

## **АННОТАЦИЯ**

диссертационной работы  
**«ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ  
ХРОМОМАНГАНЦЕВОЙ ЛИГАТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОМПЛЕКСНОГО КРЕМНЕАЛЮМИНИЕВОГО  
ВОССТАНОВИТЕЛЯ»**

представленной на соискание степени доктора философии (PhD)  
по образовательной программе 8D07202 – «Металлургия»

**КАБЫЛКАНОВА СУЛТАНА КАЙЫРБЕКОВИЧА**

### **Актуальность диссертационной работы**

В настоящее время одной из ключевых научно-технологических задач черной металлургии является снижение энергоёмкости производства стали, повышение степени усвоения легирующих элементов и обеспечение экологической устойчивости металлургического производства. Данная проблема приобретает особую актуальность в условиях истощения высококачественных хромовых и марганцевых руд, высокой энергоёмкости производства ферросплавов и усложнения процессов переработки минерального сырья. Традиционное применение феррохрома (FeCr) и ферромарганца (FeMn) требует многостадийных технологических операций, приводит к дополнительным затратам энергии и ресурсов и ограничивает общую эффективность металлургического процесса.

В этих условиях получение хрома и марганца в виде единой комплексной лигатуры рассматривается как перспективное научно-технологическое направление, позволяющее существенно повысить эффективность металлургической системы. Такой подход способствует повышению степени усвоения легирующих элементов в расплаве, сокращению технологического цикла, снижению энергетических затрат и более эффективному использованию низкосортного отечественного сырья. Кроме того, применение комплексных кремний-алюминийсодержащих восстановителей позволяет повысить ресурсную эффективность металлургического производства и соответствует современным принципам «зелёной металлургии», направленным на формирование энергосберегающих технологий нового поколения.

В связи с этим разработка технологии получения комплексной хромомарганцевой лигатуры на основе низкосортного сырья является актуальной научно-технологической задачей для развития металлургической отрасли.

### **Объект исследования**

Технология получения хромомарганцевой лигатуры из отечественных низкосортных хромовых и марганцевых руд с использованием комплексного кремний-алюминиевого восстановителя.

## **Предмет исследования**

Физико-химические и термодинамические процессы в системе «шлак–металл», протекающие при получении хромомарганцевой лигатуры с использованием комплексных кремний-алюминиевых восстановителей, а также закономерности их влияния на формирование лигатуры.

## **Цель работы**

Разработка технологии выплавки хромомарганцевой лигатуры с использованием отечественных низкосортных хромовых и железомарганцевых руд.

## **Задачи исследования**

Для достижения цели исследования в диссертационной работе поставлены следующие основные задачи:

- исследовать физико-химические свойства отечественных низкосортных хромовых и железомарганцевых руд, а также комплексных кремний-алюминиевых восстановительных материалов и оценить их металлургическую пригодность;

- определить оптимальный состав шихты для получения хромомарганцевой лигатуры на основе термодинамического и математического моделирования с учетом фазового состояния системы «металл–шлак», возможности восстановления и степени усвоения элементов;

- провести лабораторные эксперименты по выплавке хромомарганцевой лигатуры для проверки результатов термодинамических расчетов;

- выполнить крупно-лабораторные плавки в рафинировочной электродуговой печи мощностью 100 кВ·А для оценки технологии получения хромомарганцевой лигатуры;

- исследовать химический, фазовый и микроструктурный состав полученных металлических и шлаковых продуктов и определить степень перехода легирующих элементов в металлическую фазу;

- на основе полученных результатов разработать технологические рекомендации по производству хромомарганцевой лигатуры для комплексного легирования стали с использованием низкосортного отечественного сырья.

## **Научная новизна работы**

Впервые в диссертационной работе:

1. С использованием программных комплексов «HSC Chemistry 10» и «FactSage 8.4» комплексно исследованы термодинамические закономерности многокомпонентной системы Fe–Cr–Mn–Si–Al–Ca–Mg–O, и на основе нестандартных шихтовых материалов (низкосортных хромовых и железомарганцевых руд, кремний-алюминиевых восстановителей) определён научно обоснованный оптимальный состав для получения хромомарганцевой лигатуры.

2. Впервые научно обоснованы три технологических варианта получения хромомарганцевой лигатуры с использованием нестандартных

восстановителей (АМС, ФСА и пыль ФСХ), в результате чего получены лигатуры следующего химического состава:

- на основе АМС: Cr – 54,18 %, Mn – 20,20 %, Si – 3,08 %;
- на основе ФСА: Cr – 24,24 %, Mn – 29,12 %, Si – 2,93 %;
- на основе пыли ФСХ: Cr – 20,45 %, Mn – 40,14 %, Si – 4,39 %.

3. Впервые разработана математическая модель, описывающая процессы алюмотермического и силикотермического восстановления оксидов хрома и марганца по трём технологическим вариантам, на основе трёхфакторного экспериментально-статистического моделирования. Предложенная модель позволяет количественно оценивать степень перехода элементов Cr и Mn в металлическую фазу в зависимости от состава и расхода кремний-алюминиевых восстановителей:

для 1-го варианта:

$$\text{➤ } Y_{\text{Cr}} = 1,915 \cdot x^3 - 23,9 \cdot x^2 + 93,475 \cdot x - 12,615;$$

для 2-го варианта:

$$\text{➤ } Y_{\text{Cr}} = 2,2973 \cdot x^3 - 26,993 \cdot x^2 + 99,406 \cdot x - 12,791;$$

$$\text{➤ } Y_{\text{Mn}} = 3,4459 \cdot x^3 - 40,491 \cdot x^2 + 149,12 \cdot x - 69,217;$$

для 3-го варианта:

$$\text{➤ } Y_{\text{Mn}} = 1,8584 \cdot x^3 - 25,987 \cdot x^2 + 116,98 \cdot x - 68,071.$$

Полученные регрессионные зависимости позволили количественно оценить влияние расхода восстановителя и кислородного баланса на формирование комплексного хромомарганцевого сплава, а также послужили основой для определения оптимальных областей протекания процесса.

Впервые в лабораторных условиях получена хромомарганцевая лигатура по трём технологическим вариантам с использованием нестандартных кремний-алюминиевых восстановителей:

$$\text{➤ } \text{Cr} - 53,95 \%, \text{Mn} - 19,91 \%, \text{Si} - 3,19 \%;$$

$$\text{➤ } \text{Cr} - 23,93 \%, \text{Mn} - 28,31 \%, \text{Si} - 3,21 \%;$$

$$\text{➤ } \text{Cr} - 20,34 \%, \text{Mn} - 39,51 \%, \text{Si} - 4,58 \%.$$

Предложенные технологические варианты реализованы с учётом закономерностей алюмотермического и силикотермического восстановления оксидов хрома и марганца. Результаты проведённых опытных плавов подтверждены испытаниями с применением аналитических методов контроля и разработанным технологическим регламентом.

### **Практическая ценность работы**

Практическая ценность работы определяется разработкой научно обоснованной алюмосиликотермической технологии получения хромомарганцевой лигатуры. Предложенная технология основана на эффективном использовании местного сырья (хромовых руд Кемпирсайского месторождения и железомарганцевых руд Кереге-Тас), а также комплексных кремний-алюминиевых восстановителей.

В результате исследований разработан технологический регламент выплавки хромомарганцевой лигатуры в электродуговой печи мощностью 100 кВт·А и определены его основные технологические параметры. Проведённые

экспериментальные исследования показали высокую степень перехода элементов Cr и Mn в металлическую фазу.

На основе разработанного регламента проведены опытно-промышленные испытания, в ходе которых получена опытная партия хромомарганцевой лигатуры. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенной технологии для получения комплексной лигатуры и переработки низкосортного местного сырья в металлургическом производстве.

#### **Методы исследования**

В диссертационной работе для исследования физико-химических закономерностей и технологических параметров выплавки хромомарганцевой лигатуры использован комплекс теоретических и экспериментальных методов. Теоретический анализ осуществлялся посредством термодинамического моделирования с использованием программы «HSC Chemistry 10» и фазово-диаграммного анализа в программе «FactSage 8.4».

Для определения фазового состава исходного сырья и полученных продуктов (лигатуры, шлака) применялся рентгенофазовый анализ (РФА), для изучения микроструктуры и элементного состава – сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия (СЭМ/ЭДС), а для оценки термического поведения – дифференциально-термический анализ (ДТА). Кроме того, использованы методы химического и спектрального анализа.

Экспериментальное моделирование процесса выплавки и оптимизация технологических параметров проводились в лабораторных условиях в высокотемпературной печи Таммана и в электродуговой печи мощностью 100 кВт·А.

#### **Основные результаты работы, выносимые на защиту:**

- Результаты анализа физико-химических свойств исходного сырья (хромовых и железомарганцевых руд) и комплексных кремний-алюминиевых восстановителей (АМС, ФСА, пыль ФСХ);
- Результаты термодинамического моделирования процесса выплавки хромомарганцевой лигатуры;
- Результаты многофакторного математического моделирования зависимостей, определяющих степень извлечения хрома и марганца;
- Результаты лабораторных и крупно-лабораторных испытаний процесса выплавки хромомарганцевой лигатуры;
- Результаты определения технико-экономических показателей процесса выплавки хромомарганцевой лигатуры.

#### **Место выполнения научно-исследовательской работы**

Диссертационная работа выполнена в Международной школе инженерии Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева, на экспериментальной базе Химико-металлургического института имени Ж. Абишева, в лаборатории «Ферросплавы и процессы восстановления», а также в лаборатории кафедры «Металлургия и материаловедение» Стамбульского технического университета (г. Стамбул, Турция).

## Описание основных результатов исследования

- В результате анализа литературных данных установлено, что традиционные технологии производства низкоуглеродистых FeCr и FeMn характеризуются высокой энергоёмкостью, сравнительно низкой степенью перехода легирующих элементов в металл, а также отдельным введением элементов при легировании стали. Кроме того, данные технологии отличаются наличием многостадийной технологической схемы. Также установлено, что значительная часть хромовых и железомарганцевых руд в стране относится к низко- и среднесортным и не в полной мере пригодна для эффективной переработки традиционными технологиями. В связи с этим обоснована необходимость разработки технологии получения хромомарганцевой лигатуры на основе комплексного использования низкосортного отечественного сырья с целью решения указанных проблем.

- Комплексно исследованы физико-химические свойства исходных шихтовых материалов для выплавки хромомарганцевой лигатуры. Установлен химический состав хромовой руды Кемпирсайского месторождения:  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 39,86 %,  $\text{MgO}$  – 27,85 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 11,84 %,  $\text{SiO}_2$  – 10,93 %. По данным рентгенофазового анализа основной минералогической фазой является хромшпинелид  $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ . СЭМ-исследования показали гетерофазную структуру руды с хромитовыми зёрнами размером около 100 мкм. По результатам ДТА установлены эффекты удаления влаги (~150 °C), фазовые превращения, связанные с окислением железа (~480 °C), и термическая диссоциация магнийсодержащих силикатов в интервале 600–800 °C. Химический состав железомарганцевой руды Кереге-Тас составляет:  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  – 38,29 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 39,87 %,  $\text{SiO}_2$  – 16,74 %, при соотношении  $\text{Mn/Fe} = 1,75:1$ . По данным РФА основными фазами являются гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и пиролюзит ( $\text{MnO}_2$ ). СЭМ/ЭДС анализ показал крипстокристаллическую структуру руды и локальное содержание марганца до 52,56 %. ДТА–ТГ анализ выявил суммарную потерю массы 16–17 % и основные фазовые превращения в интервалах температур 350–750 °C и 750–1200 °C. Установлен химический состав нестандартных кремний-алюминиевых восстановителей: АМС – Al 8,55 %, Si 48,39 %, Mn 29,04 %; ФСА – Al 10,82 %, Si 48,62 %, Fe 40,52 %; пыль ФСХ – Al 1,51 %, Si 32,22 %, Cr 24,10 %. По данным рентгенофазового анализа их основными фазами являются силицидные соединения  $\text{Mn}_{11}\text{Si}_{19}$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{FeSi}_2$  и  $\text{Cr}_3\text{Si}$ .

- С целью обоснования процесса получения хромомарганцевой лигатуры проведены исследования с применением термодинамического и математического моделирования. С использованием программы «HSC Chemistry 10.0» в многокомпонентной системе Fe–Cr–Mn–Si–Al–Ca–Mg–O оценено влияние температурного режима и расхода восстановителей на формирование металлической и шлаковой фаз. Установлено, что при 1400 °C вследствие высокой термодинамической устойчивости  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  полное восстановление хрома не достигается, тогда как при 1800 °C возрастает потеря марганца за счёт испарения. В связи с этим оптимальная температура процесса составляет 1600 °C. Определено, что при расходе восстановителей 30 кг для

АМС и ФСА и 50 кг для пыли ФСХ степень извлечения Cr и Mn в металлическую фазу достигает 99–100 %. Для регулирования состава шлака выполнено фазовое моделирование в системе CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> с использованием программы «FactSage 8.4». Установлено, что увеличение содержания CaO приводит к деполимеризации структуры шлака и повышению его основности. Показано формирование фаз мервинита–периклаза и кальциевых силикатов. В данной области ликвидус шлака составляет 1600–1650 °С, а вязкость – 0,3–1,0 Па·с, что обеспечивает эффективное разделение металлической и шлаковой фаз.

- Для количественного описания закономерностей процесса выплавки разработана многофакторная математическая модель, в которой в качестве результирующих параметров приняты степени перехода хрома и марганца в металлическую фазу. Адекватность полученных регрессионных моделей подтверждена значениями коэффициента детерминации  $R^2 = 0,9615–0,9671$ . Результаты моделирования показали, что в определённой оптимальной области кислородного баланса, при температуре 1600 °С и рациональном расходе восстановителя достигаются максимальные значения степени извлечения Cr и Mn в металлическую фазу.

- На основе результатов теоретического, термодинамического и математического моделирования технология получения хромомарганцевой лигатуры проверена в лабораторных, крупно-лабораторных и производственных условиях. В лабораторных плавках, проведённых в печи Таммана при температуре 1600 °С и выдержке 20 минут, по трём вариантам шихты получена комплексная хромомарганцевая лигатура следующего состава: Cr – 20,34–53,95 %, Mn – 19,91–39,51 %, Fe – 22,92–44,64 %, Si – 3,20–4,59 %. Тигельные плавки в индукционной печи показали экзотермический характер металлотермических реакций, при этом основной этап протекает при 1200–1300 °С с повышением температуры расплава до 1500–1600 °С. Фазовый анализ установил, что металлическая фаза представлена твёрдым раствором  $\alpha$ -(Fe,Cr,Mn), а также силицидами FeSi, Fe<sub>3</sub>Si, MnSi, Mn<sub>3</sub>Si, CrSi, CrSi<sub>2</sub> и Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. В шлаковой фазе преобладают соединения Ca<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, при содержании (Fe,Mn)O менее 1 %, что свидетельствует о низких потерях металлов. Исследование реологических свойств шлака показало, что оптимальная основность составляет  $B = 1,5–1,8$ . Установлено, что температурная зависимость вязкости подчиняется закону Аррениуса ( $R^2 \approx 0,97–0,99$ ), а энергия активации по уравнению Френкеля–Андраде составляет 161,7–189,8 кДж/моль.

- На основе полученных результатов в рафинировочной электродуговой печи мощностью 100 кВ·А проведены крупно-лабораторные плавки, всего выполнено 21 опытная плавка. В результате подтверждена стабильность химического состава металла, средние значения которого составили: для 1-го варианта – Fe 22,64 %, Cr 52,76 %, Mn 20,18 %, Si 4,31 %; для 2-го варианта – Fe 41,61 %, Cr 27,72 %, Mn 26,76 %, Si 3,80 %; для 3-го варианта – Fe 34,92 %, Cr 20,58 %, Mn 39,82 %, Si 4,56 %. Основность шлака сохранялась в пределах 1,57–1,67, что подтвердило технологическую

устойчивость процесса выплавки. Предложенная технология апробирована в производственных условиях на предприятии ТОО «НПО «Марганец» в электродуговой печи мощностью 250 кВ·А, где в течение 12 суток получено около 500 кг хромомарганцевой лигатуры. Техничко-экономические расчёты показали, что применение предложенной комплексной лигатуры обеспечивает экономическую эффективность в пределах 9,86–35,43 % по сравнению с традиционными низкоуглеродистыми сплавами FeCr и FeMn.

#### **Личный вклад докторанта в написание диссертации**

Основные научные результаты диссертационной работы получены при непосредственном участии автора и под руководством научного руководителя. Автором выполнены экспериментальные и расчётные исследования с использованием современного лабораторного оборудования и программных комплексов HSC Chemistry и FactSage. Результаты исследования подтверждены публикациями в научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. По итогам крупно-лабораторных и производственных испытаний разработана технология получения хромомарганцевой лигатуры, на основе которой оформлены технологический регламент и акт испытаний, а также получен патент Республики Казахстан на полезную модель.

#### **Апробация работы**

Предложенная технология выплавки хромомарганцевой лигатуры апробирована в крупно-лабораторных условиях в электродуговой печи мощностью 100 кВ·А. По результатам испытаний подтверждена возможность её практической реализации и разработан технологический регламент выплавки хромомарганцевой лигатуры.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс НАО «Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова». Материалы исследования используются при преподавании дисциплин «Теория и технология производства ферросплавов» и «Рециклинговые технологии в производстве ферросплавов» в рамках образовательной программы «Металлургия», что подтверждено соответствующим актом внедрения.

Практическая значимость и производственная ценность работы подтверждены внедрением результатов исследований на производственной базе ТОО «НПО «МАРГАНЕЦ», по итогам чего оформлен акт внедрения.

По теме диссертационной работы опубликовано всего 15 научных трудов, в том числе в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, – 4 статьи (в журналах издательства Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) «Processes», «Metals», «Molecules» – 3 статьи, а также в журнале «Acta Metallurgica Slovaca» – 1 статья), в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК, – 3 статьи (в научном журнале «Наука и техника Казахстана» – 1 статья, в журнале «Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева» – 1 статья, в научном журнале «Central Asian Transactions on Materials Structure

and Properties» – 1 статья), в других научных изданиях (в «Вестнике Актыобинского регионального университета им. К. Жубанова») – 3 статьи.

Основные научные результаты диссертационной работы были представлены и опубликованы в виде 4 тезисов на международных и республиканских научно-практических конференциях:

- 1 тезис в материалах XII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и инжиниринг», посвящённой 60-летию Карагандинского индустриального университета (Темиртау, 2023);

- 1 тезис в материалах Международной научно-практической конференции «Комплексная переработка минерального сырья и инновации как актуальные направления экономической модернизации» (Алматы, 2023);

- 1 тезис в материалах XVII Сагиновских чтений «Интеграция образования, науки и производства» международной научно-практической конференции (Караганда, 2025);

- 1 тезис в материалах V Международной научно-экспериментальной конференции «Абишевские чтения – 2026» «Интеграция науки, цифровых технологий, искусственного интеллекта и промышленного производства в горно-металлургическом комплексе Республики Казахстан» (Алматы, 2026).

Кроме того, по результатам исследования получен патент Республики Казахстан на полезную модель № 9126 «Шихта для получения хромомарганцевого ферросплава», выданный РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» Министерства юстиции Республики Казахстан (дата публикации – 17.05.2024 г.).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, основной части, включающей четыре главы, заключения и приложений. Общий объем работы составляет 138 страниц машинописного текста. Материалы исследования направлены на всестороннее раскрытие содержания диссертации и дополнены иллюстративными материалами: в работе представлено 66 рисунков и 21 таблица. Список использованных источников включает 103 наименования, в том числе труды отечественных и зарубежных учёных, а также современные научные публикации.