

**В.П. Чернобровин, И.Ю. Пашкеев, Г.Г. Михайлов,
А.А. Лыкасов, А.В. Сенин, О.А. Толканов**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
УГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА
ИЗ УРАЛЬСКИХ РУД**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**В.П. Чернобровин, И.Ю. Пашкеев, Г.Г. Михайлов,
А.А. Лыкасов, А.В. Сенин, О.А. Толканов**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА
УГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА
ИЗ УРАЛЬСКИХ РУД**

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2004

УДК 669.15-198+669.263.1+669.01+541.1

Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд: Монография / В.П. Чернобровин, И.Ю. Пашкеев, Г.Г. Михайлов, А.А. Лыкасов, А.В. Сенин, О.А. Толканов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 346 с.

Книга посвящена проблеме использования хромовых руд, весьма неоднородных по строению, химическому и минеральному составам и разбросанных по территории Урала. Эта проблема возникла в связи с тем, что ранее ферросплавная промышленность ориентировалась, в основном, на хромовые руды Казахстана, которые теперь оказались вне территории России. В книге подробно рассмотрены проявления хромовых руд на Урале, металлургические свойства этих руд, особенности превращений в рудах при нагреве и карботермическом восстановлении. Приведены новые результаты по кинетике и механизму восстановления углеродом хромовых руд различного строения и выделенных из них хромитов. Впервые подробно описывается диаграмма фазовых равновесий в системе Fe–Cr–O. В монографии систематизирован и дополнен материал о свойствах шлаков производства углеродистого феррохрома, приведены результаты исследований их вязкости, плавкости, межфазного взаимодействия и распределения элементов между шлаком и металлом.

Книга предназначена для инженеров, научных работников и может быть рекомендована студентам старших курсов металлургических вузов.

Ил. 165, табл. 78, библиогр. список – 252 назв.

Рецензенты:

Павлов А.В. – доктор технических наук, профессор, Московский институт стали и сплавов (технологический университет), г. Москва;

Тягунов Г.В. – доктор технических наук, профессор, Уральский государственный технический университет (УПИ), г. Екатеринбург.

ISBN 5-696-02671-0

© Коллектив авторов, 2004.

© Издательство ЮУрГУ, 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХРОМОВЫХ РУД	
1.1. Геохимия и минералогия хрома	7
1.2. Хромовые руды. Основные понятия	11
1.3. Минералы хромовых руд	13
1.3.1. Главные промышленные минералы – хромшпинелиды	13
1.3.2. Нерудные минералы	19
1.3.3. Второстепенные и редкие минералы	21
1.4. Месторождения хромовых руд	21
1.5. Метаморфизм хромшпинелида хромовых руд	32
1.6. Структура и текстура хромовых руд	38
1.6.1. Классификация структур хромовых руд	39
1.6.2. Текстура хромовых руд уральских месторождений	43
1.7. Особенности вещественного состава хромовых руд некоторых месторождений Урала	
1.7.1. Минераграфическая характеристика хромовых руд	45
1.7.2. Химический состав хромовых руд	61
1.7.3. Минеральный состав хромовых руд	70
Библиографический список к главе 1	107
Глава 2. ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ Fe–Cr–O	
2.1. Диаграмма состояния системы Fe–O	111
2.2. Фазовые равновесия в системе Cr–O	122
2.3. Диаграмма состояния системы Fe–Cr	124
2.4. Условия существования оксидных и металлических растворов в системе Fe–Cr–O	127
2.4.1. Растворы оксида хрома в вюститe	127
2.4.2. Фаза шпинельного типа	130
2.4.3. Фаза со структурой корунда	135
2.4.4. Металлическая фаза	136
2.5. Диаграмма состояния системы Fe–Cr–O	142
2.6. Фазовые превращения при восстановлении растворов FeCr ₂ O ₄ –Fe ₃ O ₄	145
Библиографический список к главе 2	148
Глава 3. ФАЗОВЫЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ХРОМОВЫХ РУДАХ ПРИ ОКИСЛЕНИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ	
3.1. Методики исследований	
3.1.1. Дериватографический метод анализа	152
3.1.2. Термодинамические расчеты с использованием программного комплекса «АСТРА-4»	157
3.2. Термодинамика и механизм восстановления хромовых руд	
3.2.1. Существующие представления о механизме восстановления твердых оксидов углеродом	160

3.2.2. Особенности «газофазно-твердофазной» схемы карботермического восстановления оксидов с участием неустойчивых газообразных частиц	165
3.2.3. Термодинамическая оценка восстановительной способности углеродсодержащих соединений	170
3.2.4. Термодинамический анализ последовательности химических превращений при карботермическом восстановлении хромсодержащих оксидов	189
3.2.5. Особенности восстановления с учетом и без учета образования карбидов	199
3.2.6. Последовательность восстановления хрома и железа	200
3.3. Окисление хромитов	207
3.3.1. Термодинамический анализ окисления хромита железа	208
3.3.2. Экспериментальное исследование распада хромита железа при окислении	209
3.3.3. Связь показателей карботермического восстановления хромитов с окисленностью хромитов	215
3.4. Термические превращения в нерудных минералах	218
3.4.1. Термический распад серпентина и хлорита	219
3.4.2. Карботермическое восстановление серпентина и хлорита	225
3.5. Карботермическое восстановление хромитов и хромовых руд	232
3.5.1. Особенности вещественного состава хромитов	233
3.5.2. Карботермическое восстановление порошковых хромитов	233
3.5.3. Карботермическое восстановление порошковых хромовых руд	239
3.5.4. Карботермическое восстановление кусковых хромовых руд	243
Выводы	264
Библиографический список к главе 3	265
Глава 4. ШЛАКИ УГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА	269
4.1. Плавление и затвердевание шлаков	271
4.2. Вязкость шлаковых расплавов	284
4.3. Электрическая проводимость шлаков	305
4.4. Межфазное взаимодействие шлака и металла	312
4.5. Распределение элементов между шлаком и металлом	317
4.5.1. Термодинамическая модель распределения хрома и железа между металлическим и шлаковым расплавом	318
4.5.2. Термодинамическая оценка распределения хрома и железа между шлаком и металлом при выплавке феррохрома	322
Библиографический список к главе 4	325
Приложение 1	329
Приложение 2	332
Приложение 3	338
Приложение 4	340
Приложение 5	342
Приложение 6	344