

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО УГЛЯ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА

АБЫЛАЕВ Т.І.^{1*}, КЕЛАМАНОВ Б.С.¹, ҚУАТБАЙ Е.Қ.², ӘБДІРАШИТ А.М.¹

*Абылаев Толыбай¹ – магистрант ОП 7М07203-Металлургия, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, г. Актөбе, Казахстан

E-mail: tol1bay@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4035-3817>

Келаманов Бауыржан Сатыбалдыұлы¹ – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, г. Актөбе, Казахстан

E-mail: kelamanov-b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7646-9153>

Қуатбай Ербол Қуатбайұлы² – PhD, доцент кафедры «Металлургия и материаловедение», Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан

E-mail: kazakh_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8400-3537>

Абдирашит Асылбек Мирамханұлы¹ – PhD, преподаватель кафедры «Металлургия и горное дело», Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, г. Актөбе, Казахстан

E-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0718-3041>

Аннотация. В данной работе представлены результаты научных исследований, направленных на разработку технологии производства высокоуглеродистого феррохрома с использованием нового восстановителя – высокозольного каменного угля месторождения Сарыадыр. Для оценки карботермического восстановления хрома, железа и кремния был применён метод полного термодинамического моделирования (ПТМ) металлургических процессов, реализованный с помощью программного комплекса HSC Chemistry 10.0 в температурном диапазоне 600 - 2800 К. Термодинамический анализ показал, что применение высокозольного угля в процессе выплавки углеродистого феррохрома не вызывает значительных технологических отклонений. Процесс восстановления хрома и железа протекает стабильно, обеспечивая практически полное их восстановление в металлическую фазу. Дополнительно было проведено исследование состава золы угля, которое показало, что высокая концентрация оксидов кремния и алюминия позволяет частично или полностью заменить кварцит в шихтовой смеси, что способствует снижению себестоимости производства.

На основе полученных термодинамических данных были проведены экспериментальные исследования в лабораторной высокотемпературной печи Таммана, предназначенной для моделирования металлургических процессов. В ходе лабораторных испытаний получены опытные образцы углеродистого феррохрома, соответствующего марке ФХ800, что подтверждает возможность практического использования высокозольного угля Сарыадыр в промышленном производстве.

Ключевые слова: высокоуглеродистый феррохром, высокозольный уголь, карботермическое восстановление, термодинамическое моделирование, печь Таммана

Введение

В связи с дефицитом и высокой стоимостью доменного кокса, а также сложностями в обеспечении ферросплавных предприятий коксиком-орешком, возникает необходимость поиска альтернативных природных углеродистых восстановителей. Эти материалы должны соответствовать технологическим требованиям производства ферросплавов и одновременно снижать затраты за счет более доступного сырья. Данная проблема особенно актуальна при расширении ассортимента ферросплавов, включая хромистые.

Производство высокоуглеродистого феррохрома строго регламентируется и во многом зависит от стабильности хромоворудного сырья. Ключевыми аспектами технологии являются поддержание «рудного» слоя в ванне руднотермической печи и оптимизация состава конечного шлака с целью повышения эффективности плавки.

Традиционно в качестве восстановителя применяется коксовый орешек, обладающий

высокой пористостью, что обеспечивает необходимые термокинетические условия для реакций углерода с компонентами шихты. Однако его высокая стоимость и ограниченные запасы вынуждают искать альтернативные восстановители, которые позволят получать ферросплавы с минимальным содержанием примесей, таких как сера и фосфор.

Одним из перспективных направлений является использование низкозольных каменных углей, которые отличаются более широкой доступностью и меньшей стоимостью по сравнению с коксом. В связи с этим предпринимались многочисленные попытки их применения в производстве ферросплавов. Некоторые исследования показали возможность использования низкосернистых тощих каменных углей и полукоксов, однако их запасы также ограничены.

Учитывая эти обстоятельства, наиболее перспективным представляется использование высокзолных углей, обладающих разнообразными физико-химическими и механическими свойствами. Для оценки их пригодности в качестве восстановителя при выплавке углеродистого феррохрома необходимо провести комплексные экспериментальные и теоретические исследования. В частности, важно изучить возможность использования высокзолного угля месторождения «Сарыадыр».

Лабораторные исследования позволяют оценить потенциал химических взаимодействий в многокомпонентной системе, включающей руду, кварцит, кокс и уголь. Для понимания механизма совместного карботермического восстановления хрома, железа, кремния и алюминия в сплаве, а также закономерностей шлакообразования, необходимо детальное изучение реакций в системе Cr-Fe-Si-Al-Mg-C-O.

Методы исследования

Термодинамический анализ карботермического восстановления хрома проводился с использованием метода полного термодинамического моделирования (ПТМ) металлургических процессов, реализованного в программном комплексе HSC Chemistry 10. Этот метод основан на принципе максимума энтропии, который, согласно второму началу термодинамики, применим к любой равновесной системе вне зависимости от пути её достижения.

База данных HSC Chemistry 10 обновляется в соответствии с данными Scientific Group Thermodata Europe, обеспечивая высокую точность расчетов. Погрешность моделирования в данном программном комплексе не превышает 5 %, что является допустимым уровнем для металлургических исследований [1, 2].

Для моделирования процесса использовался модуль Equilibrium Composition, предназначенный для вычисления равновесного состава контактирующих фаз, участвующих в технологическом процессе. В металлургии любой процесс можно рассматривать как взаимодействие минимум двух фаз – целевого и побочного продуктов. В случае выплавки углеродистого феррохрома целевым продуктом является феррохром, а побочными – шлак, пыль и газовая фаза. Распределение металла между этими продуктами определяется равновесием обратимых химических реакций, таких как процессы окисления и восстановления [3, с.25].

Экспериментальные исследования выплавки углеродистого феррохрома с применением высокзолного угля проводились в высокотемпературной лабораторной печи Таммана (рисунок 1). Эта печь сопротивления представляет собой установку, предназначенную для моделирования металлургических процессов при высоких температурах. В качестве нагревательного элемента используется графитовая трубка, а регулирование температуры осуществляется плавно с помощью тиристорного регулятора напряжения, подключенного к первичной обмотке силового трансформатора. Это позволяет получать на выходе ток в несколько тысяч ампер при напряжении от 0,5 до 15 В.

Контроль температуры осуществлялся с использованием вольфрам-рениевой термопары ВР-5/20, горячий спай которой, заключенный в армированный корундовый чехол, подводился ко

дну тигля.

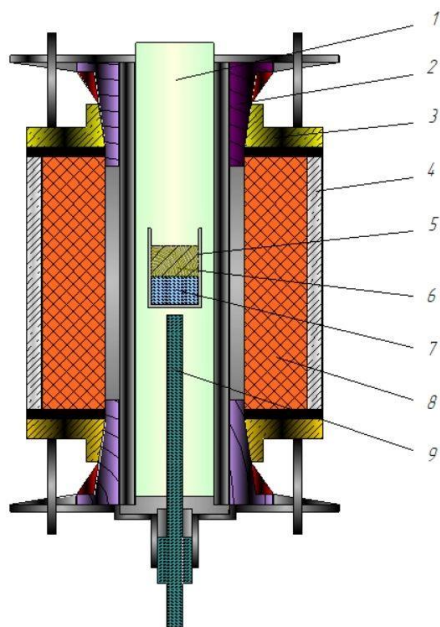


Рисунок 1. – Высокотемпературная печь Таммана

1 – графитовая трубка; 2 – водоохлаждаемые медные щеки; 3 и 4 – водоохлаждаемый корпус; 5 – тигель; 6 – шлак; 7 – металл; 8 – огнеупорный корпус; 9 – термопара

Исследовательская часть

Был проведён полный термодинамический анализ реальных составов шихты для выплавки углеродистого феррохрома (на 1 тонну сплава) с целью определения оптимального режима карботермического процесса (таблица 1).

Таблица 1 - Химический состав шихтовой смеси для выплавки углеродистого феррохрома

Материалы, кг			
Хромовая руда	Кокс	Кварцит	Уголь
2120	380	-	330

Исходя из состава четырех вариантов шихтовой смеси, для определения параметров термодинамического равновесия, были рассчитаны рабочие тела для выплавки углеродистого феррохрома с использованием высокосольного угля месторождения «Сарыадыр» таблица 2.

Таблица 2 - Состав рабочего тела для выплавки углеродистого феррохрома

Cr ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	C
1063,1	230,61	253,15	208,50	411,93	18,91	75,11	456,36

Моделирование проведено с использованием модуля программы «Равновесные составы» (Equilibrium Composition) в температурном диапазоне 600–2700 К с шагом 200 К [4, с.25]. Для расчёта карботермического восстановления хрома углеродом кокса и высокосольного угля были рассмотрены следующие фазы: газовые –CO₂(g), SiO(g), Al(g), Fe(g), CrO₃ (g), MgO(g), CrO(g);

шлаковые - MgCr_2O_3 , Cr , C , Cr_3C_2 , MgO , Fe , SiC , FeO , Cr_5Si_3 , MgSiO_3 , FeSi , Al_2O_3 , $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, Mg_2SiO_4 , Fe_3O_4 , SiO_2 , CrSi , Cr_4C , $*2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $(\text{CaMg})_{0.5}\text{SiO}_3$, CrSi_2 , Fe_3C , CaSiO_3 , $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, CaMgSiO_4 , MgFe_2O_4 , Fe_2MgO_4 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, $\text{CaFe}(\text{SiO}_3)_2$, FeSi_2 , $*2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $*2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, CaO , CaFeSiO_4 , $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$, Al_4SiC_4 , $*3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$, $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, $*3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, $*3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr_2MgO_4 , $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, MgCr_2O_4 , CaFe_5O_7 , $*2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Mg}_7\text{Al}_9\text{O}_4 \cdot \text{Al}_9\text{Si}_3\text{O}_{36}$, $*4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

В результате моделирования процесса выплавки углеродистого феррохрома с использованием высокосолевого угля «Сарыадыр» установлено, что до температуры 2800 К происходят образование и трансформация элементов с их переходом в газовую и конденсированную фазы. На рисунке 2 представлены данные об изменении содержания отдельных основных фаз в зависимости от температуры.

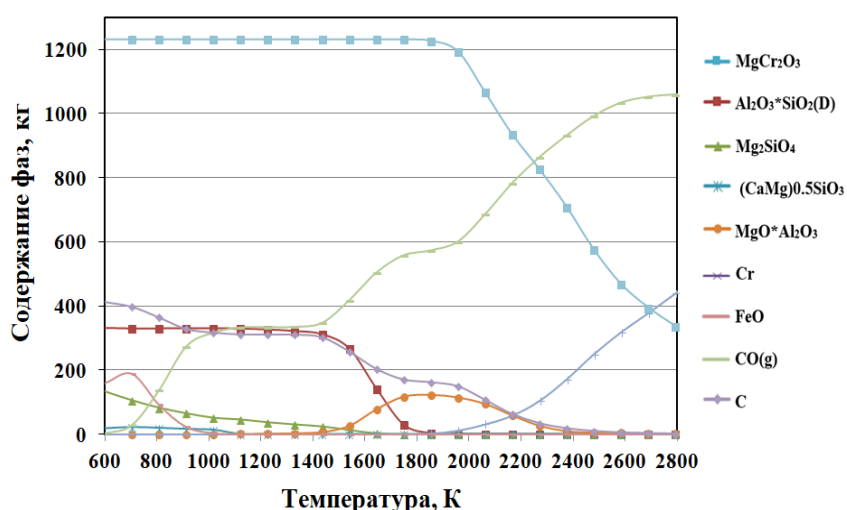


Рисунок 2. – Изменение состава основных фаз в шихтовой смеси в зависимости от температуры

Результаты термодинамического моделирования процесса выплавки углеродистого хромистого ферросплава представлены в виде зависимости содержания фаз от температуры. Все графики можно условно разделить на три температурные области: до 1600 К, от 1600 до 1800 К и выше 2200 К.

До 1500–1600 К существенных изменений в содержании фаз не наблюдается. В этот период одновременно сосуществуют следующие фазы: хромит магния (MgCr_2O_4), силикат алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), форстерит (Mg_2SiO_4), метасиликат магния-кальция ($(\text{CaMg})_{0.5}\text{SiO}_3$), шпинель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), хром (Cr), монооксид железа (FeO), монооксид углерода (CO) в газовой фазе и твердый углерод ($\text{C}_{\text{ТВ}}$).

С повышением температуры (начиная с 1400 К) содержание твердого углерода и оксидных соединений значительно снижается, достигая минимальных значений при 2000 К. Одновременно наблюдается закономерный рост содержания газообразного монооксида углерода (CO). В диапазоне 1700–1800 К происходит резкое снижение концентрации MgCr_2O_4 , сопровождающееся восстановлением хрома, а оксид магния (MgO) переходит в шлаковую фазу.

Термодинамическое моделирование, выполненное с использованием программы HSC Chemistry 10, позволило изучить динамику изменений основных конденсированных и

газообразных фаз, образующихся при выплавке углеродистого феррохрома в исследуемых шихтовых смесях [5, с. 157]. Расчеты показали, что использование высокозольного угля не приводит к значительным технологическим отклонениям, процесс протекает равномерно с полным восстановлением хрома и железа. Анализ содержания оксидов кремния и алюминия в золе угля подтвердил возможность его использования в качестве замены кварцита в шихтовой смеси [6-8].

Процесс восстановления протекает при высоких температурах и включает сложные химические реакции. Однако, несмотря на термодинамическое моделирование, для полной характеристики процесса необходимы дополнительные лабораторные эксперименты. На основании теоретических данных и изученных физико-химических свойств шихтовых материалов была проведена серия лабораторных испытаний в печи Таммана, направленных на уточнение температурного режима процесса и получение опытного образца сплава.

Результаты термодинамического моделирования подтвердили принципиальную возможность получения углеродистого феррохрома. Для установления оптимальных технологических и температурных параметров, приближенных к реальным условиям, проведена серия экспериментальных плавов с различными шихтовыми материалами.

В рамках лабораторных исследований выполнен отбор и подготовка проб хромовых руд, кокса, кварцита и высокозольного угля для определения их физико-химических характеристик. В качестве восстановителя использован кокс и его смесь с высокозольным углем Сарыадырского месторождения. Проведен химический анализ всех шихтовых компонентов, а также определены технические характеристики кокса и угля. Все шихтовые материалы усреднены и подвергнуты химическому анализу.

Качественные характеристики шихтовых материалов приведены в таблицах 3 и 4. Расчет состава шихты для выплавки высокоуглеродистого феррохрома был направлен на определение оптимального соотношения компонентов, обеспечивающего получение сплава заданного состава, соответствующего марке ФХ800. Для регулирования процесса использовался флюсующий материал – кварцит.

Таблица 3 – Химический состав исходных шихтовых материалов для выплавки углеродистого феррохрома

Материал	Компоненты, %								
	Cr ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	S	P
Хромовая руда	51,03	7,24	11,02	18,91	7,31	3,51	0,81	0,012	0,017
Зола кокса	-	47,81	-		21,05	-	3,26	0,005	0,079
Кварцит	-	95,68	-	0,81	0,91	0,71	0,91	-	-
Зола угля	-	61,59	-	0,02	33,0	2,1	0,03	0,004	0,18

Таблица 4 – Технический состав углеродистых восстановителей

Материал	A _c , %	W _p , %	V _л , %	C _{ТВ} , %
Сарыадырский уголь	41,9	16,95	2,24	38,91
Кокс РК	16,01	0,22	1,90	81,87

Расчёт проводился с учётом полного восстановления оксидной части шихтовой смеси, а также учитывал окислительную атмосферу среды. Избыток твёрдого углерода закладывался на 5–10 % выше стехиометрического расчёта. Рудную смесь измельчали до фракции 3–5 мм, что позволило сблизить удельную поверхность восстановителя и руды, а также оценить влияние химической активности восстановителя на процессы восстановления. Затем перемешанную шихтовую смесь загружали в графитовый тигель и помещали в печь Таммана.

Первичное газовыделение при температуре 200 °С соответствует удалению летучих веществ, что характерно для высокозольных углей. Окисление углерода начинается при температурах выше 1000 °С, при этом углерод реагирует с кислородом воздуха, образуя СО и покидая реакционную зону. Данный процесс оказывает негативное влияние на восстановление основных оксидов руды и золы. Результаты лабораторных экспериментов, проведённых в печи Таммана, приведены в таблице 6.

Помимо измерения температуры в рабочем пространстве печи фиксировался нагрев самой шихтовой смеси в тигле. Нагрев осуществлялся линейно со скоростью 10 °С в минуту. В ходе эксперимента непрерывно отслеживалась потеря массы шихтовой смеси. Температура выдержки устанавливалась на 50–60 °С выше теоретической, что объясняется косвенным способом нагрева. Из-за технических ограничений лабораторной установки максимальная температура ограничивалась 1700–1800 °С. До 400 °С зафиксирована потеря массы, что связано с удалением летучих веществ шлака и угля. В интервале 400–600 °С наблюдается небольшое увеличение массы, вероятно обусловленное окислением низших оксидов металлов. Метод непрерывного взвешивания при исследовании кинетики восстановления имеет определённые ограничения, в частности, затруднена количественная оценка химического состава образующихся продуктов. Потеря массы в ходе эксперимента обусловлена суммарным уходом газовой фазы в виде монооксида углерода (СО) и SiOг. Однако скорость образования этих газов и её динамика различны, что осложняет обработку полученных данных в рамках кинетических моделей.

В результате эксперимента получены опытные образцы углеродистого феррохрома, соответствующего марке ФХ800 (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты опытных лабораторных плавов феррохрома ФХ800

Показатели	Варианты		
	1	2	3
Средний химический состав металла, %			
Cr			69,7
Fe			18,41
Si			1,03
C			7,96
P			0,027
S			0,007
Средний химический состав шлака, %			
Cr ₂ O ₃			6,12
FeO			0,6
SiO ₂			36,01
CaO			1,78
Al ₂ O ₃			16,35
MgO			39,13
P ₂ O ₅			0,005
Получено шлака, гр			196,23
Кратность шлака			1,108

Выводы

Таким образом, проведён полный термодинамический анализ с использованием программного комплекса «HSC Chemistry» и лабораторные плавки углеродистого феррохрома в печи Таммана. В ходе исследований установлено следующее:

- Определены предельные условия замены металлургического кокса на высокозольный уголь. Оптимальное соотношение составляет 55/45, а плавка должна вестись с учётом избытка

восстановителя при соотношении оксида к твёрдому углероду 1,07–1,74. Это объясняется тем, что после восстановительных процессов практически отсутствует оксидная фаза хрома. Однако в реальных условиях небольшая часть углерода сгорает на колошнике, что компенсирует процесс и приводит к оптимальному режиму.

- Шихтовую смесь загружали в графитовый тигель, а основная реакционная среда была окислительной. Поэтому расчёт шихты должен учитывать избыток твёрдого углерода в пределах 1,07–1,74, так как часть углерода на поверхности тигля окисляется кислородом воздуха.

- Зафиксированы значительные потери массы, что требует постоянного поддержания шихты под колошником для минимизации потерь металла в виде газообразных оксидов. Интенсивное газовыделение приводит к потерям кремния и алюминия в виде субоксидов.

- Рабочая температура печи Таммана находилась в диапазоне 2000–2100 К. Однако эксперименты показали, что этой температуры недостаточно. Для полноценного восстановления хрома из сложных оксидов необходимо обеспечить высокую концентрацию тепла, поскольку основные восстановительные реакции протекают при температурах порядка 2000 К.

- До начала восстановительных процессов шлаковая фаза представлена преимущественно сложными оксидами: $MgCr_2O_4$, $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, Mg_2SiO_4 , $(CaMg)_{0.5}SiO_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$. В результате эксперимента получен опытный образец сплава марки ФХ800.

- Установлено, что при выплавке феррохрома с высокосольным углем в рудно-термических печах высокое удельное электросопротивление и наличие оксида кремния в золе угля оказывают положительное влияние на технологические параметры процесса.

Таким образом, для эффективного процесса выплавки углеродистого феррохрома с полным восстановлением хрома определены оптимальные технологические условия, применимые в рудно-термических печах. На основе полученных термодинамических и лабораторных данных проведены предварительные крупно-лабораторные опыты по выплавке углеродистого феррохрома в рудно-термической печи мощностью 100 кВА.

Список литературы

1. Scientific Group Thermodata Europe 2017 [Электронный ресурс] – URL: <https://www.factsage.com/>. свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения 04.06.2022)
2. Махамбетов Е.Н., Тимирбаева Н.Р., Байсанов А.С. и др. Термодинамический анализ восстановительных процессов выплавки ферросплавов из техногенных отходов угольной и металлургической промышленности // Труды конгресса «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. ТЕХНОГЕН-2019». – Екатеринбург, 2019. – С. 288-290.
3. Трусов В.Г. Астра. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах: руководство по эксплуатации. – М.: Наука, 1989. – 31 с.
4. Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неограниченных системах: программный комплекс АСТРА-3. – Свердловск: УрГУ, 1989. – 51 с.
5. Синяров Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1982. – 264 с.
6. Трусов Б.Г., Ватолин Н.А. Метод, универсальный алгоритм и программа термодинамического расчета многокомпонентных гетерогенных систем // Труды МВТУ. – 1978. – № 268. – С. 113-116.
7. Чернобровин В.П. Физико-химические основы технологии выплавки углеродистого феррохрома из Уральского региона: дис. ... док. техн. наук: 05.16.02. – Челябинск, 2005. – 477 с.
8. Самуратов Е.К., Абилов С.Б., Акуов А.М. и др. Полный термодинамический анализ фазовых равновесий при плавке ферромарганца // American Scientific journal. – 2017. – № 15. – С.

References

1. Scientific Group Thermodata Europe 2017 [Elektronnyj resurs] – URL: <https://www.factsage.com/.svobodnyj>. – Zagl. s ekrana. (data obrashcheniya 04.06.2022)
2. Mahambetov E.N., Timirbaeva N.R., Bajsanov A.S. i dr. Termodinamicheskij analiz vosstanovitel'nyh processov vyplavki ferrosplavov iz tekhnogennyh othodov ugol'noj i metallurgicheskoy promyshlennosti // Trudy kongressa «Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennyh obrazovaniy. TEKHNOGEN-2019». – Ekaterinburg, 2019. – S. 288-290.
3. Trusov V.G. Astra. Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh: rukovodstvo po ekspluatatsii. – M.: Nauka, 1989. – 31 s.
4. Moiseev G.K., Trusov B.G. Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh: programmnyy kompleks ASTRA-3. – Sverdlovsk: UrGU, 1989. – 51 s.
5. Sinyarov G.B., Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev G.K. Primenenie EVM dlya termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov. – M.: Nauka, 1982. – 264 s.
6. Trusov B.G., Vatolin N.A. Metod, universal'nyy algoritm i programma termodinamicheskogo rascheta mnogokomponentnykh geterogennykh sistem // Trudy MVTU. – 1978. – № 268. – S. 113-116.
7. Chernobrovin V.P. Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii vyplavki uglerodistogo ferrokhroma iz Uralskogo regiona: dis. ... dok. tekn. nauk: 05.16.02. – Chelyabinsk, 2005. – 477 s.
8. Samuratov E.K., Abikov S.B., Akuov A.M. i dr. Polnyy termodinamicheskij analiz fazovykh ravnovesiy pri plavke ferromargantsa // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – S. 13-17.

ЖОҒАРЫ КӨМІРТЕКТІ ФЕРРОХРОМДЫ БАЛҚЫТУ ҮШІН ЖОҒАРЫ КҮЛДІ КӨМІРДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

АБЫЛАЕВ Т.І.^{1*}, КЕЛАМАНОВ Б.С.¹, ҚУАТБАЙ Е.Қ.², ӘБДІРАШИТ А.М.¹

*Абылаев Толыбай¹ – 7М07203-Металлургия ББ магистранты, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

E-mail: tolibay@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4035-3817>

Келаманов Бауыржан Сатыбалдыұлы¹ – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

E-mail: kelamanov-b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7646-9153>

Қуатбай Ербол Қуатбайұлы² – PhD, «Металлургияжәнематериалтану» кафедрасының доценті, Қарағандыиндустриялықуниверситеті, Теміртау қ., Қазақстан

E-mail: kazakh_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8400-3537>

Абдирашит Асылбек Мирамханұлы¹ – PhD, «Металлургияжәне тау-кен ісі» кафедрасының оқытушысы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

E-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0718-3041>

Андатпа. Бұл жұмыста жаңа тотықсыздандырғыш – Сарыадыр кен орнының күлі жоғары тас көмірін пайдалана отырып, жоғары көміртекті феррохром өндіру технологиясын әзірлеуге бағытталған ғылыми зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Хром, темір және кремнийдің карботермиялық тотықсыздануын бағалау үшін 600 - 2800 К температуралық диапазонында HSC Chemistry 10.0 бағдарламалық кешенінің көмегімен жүзеге асырылған Metallургиялық процестерді толық термодинамикалық модельдеу (ПТМ) әдісі қолданылды. Термодинамикалық талдау көміртекті феррохромды балқыту процесінде жоғары күлді көмірді қолдану айтарлықтай технологиялық ауытқуларды тудырмайтынын көрсетті. Хром мен темірді қалпына келтіру процесі тұрақты түрде жүреді, бұл олардың металл фазасына толық қалпына келуін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, көмір күлінің құрамына зерттеу жүргізілді, ол кремний мен алюминий оксидтерінің жоғары концентрациясы кварцитті шихта қоспасында ішінара немесе толығымен ауыстыруға мүмкіндік беретінін көрсетті, бұл өндіріс құнын төмендетуге

ықпал етеді.

Алынған термодинамикалық мәліметтер негізінде Металлургиялық процестерді модельдеуге арналған Тамманның зертханалық Жоғары температуралы пешінде эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Зертханалық сынақтар барысында ФХ800 маркасына сәйкес келетін көміртекті феррохромның тәжірибелік үлгілері алынды, бұл өнеркәсіптік өндірісте жоғары күлді Сарыадыр көмірін практикалық пайдалану мүмкіндігін растайды.

Түйін сөздер: жоғары көміртекті феррохром, жоғары күлді көмір, карботермиялық тотықсыздану, термодинамикалық модельдеу, Тамман пеші

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIGH-ASH COAL FOR SMELTING HIGH-CARBON FERROCHROME

ABYLAYEV T.^{1*} , KELAMANOV B.S.¹ , KUATBAY E.K.² , ABDIRASHIT A.M.¹ 

***Abylaev Tolybai**¹ – master's student of the educational program 7M07203-Metallurgy, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

E-mail: tolibay@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4035-3817>

Kelamanov Bauyrzhan Satybaldyuly¹ – candidate of technical sciences, associate professor, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

E-mail: kelamanov-b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7646-9153>

Kuatbai Yerbol Kuatbaiuly² – PhD, associate professor of the department of «Metallurgy and Materials Science» Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

E-mail: kazakh_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8400-3537>

Abdirashit Asylbek Miramkhanuly¹ – PhD, lecturer of the department of «Metallurgy and Mining», Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

E-mail: abdirashit.assylbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0718-3041>

Abstract. This paper presents the results of scientific research aimed at developing a technology for the production of high-carbon ferrochrome using a new reducing agent - high-ash coal from the Saryadyr deposit. To evaluate the carbothermic reduction of chromium, iron, and silicon, the method of complete thermodynamic modeling (PTM) of metallurgical processes was used, implemented using the HSC Chemistry 10.0 software package in the temperature range of 600-2800 K. Thermodynamic analysis has shown that the use of high-ash coal in the smelting of carbonaceous ferrochrome does not cause significant technological deviations. The process of chromium and iron reduction proceeds stably, ensuring their almost complete restoration to the metallic phase. Additionally, a study was conducted on the composition of coal ash, which showed that a high concentration of silicon and aluminum oxides allows partially or completely replacing quartzite in the charge mixture, which helps reduce production costs.

Based on the thermodynamic data obtained, experimental studies were conducted in a laboratory high-temperature Tamman furnace designed to simulate metallurgical processes. During laboratory tests, prototypes of carbonaceous ferrochrome corresponding to the FH800 brand were obtained, which confirms the possibility of practical use of high-ash Saryadyr coal in industrial production.

Key words: High-carbon ferrochrome, high-ash coal, carbothermic reduction, thermodynamic modeling, and Tamman furnace.