрудник, Boron_213@mail.ru,*
[1]**АКБЕРДИН Александр Абдуллович,** *д.т.н., профессор, зав. лабораторией, akberdin_38@mail.ru,*
[2]***СУЛТАНГАЗИЕВ Руслан Бауыржанович,** *PhD, и.о. доцента, sulrus83@mail.ru,*
[1]**ОРЛОВ Алексей Сергеевич,** *PhD, старший научный сотрудник, wolftailer@mail.ru,*
[2]**АДАМОВА Гульден Хасеновна,** *докторант, guldenaa@mail.ru,*
[1]*Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, Казахстан, Караганда, ул. Ермекова, 63,*
[2]*НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,*
**автор-корреспондент.*

Аннотация. *Вовлечение в производство высокомагнезиальных тугоплавких хромитовых руд повлекло за собой ряд проблем не только на стадии их подготовки к плавке, но и на сами процессы металлургической переработки. Особенно остро эта проблема коснулась технологии производства силикохрома, где сконцентрированы все проблемные вопросы, касающиеся технологии плавки как углеродистого феррохрома, так и ферросилиция. Шлаки силикохрома высоких марок (Si – 48-50%) характеризуются высокой вязкостью и температурой плавления. Необходимость поддержания высокого нагрева способствует повышенному улету кремнезема, магния, что приводит в итоге к забиванию подсводового пространства печи возгонами, спекающимися в трудноразрушаемые настыли, закарбиживанию подины печи. Анализ состояния данного вопроса показал, что до настоящего времени проблемы при выплавке силикохрома остаются и основными мерами борьбы является строгий контроль за ведением режима плавки и особенно количества восстановителя, применение более чистых материалов [1-2]. Поэтому поиск эффективных путей по совершенствованию технологии производства хромитовых сплавов остается актуальным. В данной статье представлены результаты исследования по совершенствованию технологии производства силикохрома с использованием борсодержащих флюсов.*

Ключевые слова: *хромитовые руды, производство силикохрома, свойства силикохрома, борсодержащие флюсы, процессы восстановления кремния, хрома, свойства шлаков, возгонка, закарбиживание подины, термодинамическое моделирование.*

Для разработки оптимальных технологических параметров выплавки борсодержащего силикохрома проведены лабораторные плавки на печи Таммана.

В качестве базовой шихты для выплавки силикохрома марки ФСХ-48 принята шихта Аксуского завода ферросплавов, в опытных шихтах количество колеманита задано из расчета получения в сплаве 0,3; 0,5; 0,7% бора. Химический состав исходных шихтовых материалов представлен в таблице 1, а составы базовой и опытных шихт в таблице 2.

Химический состав шихтовых материалов представлен в таблице 2.

Методика проведения экспериментов.

Опыты проведены в графитовых тиглях на печи сопротивления Таммана с угольным нагревателем.

Параметры опытов: температура опытов, °С: 1650; 1700; время выдержки, мин: 60. Рабочая атмосфера – слабовосстановительная неконтролируемая атмосфера печи.

Все шихтовые материалы дробили до класса 0-5 мм.

Результаты опытных плавок представлены в таблице 3.

В данной работе была поставлена задача изучить влияние добавок борсодержащих материалов и разработать оптимальные температурно-временные параметры процесса плавки

Таблица 1 – Химический состав шихтовых материалов

Материал	Содержание, %					
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	B_2O_3
Кварцит	0,3	97,0	0,7	0,6	–	–
Зола кокса (А = 12,5%, $C_{немет.}$ – 86,0%)	4,368	49,104	30,184	11,504	–	–
Колеманит	27,6	5,5	0,4	0,09	3,0	42,0
	Cr	C	Fe	Si	Mn	
Углеродистый феррохром	68,0	9,0	19,0	4,0	–	
Стружка	–	0,3	99,0	0,14	0,47	

Таблица 2 – Составы базовой и опытных шихт

Компоненты шихты	Количество, г			
	базовая шихта	опытная шихта (0,3% бора в металле)	опытная шихта (0,5% бора в металле)	опытная шихта (0,7% бора в металле)
Кварцит	56,3	56,3	56,3	56,3
Кокс	26,3	26,3	26,3	26,3
Стружка	4,6	4,6	4,6	4,6
Передельный феррохром	22,1	22,1	22,1	22,1
Колеманит	0	1,1	1,7	2,4

Таблица 3 – Результаты лабораторных опытов по выплавке силикохрома с присадкой борсодержащих флюсов

Показатели	Варианты плавок							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Состав шихты, г:								
кварцит	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3
кокс	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3
стружка	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
передельный феррохром	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
колеманит	–	1,1	1,7	2,4	–	1,1	1,7	2,4
Температура опыта, °С	1650	1650	1650	1650	1700	1700	1700	1700
Время плавки, мин	60	60	60	60	60	60	60	60
Выход металла, г	36,4	36,5	36,6	36,8	40,4	40,1	39,9	39,5
Выход шлака (кварцит), г	20,26	20,1	19,6	17,96	10,23	9,86	9,56	8,41
Степень превращения, доли единицы	0,629	0,632	0,641	0,671	0,813	0,819	0,833	0,846
Химический состав металлов, %:								
Fe	26,37	24,43	24,45	23,63	20,97	21,38	21,83	22,1
Si	30,44	31,59	32,89	33,79	41,01	39,88	38,3	38,1
Cr	42,69	41,95	41,14	40,56	36,1	36,72	37,48	37,95
C	0,92	0,85	0,84	1,06	0,9	0,95	1,0	0,9
B	–	0,29	0,44	0,61	–	0,31	0,48	0,69

борсодержащего силикохрома. Процесс выплавки металлов и сплавов, сопровождающийся образованием субоксидов, склонных к испарению, не поддаются точному описанию. Технология плавки силикохрома считается бесшлаковой. Состав и количество шлака непостоянны и подвержены влиянию большого числа технологических факторов, зачастую не поддающихся точному учету.

Поэтому нами для анализа технологии плавки борсодержащего силикохрома проанализированы максимально возможные параметры плавки: убыль массы опытной пробы, выход металла и шлака (непрореагировавшая часть шихты), химический состав металла и шлака. Проведен материальный баланс плавки.

Нами при расчете степени завершенности процесса восстановления за основу приняты данные, рассчитанные по количеству кремнезема, принявшего участие в реакции образования металла. При данных температурах нами принято, что металлическая часть шихты остается постоянной. А увеличение количества металла происходит за счет восстановления кремния, который растворяется в металле с образованием силицидов, количество прореагировавшей шихты нами рассчитано как разница оставшейся непрореагировавшей шихты к заданному. Химический анализ металла показал содержание углерода во всех опытных металлах менее 1,0%, что говорит о завершенности процесса формирования металла (образование силицидов), а основным лимитирующим процессом является процесс восстановления кремния из кварцита. В условиях лабораторной плавки в открытых тиглях нами не ставилась задача получить силикохром заданной марки. В проведенных опытах содержание кремния составило более 41% при расчетном содержании 46,7%. Содержание бора в металлах во всех опытах ближе к заданным, что говорит о том, что процесс восстановления бора в условиях плавки силикохрома является не лимитирующим. Степень перехода бора в сплав на уровне 70-85%.

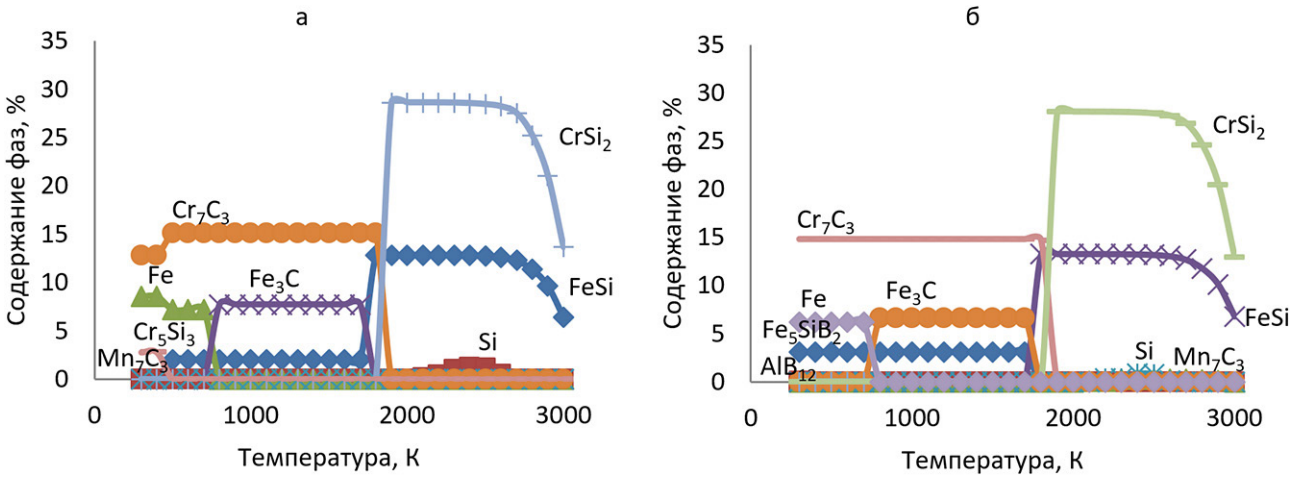
Результаты исследований

Результаты экспериментальных исследований показывают, что при температурах 1650°С и 1700°С борсодержащие флюсы повышают скорость восстановления кремния, что можно объяснить переводом процесса восстановления из твердофазного режима в жидкофазный при более низких температурах. При температуре 1700°С с увеличением скорсти восстановления кремния имеет место усиление улета субоксидов металла. Причем имеется явная тенденция превалирования скорости испарения субоксидов металла над скоростью восстановления. Так, по балансу металла, который представлен в таблице 4, установлено, что при увеличении температуры опыта с 1650°С до 1700°С улет металлической фазы возрос с 10,8% до 12,455%.

Результаты лабораторных плавок согласуются с результатами термодинамического моделирования процесса выплавки силикохрома, проведенного с ипользованием программного комплекса «Терра» [3-4]. На рисунке 1 показана динамика изменения состава металла от температуры. Добавка колеманита не повлияла на тепловой уровень процесса восстановления и формирования

Таблица 4 – Баланс металла

Показатели	Варианты опытов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Теоретический выход металла, г	40,605	40,677	41,005	41,765	45,365	45,689	46,225	45,55
Выход металла экспериментальный, г	36,4	36,5	36,6	36,8	40,4	40,1	39,9	39,5
Улет, г	4,205	4,177	4,405	4,965	4,965	5,589	6,325	6,05
Улет, %	10,35	10,27	10,74	11,88	10,98	11,88	13,68	13,28



а – базовой металл, б – борсодержащий металл (0,7% бора)

Рисунок 1 – Динамика изменения состава металла от температуры

металла. Процессы восстановления кремния в базовой и борсодержащей шихтах начинаются и завершаются при одинаковой температуре, а именно, восстановление начинается при 1477°С и завершается при 1627°С. При температуре 1477°С в металле образуется металлическая фаза FeSi, т.е. восстановленный кремний растворяется в металле с образованием силицида железа с вытеснением из металла углерода. Расчеты показали, что во всех шихтах восстановление кремния протекает в интервале температур 1477-1627°С, реакция образования силицида железа FeSi – в интервале температур 1527-1577°С, а силицида хрома ($CrSi_2$) – при 1677°С. Температура эта совпадает с температурой максимального количества металла и ее можно принять как оптимальную температуру процесса плавки силикохрома. При дальнейшем повышении температуры наблюдается убыль массы металла за счет усиления фактора испарения металлической фазы.

Анализ результатов моделирования по восстановлению бора из оксидов показывает термодинамичсекую возможность протекания реакций образования борсодержащей металлической фазы уже при комнатной температуре в результате взаимодействия имеющихся в шихте металличсекого железа и кремния с оксидом бора, которые в реальных условиях неосуществимы. Последующие переходы бора из железосиликатного соединения бора (Fe_5SiB_2) в FeB и оксиды на практике также не имеют места. Поэтому для установления возможности восстановления бора из оксида бора B_2O_3 в условиях плавки силикохрома рассмотрена реакция:

$$B_2O_3 + 3C = 2B + 3CO. \quad (1)$$

Вероятность протекания реакции (1) оценили по изменению энергии Гиббса, температурная зависимость которой описывается уравнением:

$$\Delta G_T^0 = 661890 - 346,3T. \quad (2)$$

Температура начала реакции (1), определенная по уравнению (2) $(\Delta G_T^0 = 0)$ равна 1911 К (1638°С), т.е. температурные условия плавки силикохрома для восстановления бора из оксида бора (B_2O_3) вполне приемлемы, что было подтверждено экспериментально. При температурах опыта 1650°С и 1700°С степень восстановления бора составила 70-85%.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что добавка в шихту силикохрома борсодержащих флюсов в количестве, обеспечивающем в металле 0,3-0,7% бора, повышает скорость восстановления кремния из кварцита. Это обстоятельство способствует увеличению степени завершенности процесса получения металла на 6,68% при 1650°С и на 4,060% при 1700°С. Более заметное влияние на скорость реакции восстановления кремния и формирование конечного состава металла оказывает температура. Так, при повышении температуры на 50°С степень превращения выросла в среднем на 28,7%.

По данным лабораторных экспериментальных исследований и термодинамического моделирования оптимальной температурой процесса выплавки борсодержащего силикохрома является температура 1677°С.

Таким образом, термодинамическое моделирование и экспериментальные исследования показали, что по условиям плавки нет необходимости повышения температуры в ванне печи более 1700°С. Повышенные температуры необходимо поддерживать для выпуска из печи конечного шлака, имеющего высокую температуру плавления и вязкость.

Возможность снижения теплового уровня процесса плавки силикохрома нами показана экспериментальными исследованиями по влиянию босодержащих добавок на вязкость и температуру кристаллизации конечных шлков. Расчетный химический состав опытных шлаков представлен в таблице 5. Опытные составы шлаков синтезировали из оксидов реактивной чистоты путем сплавления их в заданных соотношениях. Эксперименты по определению вязкости и температуры кристаллизации шлаков проводились на электровибрационном вискозиметре в печи Таммана с использованием молибденового оборудования.

Для определения температуры кристаллизации шлаков использовали метод полулогарифмической обработки политерм вязкости.

Результаты исследования вязкости представлены на рисунке 2.

В таблице 6 представлены температурные зависимости вязкости, результаты найденных по ним значений температур кристаллизации ($t_{кр}$) и энергии активации вязкого течения (E_n).

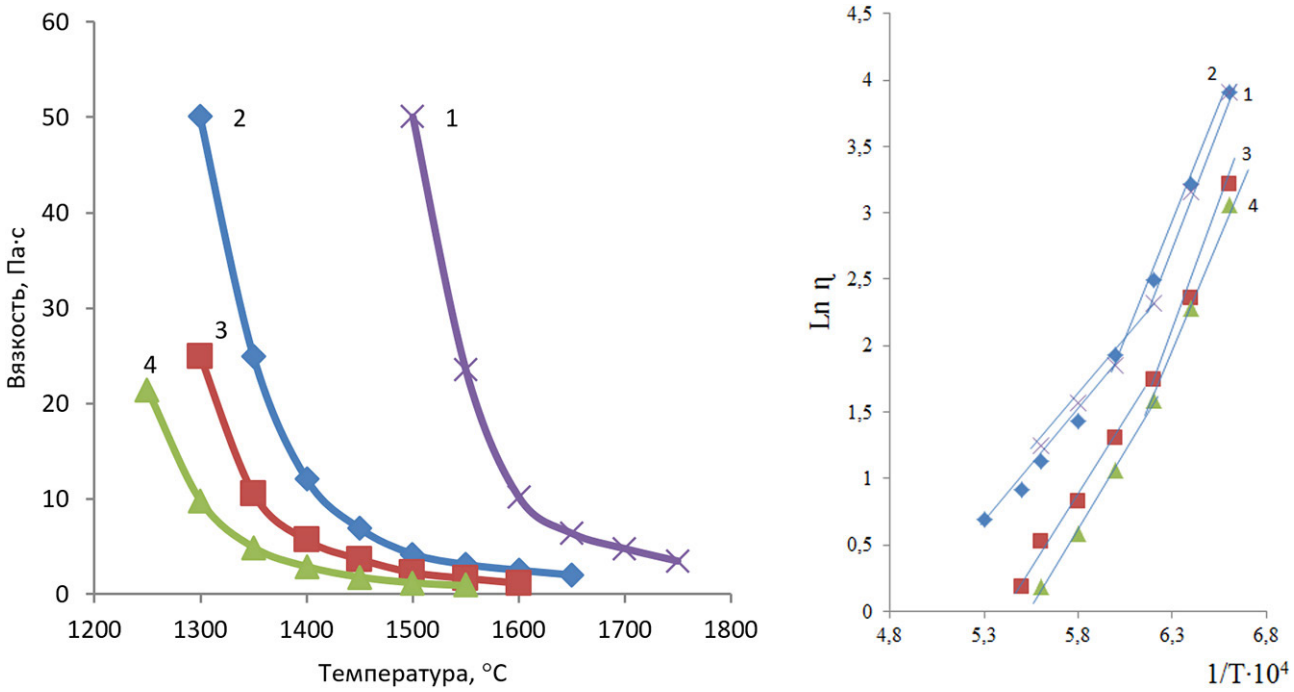
Для анализа результатов исследования опытные шлаки пересчитаны на трехкомпонентную систему CaO-Al_2O_3-SiO_2, сумма которых составляет 95%, химический и фазовый состав их представлен в таблице 7.

Базовый шлак располагается в фазовом треугольнике CaO-$CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$-$3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$. При добавке колеманита в опытных шлаках выросло содержание CaO с 12,77% до 31,16%, что привело к перемещению составов в волластанитовую область SiO_2-$CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$-$CaO{\cdot}SiO_2$. Это обстоятельство с присутствием в шлаках 0,38-0,76% B_2O_3 обеспечило снижение температуры плавления конечных шлаков с 1580°С до 1380°С, температурного интервала жидкотекучих шлаков (вязкость менее 3,0 Па·с) с 1650°С и выше до 1400-1500°С.

Изменение физических свойств шлаков (вязкость, температура плавления) согласуются с их фазовым составом. Для шлаков с повышенными значениями температуры плавления характерно повышение содержания высокотемпературных фаз. Температуру плавления базового шлака определяют высокотемпературные фазы муллита $3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$ (температура плавления 1850°С) и кремнезема (температура плавления 1723°С).

Таблица 5 – Расчетный химический состав опытных шлаков

Номера шлаков	Содержание, %				
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	B_2O_3
1 (Базовая шихта)	12,47	56,12	29,05	2,36	–
2 (Опытная шихта № 1)	21,07	49,63	25,74	3,18	0,38
3 (Опытная шихта № 2)	25,68	46,15	23,95	3,63	0,59
4 (Опытная шихта № 3)	29,68	43,13	22,44	3,99	0,76



Цифры 1; 2; 3; 4 у кривых соответствуют номерам шлаков в таблице 7

Рисунок 2 – Температурная зависимость вязкости конечных шлаков плавки силикохрома (а), зависимость логарифма вязкости от обратной абсолютной температуры (б)

Таблица 6 – Температура кристаллизации и энергия активации вязкого течения

Шлак	Уравнения	$t_{кр}$, °С	Е, кДж/моль
1 (Базовая шихта)	lnηa=75502/T-38,369 lnηb=24269/T-10,627	1580	627 201
2 (Опытная шихта № 1)	lnηa=42901/T-24,238 lnηb=22819/T-11,951	1450	356 189
3 (Опытная шихта № 2)	lnηa=39050/T-22,71 lnηb=21701/T-13,13	1420	324 180
4 (Опытная шихта № 3)	lnηa=35470/T-18,784 lnηb=19908/T-9,6883	1380	294 165

В таблице 8 представлены химический и фазовый составы опытных шлаков системы CaO-SiO_2-Al_2O_3-B_2O_3. Снижение температуры плавления опытных шлаков можно приурочить к появлению низкотемпературных фаз волластанита $CaO{\cdot}SiO_2$ (температура плавления 1464°С) и бората кальция $CaO{\cdot}B_2O_3$ (температура плавления 1160°С).

Выводы

Таким образом, проведенные лабораторные исследования физических свойств конечных шлаков показали, что ввод колеманита снимает проблемы отработки конечных шлаков, а лимитирующим процессом является восстановление кремния и формирование металлической фазы

Таблица 7 – Химический и фазовый составы опытных шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3$

Номера шлаков	Химический состав, %			Фазовый состав, %				
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	S	CAS_2	CS	A_3S_2	C_2AS
1	12,77	57,48	29,75	27,573	63,218	0	9,209	0
2	21,85	51,46	26,69	12,336	72,923	14,740	0	0
3	26,81	48,18	25,01	4,738	68,333	26,929	0	0
4	31,16	45,28	23,56	0	59,816	35,702	0	4,482

Таблица 8 – Химический и фазовый составы опытных шлаков системы $CaO-SiO_2-Al_2O_3-B_2O_3$

Номера шлаков	Химический состав, %				Фазовый состав, %				
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	S	CAS_2	CS	C_2AS	CB
2	21,76	51,27	26,59	0,38	12,627	72,650	14,040	0	0,683
3	26,65	47,9	24,86	0,59	5,222	67,923	25,794	0	1,061
4	30,92	44,94	23,38	0,76	0	60,885	34,802	2,947	1,367

с образованием силицидов железа и хрома. Процессы эти завершаются при температурах 1650-1700°С и нет необходимости держать повышенный нагрев (более 1700°С) в ванне печи, по крайней мере, есть резерв работы на пониженном тепловом уровне процесса. Этот фактор снимет все негативные явления процесса выплавки силикохрома: закарбиживание ванны печи, забивание газоходов, свода печи. Поддержание пониженного теплового уровня процесса, сокращение времени плавки за счет повышения скорости восстановления кремния обеспечит существенную экономию электроэнергии.

В целом показано, что технология плавки борсодержащего силикохрома реализуема с высокими технико-экономическими показателями. При этом необходимо соблюдение основных требований при плавке силикохрома: глубокая посадка электродов и наличие конусов шихты вокруг электродов.

Данное исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP09259038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Привалов О.Е., Платонов В.Ю., Головачев Н.П., Такенов Т.Д. Производственный опыт освоения технологии выплавки ферросиликохрома на мощных печах типа РКЗ-63И1 // Физико-хим. и технол. вопросы метал. производства Казахстана: сб. науч. тр. Химико-металлургического института им. Ж. Абишева. – Алматы, 2002. – С. 206-208.
2. Фадеев В.И., Островский Я.И., Веселовский И.А. и др. Использование шубаркольского угля при производстве ферросиликохрома // Научно-технический прогресс в металлургии: сб. науч. тр. РИК по учебной и методической литературе. – Алматы, 2009. – С. 265-268.
3. Удалов Ю.П. Применение программных комплексов вычислительной и геометрической термодинамики в проектировании технологических процессов неорганических веществ. Учебное пособие. – СПб: СПбГТИ (ТУ), 2012. – 147 с.
4. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах // Сб. материалов 3-й междунар. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. – Иваново, 2002. – Т. I. – С. 217-220.

Құрамында бор бар силикохромды балқытудың оңтайлы технологиялық параметрлерін әзірлеу бойынша эксперименттік зертханалық зерттеулер

[1]**КИМ Александр Сергеевич,** *т.ғ.д., бас ғылыми қызметкер, Boron_213@mail.ru,*
[1]**АКБЕРДИН Александр Абдуллович,** *т.ғ.д., профессор, зертхана меңгерушісі, akberdin_38@mail.ru,*
[2]***СУЛТАНГАЗИЕВ Руслан Бауыржанович,** *PhD, доцент м.а., sulrus83@mail.ru,*
[1]**ОРЛОВ Алексей Сергеевич,** *PhD, аға ғылыми қызметкер, wolftailer@mail.ru,*
[2]**АДАМОВА Гульден Хасеновна,** *докторант, guldenaa@mail.ru,*
[1]*Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты, Қазақстан, Қарағанды, Ермеков көшесі, 63,*
[2]*«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,*

**автор-корреспондент.*

Аңдатпа. *Жоғары магнезиялы баяу балқитын хромит кендерін өндіріске тарту оларды балқытуға дайындау сатысында ғана емес, сонымен қатар металлургиялық өңдеу процестерінің өзінде де бірқатар проблемаларға алып келді. Бұл проблема әсіресе силикохромды өндіру технологиясына қатысты болды, онда көміртекті феррохромды да, ферросилицийді де балқыту технологиясына қатысты барлық проблемалық мәселелер шоғырланған. Жоғары маркалы силикохромның шлактары (Si – 48-50%) жоғары тұтқырлықпен және балқу температурасымен сипатталады. Жоғары жылуды сақтау қажеттілігі кремнеземнің, магнийдің ұшуының жоғарылауына ықпал етеді, бұл нәтижесінде пештің су астындағы кеңістігін бұзылмайтын тұнбаға батырып, пештің табанын карбидтеуге әкеледі. Бұл мәселенің жай-күйін талдау бүгінгі күнге дейін силикохромды балқыту кезіндегі проблемалар болып қала беретінін және бақылаудың негізгі шаралары балқыту режимін, әсіресе тотықсыздандырғыштың мөлшерін, таза материалдарды қолдануды қатаң бақылау болып табылатындығын көрсетті [1-2]. Сондықтан хромит қорытпаларын өндіру технологиясын жетілдірудің тиімді жолдарын іздеу өзекті болып қала береді. Бұл мақалада құрамында бор бар ағындарды қолдана отырып, силикохромды өндіру технологиясын жетілдіру бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген.*

Кілт сөздер: *хромит кендері, силикохромды өндіру, силикохромның қасиеттері, құрамында бор бар флюстер, кремнийді, хромды қалпына келтіру процестері, шлактардың қасиеттері, сублимация, подинаны карбидтеу, термодинамикалық модельдеу.*

Experimental Laboratory Studies on the Development of Optimal Technological Parameters for the Smelting of Boron-containing Silicochrome

[1]**KIM Alexander,** *Dr. of Tech. Sci., Chief Researcher, Boron_213@mail.ru,*
[1]**AKBERDIN Alexander,** *Dr. of Tech. Sci., Professor, Head of Laboratory, akberdin_38@mail.ru,*
[2]***SULTANGAZIYEV Ruslan,** *PhD, Acting Associate Professor, sulrus83@mail.ru,*
[1]**ORLOV Alexey,** *PhD, Senior Researcher, wolftailer@mail.ru,*
[2]**ADAMOVA Gulden,** *doctoral student, guldenaa@mail.ru,*
[1]*Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Kazakhstan, Karaganda, Ermekov Street, 63,*
[2]*NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,*

**corresponding author.*

Abstract. *The involvement in the production of high-magnesia refractory chromite ores entailed a number of problems not only at the stage of their preparation for smelting, but also on the processes of metallurgical processing themselves. This problem was particularly acute for the production technology of silicochrome, where all the problematic issues related to the melting technology of both carbonaceous ferrochrome and ferrosilicon are concentrated. Silicochrome slags of high grades (Si – 48-50%) are characterized by high viscosity and melting point. The need to maintain high heating contributes to an increased flight of silica, magnesium, which eventually leads to clogging of the furnace's subsurface space with vozgons sintering into hard-to-destroy nastyls, and carbonization of the furnace bottom.Analysis of the state of this issue has shown that to date, problems in the smelting of silicochrome remain and the main control measures are strict control over the conduct of the melting regime and especially the amount of reducing agent, the use of cleaner materials [1-2]. Therefore, the search for effective ways to improve the production technology of chromite alloys remains relevant.This article presents the results of a study on improving the technology of production of silicochrome using boron-containing fluxes.*

Keywords: *chromite ores, silicochrome production, silicochrome properties, boron-containing fluxes, silicon, chromium reduction processes, slag properties, sublimation, carbonization of the well, thermodynamic modeling.*

REFERENCES

1. Privalov O.E., Platonov V.Ju., Golovachev N.P., Takenov T.D. Proizvodstvennyj opyt osvoenija tehnologii vyplavki ferrosilikohroma na moshhnyh pechah tipa RKZ-63I1 [Production experience of mastering the technology of ferrosilicochrome smelting on powerful furnaces of the RKZ-63I1 type]. Fiziko-him. i tehnol. voprosy metal. proizvodstva Kazahstana: sb. nauch. tr. Himiko-metallurgicheskogo instituta im. Zh.Abisheva [Physico-chemical and technological issues of metal. production of Kazakhstan: collection of scientific papers of the Chemical and Metallurgical Institute named after Zh.Abishev]. Almaty, 2002, pp. 206-208.
2. Fadeev V.I., Ostrovskij Ja.I., Veselovskij I.A. i dr. Ispol'zovanie shubarkol'skogo uglja pri proizvodstve ferrosilikohroma [The use of Shubarkol coal in the production of ferrosilicochrome]. Nauchno-tehnicheskij progress v metallurgii: sb. nauch. tr. RIK po uchebnoj i metodicheskoj literature [Scientific and technical progress in metallurgy: collection of scientific works of the RIK on educational and methodological literature]. Almaty, 2009. pp. 265-268.
3. Udalov Ju.P. Primenenie programmnyh kompleksov vychislitel'noj i geometricheskoj termodinamiki v proektirovanii tehnologicheskih processov neorganicheskih veshhestv. Uchebnoe posobie. [Application of software complexes of computational and geometric thermodynamics in the design of technological processes of inorganic substances]. Saint Petersburg: Publ. SPbGTI (TU), 2012, 147 p.
4. Trusov B.G. Programmnaja sistema TERRA dlja modelirovanija fazovyh i himicheskih ravnovesij v plazmohimicheskih sistemah [TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria in plasma chemical systems]. Sb. materialov 3-j mezhdunar. simpoziuma po teoreticheskoj i prikladnoj plazmohimii [Collection of materials of the 3rd International. symposium on theoretical and applied plasma chemistry]. Ivanovo, 2002, T. I, pp. 217-220.