

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии PhD  
по специальности 6D070900 – «Металлургия»

**Макаев Талгат Саятулы**

### **Исследование и разработка технологии выплавки ферросиликоалюминия из сырья Куу-Чекинского угольного месторождения**

**Актуальность исследования** обусловлена тем, что на данный момент выплавка комплексного сплава ферросиликоалюминий в условиях Республики Казахстан не производится.

В связи со строительством ферросплавного завода (ТОО «Карагандинский завод комплексных сплавов») на промышленной площадке свободной экономической зоны «Сары-Арка» (г. Караганда) экономически будет оправдано использование углистого сырья ближайшего к заводу угольного месторождения «Куу-Чекинский». Товарные угли этого разреза добываются для использования в энергетических целях, однако их использование в ферросплавном переделе не производилось. Поэтому одним из перспективных направлений является выплавка высококремнистых марок ФСА, содержащих 60-65% кремния и 9-15% алюминия из углей зольностью 40-45%. Данные марки сплавов (ФС65А10 и ФС65А15) не производились и технология их выплавки не отработана.

Несмотря на промышленное освоение технологии выплавки ФСА все еще не установлен механизм и области составов сплава, имеющих склонность к рассыпанию, что существенно снижает технико-экономические показатели производства. Для решения этой проблемы необходимо проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований с задействованием термодинамически-диаграммного анализа системы Fe-Al-Si.

Сплав ФСА в основном использовался для обработки рядовых и низколегированных марок сталей. Для установления принципиальной возможности применения ФСА для обработки легированных марок сталей необходимо проведение опытно-промышленных испытаний с исследованием механических свойств конечной стальной продукции.

Реализация поставленных в диссертационной работе задач позволит дать оценку применимости куу-чекинского угля и разработать технологию выплавки высококремнистых марок ФСА. Определить механизм и области составов сплава, подверженных рассыпанию, а также установить возможность использования ФСА для обработки легированных марок сталей.

**Цель работы.** Исследование углей месторождения «Куу-Чекинский» и разработка технологии выплавки высококремнистых марок ФСА, а также определение стабильных составов сплава на основе термодинамически-диаграммного анализа системы Fe-Al-Si.

**Задачи исследований.** В соответствии с указанной целью в диссертации решались следующие взаимодополняющие задачи:

- исследовать сравнительные физико-химические и электрофизические свойства высокозольных разновидностей куу-чекинского угля и составы образующихся фаз в объеме угля в температурном интервале 750-1650 °С;

- уточнить возможный механизм и начало восстановительных реакций оксидов кремния и алюминия при выплавке сплава ФСА;

- определить возможный механизм рассыпания сплава ФСА отдельных составов на основе термодинамически-диаграммного анализа системы Fe-Al-Si;

- проведением лабораторных исследований и промышленных испытаний установить возможность использования сплава ФСА для обработки легированных марок стали Cr40 и 30CrNi<sub>2</sub>Mo;

- отработать технологические режимы выплавки высококремнистых марок ФСА (ФС65А10 и ФС65А15) на основе крупно-лабораторных испытаний в электропечи мощностью 200 кВА.

**Научная новизна.** В настоящей диссертационной работе впервые:

- проведены физико-химические исследования высокозольных разновидностей угля месторождения «Куу-Чекинский» и дана оценка применимости для выплавки сплава ферросиликоалюминий в сравнении с ранее использовавшимся углистым сырьем других угольных месторождений;

- на основании исследований в условиях высокотемпературного нагрева впервые определен механизм фазовых превращений в объеме высокозольного угля и установлена температура начала газификации диоксида кремния и образования карбида кремния и муллита. Определено, что весь свободный диоксид кремния в составе угля превращается в карбид кремния и остаточными конденсированными фазами являются карбид кремния, муллит и твердый углерод;

- впервые на основании триангуляции системы Fe-Al-Si установлена критическая область составов сплава ФСА, где происходит совместная кристаллизация метастабильной высокотемпературной фазы лебоита (FeSi<sub>2</sub> В) и тройного соединения FeAl<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>. Установлено, что разрушение сплавов по составу находящихся в этой области является следствием ликвации фазы (FeSi<sub>2</sub> В) и дальнейшей ее перекристаллизации с увеличением объема.

- крупно-лабораторными испытаниями в электропечи мощностью 200 кВА отработаны технологические режимы выплавки высококремнистых марок ФСА из куу-чекинских углей. Установлено, что при выплавке сплавов марки ФС65А10 и ФС65А15 избыток углерода должен быть 10-15% относительно стехиометрического расхода;

- в условиях металлургического завода специальных сталей (г. Xinin, КНР) впервые проведены испытания по обработке легированной стали марки 40Cr сплавом ФСА взамен ферросилиция и металлического алюминия. Установлено сравнительное повышение полезного использования кремния и алюминия из ФСА и высокая экономическая эффективность сплава. Установлена принципиальная возможность применения сплава ФСА для обработки легированных сталей на примере марок Cr40 и 30CrNi<sub>2</sub>Mo.

### **Практическая ценность работы.**

- в результате проведенных исследований установлено соответствие углистого сырья угольного месторождения «Куу-Чекинский» для выплавки сплава ферросиликоалюминий, близость расположения которого от завода ТОО «КЗКС» будет способствовать снижению издержек на транспортные расходы;
- проведением изотермических выдержек определено, что применительно к куу-чекинским углям, начало восстановления диоксида кремния происходит в температурном интервале 1450-1500°C, а восстановление оксида алюминия происходит только из муллита;
- на основе триангуляции системы Fe-Al-Si определены критические области составов сплава ФСА, подверженных рассыпанию. Рекомендованы стабильные составы сплава ФСА;
- крупно-лабораторными испытаниями установлена возможность использования куу-чекинских углей для выплавки ФСА. Определены технологические режимы при выплавке высококремнистых марок ФСА;
- лабораторными исследованиями и промышленными испытаниями установлена возможность использования ФСА для обработки легированной стали, в частности для марок 40Cr и 30CrNi<sub>2</sub>Mo.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- результаты исследований сравнительных физико-химических свойств высокозольного угля месторождения «Куу-Чекинское»;
- результаты изменения фазового состава угля при нагреве до температуры 1650 °C;
- результаты термодинамически-диаграммного анализа системы Fe-Al-Si и определение основных фазовых составов сплава ФСА при кристаллизации;
- результаты крупно-лабораторных испытаний выплавки ФСА в электропечи мощностью 200 кВА;
- результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний по применению сплава ФСА при обработке легированных марок стали Cr40 и 30CrNi<sub>2</sub>Mo.

**Работа выполнялась** на кафедре «Нанотехнологии и металлургия» Карагандинского технического университета и в Химико-металлургическом институте им. Ж.Абишева в рамках выполнения договорной темы «Металлографические и петрографические исследования проб высокозольного угля разреза «Куу-Чекинский», различных марок ферросиликоалюминия и сталей, обработанных сплавом ферросиликоалюминий» (ответственный исполнитель).

**Апробация работы, публикации.** Основные научные результаты диссертационной работы представлены в 9 публикациях, в том числе:

- изданиях, рекомендованных КОКСОН МОН РК опубликованы 3 статьи (1 статья – «Вестник КазНУ», Алматы, Казахстан; 1 статья – «Вестник ВКГУ имени Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, Казахстан, 1 статья в Российском журнале - «Вестник ИрГТУ»);
- 2 статьи в международном научном журнале «Metalurgija» (Загреб, Хорватия), который входит в базу данных Scopus (перцентиль 57).

Основные результаты доложены на 4 международных научно-практических конференциях:

- 2 тезиса докладов на международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 10 и № 11), Караганда, Республика Казахстан;

- 1 доклад на международной научно-практической конференции «Инновации в области естественных наук как основа экспортоориентированной индустриализации Казахстана», Алматы, Республика Казахстан;

- 1 доклад на XV международной научно-практической конференции «Conduct of modern science 2019», Sheffield, Англия.

**Структура и объём диссертации:** диссертация состоит из введения, основной части из 6 глав, заключения, 3 приложения. Объём диссертации составляет 135 страниц текста, работа содержит 23 рисунка, 40 таблиц, список использованных источников, включающего 94 наименований.