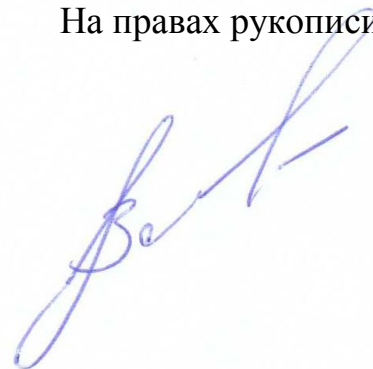


На правах рукописи



ЗАЯКИН Олег Вадимович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ
ФЕРРОСПЛАВОВ ИЗ БЕДНОГО ХРОМОРУДНОГО СЫРЬЯ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург - 2017

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Улучшение качества стали и, как следствие, снижение металлоемкости и улучшение потребительских свойств металлопродукции остается одной из главных и актуальных проблем черной металлургии. Среди многих способов воздействия на прочностные и пластические свойства стали, ее чистоту по вредным примесям, однородность и будущую структуру металла самым распространенным является обработка металлов ферросплавами.

Одним из наиболее применяемых и значимых элементов для легирования стали является хром, который используется как при выплавке конструкционных, так и коррозионностойких марок сталей. Его добавки улучшают механические характеристики стали, износостойкость, жаростойкость, коррозионные свойства и т.д. В общемировом производстве ферросплавов на долю сплавов хрома приходится ~ 27 %. Россия занимает пятое место в мире по объемам производства хромосодержащих ферросплавов.

Основой сырьевой базы всех российских металлургических предприятий, производящих феррохром, традиционно являлись казахстанские руды Кемпирсайского массива. В связи с этим данный тип хроморудных материалов и процессов их переработки широко изучен и освещен в отечественной и зарубежной научной литературе. В последние десятилетия поставки хроморудного сырья из Казахстана резко сократились. Российские ферросплавные заводы оказались в исключительно трудном положении с обеспечением собственного производства сырьем и вынуждены находить другие источники хроморудных материалов как отечественные, так и зарубежные (Турция, Индия, Албания), которые, как правило, характеризуются существенно более низким качеством.

Необходимо отметить, что запасы хромовых руд РФ достаточно велики и составляют по категории $A+B+C_1$ – 17,9 млн. т, C_2 – 33,3 млн. т, прогнозные ресурсы ~540 млн. т., однако, в основном, они относятся к категории бедных руд с содержанием Cr_2O_3 менее 40 %.

5. Промышленные исследования карботермического процесса выплавки высокоуглеродистого феррохрома из бедного хроморудного сырья. Разработка схемы тепловых полей и восстановительных процессов в рудовосстановительной электропечи;

6. Определение технико-экономических показателей получения хромовых ферросплавов при переходе на бедное отечественное сырье;

7. Разработка основных направлений использования бедных хромовых руд;

8. Опытные-промышленные испытания и внедрение предлагаемых технологических решений в промышленных условиях.

Для решения поставленных задач применен комплексный подход, состоящий из 2 направлений.

1. Исследования металлургических характеристик бедного хроморудного сырья в сравнении с богатыми рудами; физико-химических характеристик восстановительных процессов получения хромосодержащих ферросплавов в лабораторных и промышленных условиях и свойств образующихся оксидных расплавов при переработке бедных хромовых руд.

2. Разработка методов рационального использования бедных хроморудных материалов на основании проведенных исследований по п.1 с получением как стандартных видов ферросплавов, так и новых композиций хромосодержащих сплавов, получаемых из бедного сырья с определением их физико-химических свойств. Опробование и внедрение предлагаемых решений в промышленных условиях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием сертифицированного оборудования, современных аттестованных методов анализа и методик выполнения измерений металлургических и физико-химических характеристик процессов и материалов, согласованностью результатов опытов с известными литературными данными, а также положительной апробацией результатов работы на конференциях. Научные выводы подтверждаются воспроизводимостью результатов в лабораторных и

3. Разработана технология получения ферросплавов с пониженным содержанием хрома и повышенным кремния из бедных хроморудных материалов;

4. Разработан рациональный состав хромсодержащих, в том числе комплексных сплавов, обладающих улучшенными служебными характеристиками как с точки зрения их производства, так и с позиции применения для обработки стали и получения рафинированных марок ферросплавов;

5. Получены данные об экономической и экологической эффективности применения бедного отечественного хроморудного сырья.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы представлены и обсуждены на конференциях и конгрессах различного уровня – от региональных до международных, в том числе: XI–XV Международных научных конференциях «Современные проблемы электрометаллургии» (г. Челябинск, 2001, 2004, 2007, 2010, 2013 гг.; г. Магнитогорск, 2015 г.); двух Международных научно-практических конференциях «Современные проблемы металлургии» (г. Днепропетровск, Украина, 2001 и 2003 гг.); научно-технической конференции «Экологические проблемы промышленных регионов» (г. Екатеринбург, 2001 г.); Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2003 г.); научно-практической конференции «Химия и металлургия» (г. Екатеринбург, 2004 г.); XI и XIV Российских конференциях «Строение и свойства металлургических и шлаковых расплавов» (г. Екатеринбург, 2004, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Жидкость на границе раздела фаз – теория и практика» (г. Караганда, Казахстан, 2006 г.); II и III Международных ферросплавных конференциях (г. Екатеринбург, 2007 г.; г. Москва, 2008 г.); конференции «Теория и практика ферросплавного производства» (г. Серов, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Комплексная переработка минерального сырья» (г. Караганда,

опытно-промышленных и промышленных испытаний предлагаемых технологий. Изложенные в работе результаты получены автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Основной материал изложен на 260 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 32 таблицы, библиографический список включает 242 источника, из них 31 иностранный, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и необходимость проведения работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации работы, достоверности полученных результатов, личном вкладе автора, а также структуре и объеме диссертации.

В первой главе проанализированы запасы и основные характеристики хроморудных материалов для производства хромосодержащих ферросплавов.

Балансовые запасы хромовых руд Российской Федерации достаточно велики и составляют более 51 млн.т., прогнозные ресурсы ~540 млн. т. В настоящее время основная добыча осуществляется на двух крупных промышленных месторождениях: Сарановском в Пермском крае и Рай-Из в Ямало-Ненецком АО. Подавляющее большинство руд эксплуатируемых месторождений относятся к категории бедных. В течение последних десятилетий наблюдается общемировая тенденция снижения содержания ведущего элемента в добываемых хромовых рудах. Вовлечение в технологический процесс такого низкокачественного сырья приводит к резкому ухудшению технико-экономических показателей плавки, которые в значительной степени зависят от качества и металлургических характеристик исходных рудных материалов. Снижение содержания Cr_2O_3 в отечественной бедной руде при одновременном повышении FeO не позволяет получать из

ферросплавов являются температурные интервалы размягчения исследуемых руд, которые служат основным параметром, определяющим максимальную температуру в рудовосстановительной электропечи. В лабораторных условиях определены температуры размягчения хроморудных материалов (таблица 2). За температуру начала размягчения принимали температуру, при которой шток погружался в пробу на 1 %, а за температуру конца размягчения – значение, при котором шток погружается в пробу на 40 % начальной высоты слоя пробы при давлении 0,1 МПа в соответствии с требованиями ГОСТ 26517-85. Показано, что температура конца размягчения образцов руд Сарановского месторождения на 105 °С ниже, чем для широко используемых богатых казахстанских руд. Низкие значения температур конца размягчения рудных материалов снижают максимальную температуру в рабочем пространстве печи, вследствие чего может возникнуть понижение температуры оксидного и металлического расплавов вплоть до «замораживания» металла, образование увеличенного гарнисажа и снижение степени восстановления хрома.

Таблица 2. Характеристики размягчения образцов хромовых руд различных месторождений

№ п/п	Происхождение хроморудных материалов	Температура начала размягчения, °С	Температура конца размягчения, °С	Температурный интервал размягчения, °С
1	Казахстан, Кемпирсайский массив	1410	1820	410
2	Россия, Сарановское месторождение	1380	1715	335

В связи с этим некорректно рассматривать степень восстановления элементов в плавильном агрегате без учета температуры его реакционной зоны, для этого необходимо изучать степень восстановления хрома в комплексе с температурами размягчения, т.к. именно температуры размягчения определяют температуры протекания восстановительных процессов в рудовосстановительных электропечах.

протекания восстановительных процессов (температур, скоростей нагрева и т.д.) выполнены исследования на действующих электропечах при плавке с участием бедного отечественного сырья.

В литературе приводятся противоречивые сведения о результатах промышленных исследований структуры и процессов, протекающих в ваннах рудовосстановительных электропечей, выплавляющих высокоуглеродистый феррохром, что связано с несколькими причинами.

1. Ванна работающей печи не статична, от выпуска до выпуска в ее рабочей зоне меняется температура, состояние шихты, ее геометрия и объем, а замеры зон, замораживание печи производились в разные периоды плавки между выпусками.

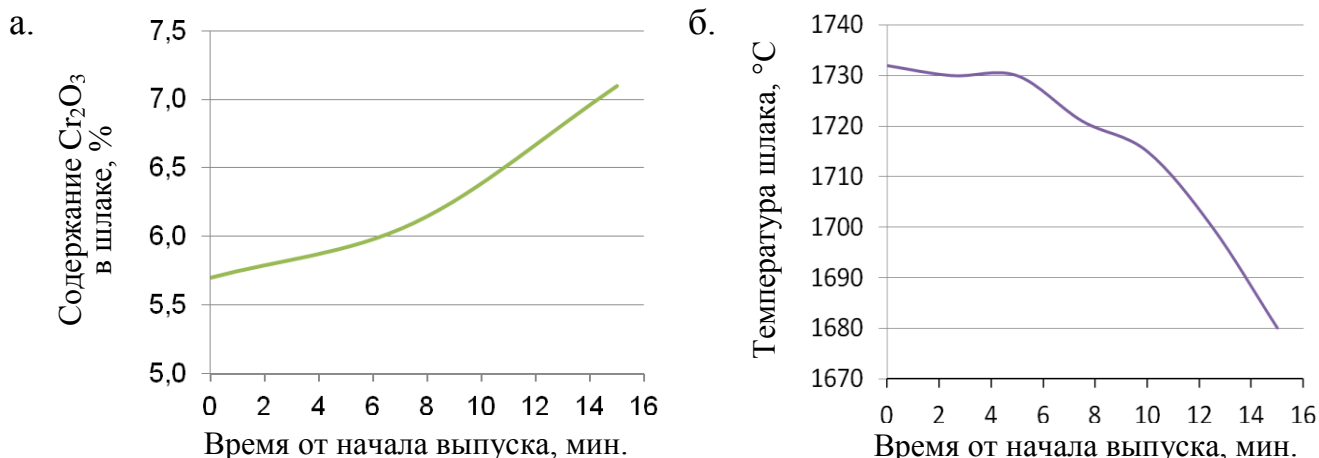
2. К неодинаковым результатам приводит также работа на различных шихтовых материалах как по химическому, так и по гранулометрическому составу, например, наличие «рудного слоя» сильно зависит от крупности и количества разнофракционных рудных составляющих.

В литературе нет данных о том, как изменяются в рабочем пространстве печи температурные поля и степень восстановления хрома в зависимости от периода плавки и используемого хроморудного сырья.

В диссертации предлагается новый подход к разработке схем температурных полей и степени восстановления Cr, основанный на исследовании рабочей зоны рудовосстановительной электропечи с использованием физико-химических характеристик применяемого рудного сырья, определяемых в лабораторных условиях.

В действующей рудовосстановительной электропечи проведены исследования в первом цехе ОАО «Серовский завод ферросплавов» («СЗФ») при выплавке высокоуглеродистого феррохрома из бедных отечественных руд Сарановского месторождения и богатых руд Кемпирсайского массива в соотношении 50:50. Процессы, протекающие в ванне работающей печи, исследовали с помощью вертикально погружаемых с шихтой специальных измерительных зондов, фиксирующих движение и нагрев шихтовых

хроморудного сырья. Температура выпускаемого из печи шлака за 15 минут снижается на 50 °С.



а - изменение содержания Cr₂O₃ в шлаке;

б - изменение температуры шлака.

Рисунок 7 – Изменение содержания Cr₂O₃ и температуры шлака высокоуглеродистого феррохрома в процессе выпуска металла и шлака из печи

Анализируя полученные данные можно полагать, что чем продолжительнее выпуск расплава из печи, тем больше выход недовосстановленной руды и меньше общий показатель восстановления хрома за плавку.

На основании полученных данных промышленных и лабораторных исследований впервые разработана схема восстановительных процессов действующей рудовосстановительной электропечи в зависимости от периода плавки, которая позволяет моделировать не только температуры, но и степень восстановления хрома по вертикальному сечению рабочей зоны ванны электропечи в зависимости от металлургических характеристик хроморудного сырья (рисунок 8). Так, при переходе от руд Кемпирсайского массива на бедные руды Сарановского месторождения максимальная температура в рабочем пространстве печи снижается из-за понижения температур конца размягчения рудных материалов (таблица 2), что подтверждается замерами температур шлаков на выпуске. Температура первых порций шлака при работе на рудах Кемпирсайского массива в среднем составляет ~1760 °С, а при работе

На основании проведенных исследований металлургических характеристик бедных хроморудных материалов, физико-химических свойств получаемых из них сплавов и промышленных научно-исследовательских работ сформулированы 4 основных направления, которые позволят ввести в эксплуатацию ряд известных, но не используемых (либо слабо используемых) ранее месторождений бедных хромовых руд:

1. Селективное восстановление компонентов руды с разделением на металлический полупродукт с пониженным содержанием хрома (~20 %), пригодный для выплавки коррозионностойких марок сталей, и оксидный продукт с повышенным содержанием Cr_2O_3 , пригодный для выплавки высокосортных марок феррохрома.
2. Рациональная подшихтовка бедных отечественных хромовых руд к богатым импортным с производством стандартных марок феррохрома.
3. Получение новых сплавов, в том числе товарного высокоуглеродистого феррохрома с пониженным содержанием хрома, углерода, повышенным содержанием кремния и комплексных ферросплавов.
4. Получение передельных сортов ферро- и силикохрома и их использование при выплавке рафинированных сортов феррохрома.

Все представленные направления нами исследованы и в различной степени доведены до промышленного опробования и внедрения.

Селективное восстановление. В лабораторных условиях изучали селективное, предварительное восстановление элементов хромовых руд Сарановского месторождения и Кемпирсайского массива. Известно, что предварительное восстановление и подогрев хроморудных материалов позволяют экономить 15-20 % электроэнергии и увеличивать производительность рудовосстановительных печей. Проведенные термогравиметрические эксперименты показали, что рациональные характеристики для твердофазного селективного восстановления железа и частично хрома из хроморудных материалов с выделением металлической

технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома с использованием бедного хроморудного сырья поэтапно с постепенным переходом от 100 % богатой импортной руды Кемпирсайского массива до 100 % бедного отечественного сырья в условиях ОАО «Серовский завод ферросплавов». Основные технико-экономические показатели работы рудовосстановительной электропечи мощностью 22 МВА приведены в таблице 4 и на рисунках 11-12.

Таблица 4. Техничко-экономические показатели производства высокоуглеродистого феррохрома при поэтапном переходе на бедные хроморудные материалы

Показатели	Соотношение хроморудных материалов Кемпирсайского массива / Сарановского месторождения				
	1 этап 100/0	2 этап 75/25	3 этап 50/50	4 этап 25/75	5 этап 0/100
Состав рудной части колоши, кг:					
Руда Сарановского месторождения	-	200	395	602,1	800
Руда Кемпирсайского массива	800	600	405	197,9	-
Содержание Cr ₂ O ₃ в смеси, %	52,1	48,8	45,6	42,1	38,1
Отношение Cr ₂ O ₃ /FeO в хроморудной смеси	4,3	3,7	3,2	2,64	1,95
Содержание в сплаве, %:					
Cr	68,8	65,9	62,8	57,2	56,8
Si	0,4	0,4	0,5	0,9	3,1
P	0,026	0,031	0,034	0,036	0,033
Кратность шлака	1,20	1,26	1,33	1,38	1,42
Удельный расход:					
Руда Сарановского месторождения, б.кг/т Cr	-	817	1756	2836	3920
Руда Кемпирсайского массива, б.кг/т Cr	3731	2969	2050	1020	-

При увеличении доли Сарановской руды в шихте содержание хрома в металле снижалось с 69 до 57 %. Содержание хрома в сплаве не менее 60 %, отвечающее требованиям большинства отечественных заказчиков, обеспечивается при соотношении богатая/бедная руда равном 35/65. Необходимо отметить, что негативной характеристикой руд Сарановского месторождения, помимо низкого содержания хрома, является относительно высокое содержание фосфора (~0,0028 % P), которое почти в два раза выше, чем в рудах Кемпирсайского массива. Увеличение фосфора в сплаве в значительной степени подавляли применением в составе восстановителей

сравнению с богатыми рудами Кемпирсайского массива (1820 °С) (таблица 2). Снижение температур кристаллизации шлака может негативно отражаться на технологических характеристиках процесса получения сплава с высокими температурами начала кристаллизации (≥ 1600 °С), которыми обладают традиционные марки феррохрома, как было ранее определено в главе 4 (таблица 3). Для повышения технологических характеристик процесса плавки бедных хромовых руд необходимо выплавлять ферросплавы с пониженным содержанием хрома и повышенным содержанием кремния (5-10 %), которые обладают относительно низкими (благоприятными для данного процесса) температурами начала кристаллизации (1530-1560 °С).

Изучена возможность получения комплексных ферросплавов, содержащих, %: 35-40 % Cr; 15-25 % Mn; 8-15 % Si; Fe – остальное (рациональный состав сплавов определен в главе 3). Выполнены лабораторные исследования и расчеты совместного карботермического восстановления компонентов бедных отечественных марганцевых руд Парнокского месторождения (34 % $Mn_{Общ.}$; 3,5 % $Fe_{Общ.}$; 5,5 % SiO_2 ; 17,1 % CaO; 0,5 % MgO; 1,0 Al_2O_3 ; 0,041 % P) и бедного хроморудного сырья Сарановского месторождения (таблица 1). Состав шихты для выплавки 1 т комплексного ферросплава в рудовосстановительной электропечи мощностью 22 МВА: руда хромовая Сарановская – 1773 кг; концентрат марганцевый Парнокский – 679 кг; кварцит Антоновский (97 % SiO_2) – 229 кг; коксик НТМК (86 % C) – 511 кг. Расчетный удельный расход электроэнергии - 4520 кВт·ч/т сплава. Степень извлечения Cr в металл повышается на 3 % по сравнению с получением стандартных марок хромовых сплавов. Состав комплексного ферросплава: 40 % Cr; 20 % Mn; 10 % Si; остальное – железо и примеси. Возможность выплавки данного комплексного сплава существует в условиях ОАО «Серовский завод ферросплавов».

Получение передельного феррохрома и ферросиликохрома. В настоящее время на отечественных ферросплавных предприятиях применяются двух- и трехстадийные схемы производства низкоуглеродистого феррохрома с

решение проблемы импортозамещения хромового сырья, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие нашей страны.

Основные научные и практические результаты работы

1. Проведенный анализ сырьевой базы отечественного и зарубежного хроморудного сырья и его основных характеристик показал, что вовлечение в производство бедных хроморудных материалов как в нашей стране, так и во всем мире, становится неизбежным фактом. Для решения проблемы использования бедного сырья сформирован комплексный подход, включающий: оценку металлургических характеристик исходных шихтовых материалов; изучение физико-химических характеристик процесса и свойств продуктов плавки; промышленные исследования и внедрение предлагаемых технологий.

2. Получены новые экспериментальные данные по физико-химическим характеристикам бедного хроморудного сырья и карботермического процесса получения ферросплавов в зависимости от термовременных условий и составов рудных материалов. Выявлено, что по степени восстановления хрома бедные хроморудные материалы Сарановского месторождения не уступают богатым рудам Кемпирсайского массива. При нагреве до 1600 °С степень восстановления Cr одинакова для всех исследованных образцов, и составляет 95 %. Однако, температура конца размягчения образцов руд Сарановского месторождения на 105 °С ниже, чем для богатых руд, что способствует снижению температуры в реакционной зоне печи. Показано, что для промышленной оценки хроморудного сырья необходимо рассматривать восстановимость компонентов только в комплексе с температурами размягчения, поскольку они определяют температуры протекания восстановительных процессов в рудовосстановительных электропечах.

3. Впервые определена зависимость физико-химических свойств (плотность, температурные интервалы плавления, окисляемость, время плавления) сплавов системы Cr-Fe-Si-C от содержания хрома и кремния. Показано, что повышение содержания кремния до 10 % и снижение содержания

6. Разработаны 4 основных перспективных направления использования бедного хроморудного сырья с получением, как стандартных марок, так и новых видов ферросплавов.

6.1. Селективное восстановление компонентов руды с разделением на металлический полупродукт с пониженным содержанием хрома и оксидный продукт с повышенным содержанием Cr_2O_3 (45 %), пригодный для выплавки высокосортных марок феррохрома. Определены условия для проведения селективного карботермического восстановления железа и частично хрома (~15 %) при температуре 1300-1350 °С из бедного хроморудного сырья с выделением металлической фазы, содержащей ~20 % Cr.

6.2. Подшихтовка бедных отечественных хромовых руд к богатым импортным и производство стандартных марок феррохрома. Впервые в промышленном масштабе изучены особенности технологии получения высокоуглеродистого феррохрома с поэтапным переходом от 100 % богатой импортной руды до 100 % бедного отечественного сырья. Получены зависимости технико-экономических показателей производства высокоуглеродистого феррохрома от содержания бедных хроморудных материалов в составе шихты. Технология внедрена в производство.

6.3. Получение новых сплавов, в том числе товарного высокоуглеродистого феррохрома с пониженным содержанием хрома, углерода, повышенным содержанием кремния, и комплексных ферросплавов. В лабораторных условиях показана принципиальная возможность получения комплексных сплавов системы Fe-Cr-Mn-Si из бедных хромовых и бедных марганцевых руд отечественных месторождений. В промышленном масштабе показана принципиальная возможность и целесообразность переработки бедных хромовых руд с получением феррохрома с повышенным содержанием кремния (4-6 % Si) и пониженным содержанием хрома (50-55 % Cr). Технология внедрена в производство. Полученный феррохром был успешно использован при производстве стали.

35. Заякин, О.В. Получение и свойства высокоуглеродистого феррохрома с пониженным содержанием хрома / О.В. Заякин, В.И. Жучков, С.В. Лазарева, В.И. Афанасьев // Сб. науч. тр. «Теория и практика ферросплавного производства». - Нижний Тагил: «Медиа-Принт», 2008. - С. 116-119.
36. Островский, Я.И. Производство высокоуглеродистого феррохрома с использованием окускованного хромсодержащего сырья / Я.И. Островский, О.В. Заякин, В.И. Жучков // Сб. науч. тр. «Теория и практика ферросплавного производства». - Нижний Тагил: «Медиа-Принт», 2008. - С. 119-122.
37. Заякин, О.В. Изучение восстановимости хромитовых руд / О.В. Заякин, В.И. Жучков // Матер. межд. науч.-практ. конф. «Комплексная переработка минерального сырья». - Караганды: ПК «Экожан», 2008. - С. 185-188.
38. Фадеев, В.И. Переработка хромистых шлаков в условиях ОАО «СЗФ» / В.И. Фадеев, Я.И. Островский, И.А. Веселовский, В.И. Афанасьев, О.В. Заякин, В.И. Жучков // Тр. всероссийской конф. с элементами школы для молодых ученых. - Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2009. - С. 224-228.
39. Заякин, О.В. Исследование влияния температуры на кинетику восстановления компонентов хроморудного сырья / О.В. Заякин, В.И. Жучков // Сб. науч. тр. «Научно-технический прогресс в металлургии». - Алматы: РИК по учебной и методической литературе, 2009. - С. 174-177.
40. Заякин, О.В. Металлургические характеристики хроморудного сырья месторождения Рай-Из / О.В. Заякин, В.И. Жучков // Сб. науч. тр. «Научно-технический прогресс в металлургии». - Алматы: РИК по учебной и методической литературе, 2009. - С. 273-276.
41. Фадеев, В.И. Использование шубаркольского угля при производстве ферросиликохрома / В.И. Фадеев, Я.И. Островский, И.А. Веселовский, В.И. Афанасьев, С.Н. Божин, О.В. Заякин, В.И. Жучков // Сб. науч. тр. «Научно-технический прогресс в металлургии». - Алматы: РИК по учебной и методической литературе, 2009. - С. 265-268.

Материалы межд. науч.-практ. конф. «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья». Т. 2. - Екатеринбург: Изд. УМЦ УПИ, 2014. - С. 210-215.

56. Zayakin, O.V. Study of carbothermic reduction processes in manufacture of high-carbon ferrochrome / O.V. Zayakin, V.I. Zhuchkov, V.I. Afanasiev // Proceedings of the Fourteenth International Ferrous Alloys Congress INFACON XIV. Vol. I. - Kiev: Printed, 2015. - P. 39-43.

57. Заякин, О.В. Особенности технологии получения хромосодержащих ферросплавов из различного хромородного сырья / О.В. Заякин // Материалы Межд. научно-практ. конф. «Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья». - Алматы: типография ИП Серикбаева, 2015. - С. 252-257.

58. Zayakin, O.V. Study of chromium-ore elements reducibility / O.V. Zayakin, V.I. Zhuchkov // FLOGEN. Vol. 2. - Antalya: FLOGEN, 2015. - P. 295–298.

59. Жучков, В.И. Комплексные исследования высокотемпературных физико-химических процессов и совершенствование технологии получения хромосодержащих ферросплавов / В.И. Жучков, О.В. Заякин, Н.А. Андреев, В.И. Афанасьев // Сб. тр. «Физическая химия и технология в металлургии». - Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 2015. - С. 271-280.

60. Заякин, О.В. Комплексное изучение процессов выплавки хромосодержащих ферросплавов из бедного хромородного сырья / О.В. Заякин, В.И. Жучков // Материалы XVI межд. конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали». Ч. 2. - Екатеринбург: УрО РАН, 2015. - С. 146-151.

61. Заякин, О.В. Изучение вязкости и температур кристаллизации шлаков феррохрома / О.В. Заякин, А.А. Акбердин, А.С. Ким, В.И. Жучков // Тр. XIV российской конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». - Екатеринбург: УрО РАН, 2015. - С. 214-215.

62. Заякин, О.В. Комплексные ферросплавы для хромоникелевых сталей / О.В. Заякин, В.И. Жучков, А.А. Бабенко, В.А. Салина // Сб. науч. тр. «Новые технологии и материалы в металлургии». - Екатеринбург: Межрегиональный издательский центр, 2015. - С. 306-312.

63. Zayakin, O.V. Complex physico-chemical and manufacturing study of chromium-containing alloys production processes / O.V. Zayakin // abstracts «XX Mendeleev Congress on general and applied chemistry». Vol. 3. - Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016. - P. 119.