

№ 280

МИСиС

Н.П. Лякишев
М.И. Гасик
В.Я. Дашевский

Металлургия ферросплавов

Часть 1. Metallургия сплавов кремния,
марганца и хрома

Учебное пособие

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 280

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ**
Технологический университет



Кафедра руднотермических процессов

Н.П. Лякишев

М.И. Гасик

В.Я. Дашевский

Металлургия ферросплавов

**Часть 1. Metallургия сплавов кремния,
марганца и хрома**

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности Metallургия черных металлов, Metallургия техногенных и вторичных ресурсов и Metallургия цветных металлов

УДК 669.168
Л97

Рецензент
канд. техн. наук *С.И. Котельников*

Лякишев Н.П., Гасик М.И., Дашевский В.Я.

Л97 **Металлургия ферросплавов. Ч. 1. Metallургия сплавов кремния, марганца и хрома: Учеб. пособие. – М.: МИСиС, 2006. – 117 с.**

В пособии изложены физико-химические основы высокотемпературных процессов получения ферросплавов кремнистой, марганцевой и хромистых групп углеродо-, силико- и алюминотермическими методами. Рассмотрены технологии промышленного производства этих групп ферросплавов, характеристики шихтовых материалов, технологические параметры процессов выплавки.

Пособие дает студентам представление о теории и современных технологиях производства ферросплавов, в частности сплавов кремния, марганца и хрома.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 150101 (1101) «Металлургия черных металлов», 150109 (1109) «Металлургия технологических и вторичных ресурсов» и 150102 (1102) «Металлургия цветных металлов».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	6
1. Классификация ферросплавных процессов	11
1.1. Ведущие элементы ферросплавов.....	11
1.2. Общие требования к качеству ферросплавов	13
1.3. Классификация ферросплавных процессов по виду применяемых восстановителей	14
1.4. Классификация ферросплавных процессов по виду используемого агрегата.....	17
1.5. Классификация ферросплавных процессов по технологическим признакам.....	18
2. Кремний и карбид кремния	21
2.1. Свойства кремния, углерода и их соединений.....	21
2.2. Теоретические основы восстановления кремния углеродом.....	26
2.3. Сортамент кристаллического кремния и качество шихтовых материалов	27
2.4. Технология выплавки кристаллического кремния	30
2.5. Технология производства карбида кремния	34
3. Ферросилиций.....	37
3.1. Свойства соединений кремния	37
3.2. Теоретические основы восстановления кремния углеродом при получении ферросилиция	39
3.3. Электрические характеристики и геометрические параметры ванны электропечей для выплавки ферросилиция.....	40
3.4. Технология выплавки и разливки ферросилиция	41
4. Сплавы марганца	51
4.1. Свойства марганца и его соединений	52
4.2. Минералы, руды и концентраты марганца.....	60
4.3. Дефосфорация марганцевых концентратов и марганецсодержащих продуктов	62
4.4. Технология сушки и окускования марганцевых концентратов	64
4.5. Технология выплавки высокоуглеродистого ферромарганца	66
4.6. Технология выплавки ферросиликомарганца	73
4.7. Технология выплавки металлического марганца, низко- и среднеуглеродистого ферромарганца.....	75

4.8. Технология получения азотированных марганца и ферросиликомарганца	82
5. Сплавы хрома	85
5.1. Свойства хрома и его соединений	85
5.2. Минералы и руды хрома	92
5.3. Технология получения высокоуглеродистого феррохрома	93
5.4. Технология получения ферросиликохрома	97
5.5. Технология получения низкоуглеродистого феррохрома	100
5.6. Вакуумные процессы обезуглероживания и дегазации феррохрома	105
5.7. Кислородно-конвертерный и силикотермический способы получения среднеуглеродистого феррохрома	106
5.8. Аллюминотермический способ получения металлического хрома и феррохрома	109
5.9. Технология получения азотированного феррохрома	113
Библиографический список	116

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное издание представляет собой первую часть пособия к лекциям по учебной дисциплине «Металлургия ферросплавов», состоящего из двух частей. В нем приведены необходимые сведения по теории и технологии металлургии ферросплавов. С рядом положений данного пособия студенты ранее могли кратко ознакомиться в курсе «Теория металлургических процессов». Однако изложенные здесь материалы не только существенно расширяют знания в области теории металлургических процессов, касающиеся производства ферросплавов, но и подробно описывают технологические аспекты этих процессов.

В пособии освещены физико-химические основы высокотемпературных процессов получения ферросплавов кремнистой, марганцевой и хромистых групп углеродо-, силико- и алюминотермическими методами, а также технологии промышленного производства этих групп ферросплавов, характеристики шихтовых материалов, технологические параметры процессов выплавки, электрические и конструктивные параметры печей для выплавки ферросплавов.

В пособии рассмотрены теоретические основы и технологические аспекты процессов производства кристаллического кремния, металлических марганца и хрома. Это связано не только с тем, что их традиционно производят на ферросплавных заводах, но и с тем, что кристаллический кремний, металлические марганец и хром получают теми же методами, что и ферросплавы соответствующих групп.

ВВЕДЕНИЕ

Ферросплавы – сплавы железа с одним или несколькими элементами, получаемыми преимущественно извлечением металлов из руд, концентратов, технически чистых оксидов. Ферросплавы используются в основном в сталеплавильном производстве при производстве высоколегированных сплавов и чугунов. Применение ферросплавов с целью раскисления и легирования жидкой сталеплавильной ванны повышает комплекс физико-механических свойств и функциональные характеристики металлопродукции. Некоторые виды ферросплавов применяются в цветной металлургии, химической промышленности и других отраслях.

Ферросплавное производство является составной частью горно-металлургического комплекса, поскольку главная задача ферросплавной промышленности – первичное извлечение (восстановление) металлов из природных минеральных образований, добываемых из недр. Руды имеют в своем составе нерудные минералы, пустую породу. Поэтому руду в большинстве случаев подвергают обогащению одним или последовательно несколькими способами (гравитационным, магнитным, электрическим, флотационным, реже – химическим) с получением концентратов, в которых содержание ведущего металла существенно выше по сравнению с исходной рудой. Использование концентратов, а не исходной руды позволяет получать ферросплавы с большим содержанием ведущего элемента, с меньшим содержанием примесных элементов (фосфора, серы, цветных металлов), уменьшить количество шлака и отходящих газов и существенно снизить удельный расход электроэнергии.

Начало производства и использования ферросплавов относится к концу XIX в., когда в доменных печах была освоена выплавка углеродистого ферромарганца и бедного ферросилиция. Ферросплавы с высоким содержанием металлов, имеющих большее химическое сродство к кислороду, чем железо, а также ферросплавы с низким содержанием углерода или содержащие тугоплавкие металлы доменным способом получить невозможно. Производство ферросплавов всей гаммы трудновосстановимых элементов с низким содержанием углерода успешно освоено в XX веке в дуговых электрических печах.

Производство ферросплавов в России впервые было организовано за несколько лет до начала первой мировой войны. На порогах уральской реки Сатки был построен небольшой электрометаллургии-

ческий завод, где в двух маленьких однофазных печах мощностью 280 кВт выплавляли ферросилиций с 30...40% кремния и высокоуглеродистый феррохром. Впоследствии от выплавки феррохрома отказались, и в обеих печах получали ферросилиций. Производительность этих печей составляла около 500 т 45%-ного ферросилиция в год.

Создание в СССР в 30-х годах и последующие периоды развития народного хозяйства электроэнергетической и минерально-сырьевой базы явилось предпосылкой освоения и развития производства ферросплавов практических всей видовой и марочной структуры. Ферросплавная промышленность СССР была представлена десятью ферросплавными заводами. В 1931 г. вошел в строй Челябинский электрометаллургический комбинат, а в 1933 г. – Запорожский и Зестафонский ферросплавные заводы. В годы Великой Отечественной войны были пущены Ключевской (1941 г.), Кузнецкий (1942 г.) и Актюбинский (1943 г.) ферросплавные заводы. В последующие годы вошли в строй действующих Серовский (1958 г.), Стахановский (1962 г.), Никопольский (1966 г.) и Ермаковский (1968 г.) ферросплавные заводы. Суммарный объем производства ферросплавов в СССР в 1990 г. составил около 5 млн т.

Потребление ферросплавов и, следовательно, их производство напрямую зависят от количества выплавляемой стали. По статистическому прогнозу мировое производство стали в 2005 г. должно составить порядка 1 млрд т. В России выплавка стали в 1990 г. составила 89,6 млн т и в связи с кризисным положением в металлургии снизилась до 43,8 млн т в 1998 г. Подъем сталеплавильного производства начался с 1997 г., когда было выплавлено 51,5, а в 2000 г. 59,5 млн т. К 2010 г. производство стали в России достигнет 75...77 млн т, в том числе для внутреннего потребления 40...47 млн т.

Постоянно увеличивающийся выпуск стали в мире сопровождается ростом выплавки ферросплавов. Так, ежегодное производство ферросилиция (в пересчете на чистый кремний) более чем в 30 странах различных континентов выросло с 2471 тыс. т (кремния) в 1998 г. до 2654 тыс. т в 2000 г., т.е. на 7,0%. Среди лидирующих стран – производителей ферросилиция (в пересчете на чистый кремний), тыс. т: Китай – 735, страны СНГ (Украина, Россия, Казахстан) – 481, Норвегия – 481, США – 282.

Наряду с ферросилицием в рудно-термических электропечах выплавляют кремний технической чистоты. Мировое производство кремния в настоящее время составляет около 1 млн т. Производст-

венные мощности по выплавке кремния составляют, тыс. т: США – 201, Бразилия – 153, КНР – 130, Норвегия – 110, Франция – 80 и др.

Доля марганцевых ферросплавов в общем объеме ферросплавной металлопродукции в мире составляет 40...45%. Мировое производство марганцевых сплавов к концу XX в. составило 7,6 млн т. Основными производителями высокоуглеродистого ферромарганца являются Китай, ЮАР, Япония, Франция, Украина и Бразилия. Среди производителей ферросиликомарганца следует выделить Китай и Украину. В значительных объемах этот сплав производят также в ЮАР, Норвегии, Бразилии и Индии. Производство средне- и низкоуглеродистого ферромарганца сосредоточено в основном в Японии, Китае и Норвегии. Производственные мощности по выпуску металлического марганца сосредоточены главным образом в Украине, Японии, США, ЮАР, Франции и Бразилии. В конце 90-х годов мировое производство высокоуглеродистого ферромарганца достигло 4297 тыс. т, ферросиликомарганца 3083 и среднеуглеродистого ферромарганца 655 тыс. т.

С середины 90-х годов в мире наблюдались высокие темпы роста производства феррохрома, что обусловлено активизацией спроса на нержавеющую сталь, для выпуска которой используется примерно 90% феррохрома. В 1998 г. производство феррохрома в мире составило 4,9 млн т. Промышленность Западной Европы удовлетворяет свою потребность в высоко-, средне- и низкоуглеродистом феррохроме за счет собственного производства примерно на 35%, а более 50% – за счет поставок из ЮАР. Эта страна – ведущий производитель феррохрома в мире. Она располагает крупнейшими запасами хромитов и намерена расширить выпуск этого сплава. В 1998 г. здесь произведено 2,2 млн т феррохрома (44,4% мирового производства) при мощностях примерно 2,5 млн т. Казахстан занимает второе место в мире по производству феррохрома, располагая крупными запасами хромитов.

Ферросплавное производство России представлено Челябинским электрометаллургическим комбинатом (ОАО «ЧЭМК») с установленной мощностью трансформаторов 575 МВ·А, ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (285 МВ·А), ОАО «Серовский завод ферросплавов» (144 МВ·А), ОАО «Ключевской завод ферросплавов» (25 МВ·А), ЗАО «Алапаевская ферросплавная компания», ОАО «Ванадий-Тулачермет». Кроме перечисленных заводов ферросплавы выплавляют также в цехах, входящих в составы интегрированных металлургических комбинатов и заводов: ОАО «Новолипецкий металлургиче-

ский комбинат», ОАО «Чусовской металлургический завод», ОАО «Орско-Халиловский металлургический комбинат», ОАО «Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение», ОАО «Косогорский металлургический завод». В эксплуатации находятся 85 рудно-термических электропечей. Суммарная номинальная мощность трансформаторов ферросплавных предприятий Российской Федерации составляет 1029 МВ·А. Производственные мощности этих предприятий могут обеспечить выпуск товарных и переделных ферросплавов в объеме около 2 млн т.

В 1990 г. в России было произведено 1675 тыс. т ферросплавов, а в 2000 г. – 1165 тыс. т. Загрузка производственных мощностей в 2000 г. к уровню 1990 г. достигла 70%. Ферросплавная промышленность России производит ферросплавы широкой видовой структуры и различного марочного состава, которые характеризуются высокой конкурентоспособностью: ферросилиций, ферромарганец, ферросиликомарганец, феррохром, ферросиликохром, кристаллический кремний, ферровольфрам, ферромolibден, феррованадий, ферротитан, ферробор, ферросиликоцирконий, металлический хром и ряд лигатур и модификаторов.

Суммарная номинальная мощность трансформаторов трех ферросплавных заводов Украины составляет 1687 МВ·А, в том числе: Никопольского (ОАО «НЗФ») 1000 МВ·А, Запорожского (ОАО «ЗФЗ») 467 МВ·А и Стахановского (ОАО «СФЗ») 220 МВ·А. Наряду с ферросплавными заводами, традиционно производящими ферросплавы в Украине, выплавка ферросилиция освоена в электропечи мощностью 16,5 МВ·А Запорожского производственного алюминиевого комбината (ОАО «ЗалК»), ферроникеля (20% Ni) – в двух электропечах ферросплавного типа (каждая мощностью 48 МВ·А) Побужского ферроникелевого комбината (ОАО «ПФНК»), высокоуглеродистого ферромарганца в доменных печах. Ферросплавные заводы Украины специализируются по производству ферросиликомарганца, ферромарганца, металлического марганца, ферросилиция, ферроникеля, силикоалюминия, кристаллического кремния, ферробора, ферротитана. Украина располагает также мощностями по производству карбида кремния (SiC), карбида бора (B₄C), нитрида бора (BN), нормального электрокорунда, высокопроцентного ферробора.

Ферросплавная промышленность Казахстана представлена заводами ферросплавов: ОАО «Аксуский завод ферросплавов», ОАО «Феррохром» и ОАО «Тимертау». Суммарная номинальная мощность трансформаторов составляет 1144 МВ·А, в том числе на Аксу-

ском (Ермаковском) заводе 802 МВ·А, ОАО «Феррохром» (Актюбинский завод) 198 МВ·А, ОАО «Тимертау» 144 МВ·А. Ферросплавные заводы Казахстана ориентированы на выпуск ферросилиция и феррохрома, поскольку страна располагает одним из крупнейших в мире месторождений руд хрома (хромитов). В последние годы на Аксуском заводе освоена выплавка ферросиликомарганца с использованием марганцевых руд месторождений Казахстана.

Ферросплавная промышленность Грузии представлена ОАО «Зестафонский завод ферросплавов». Суммарная номинальная мощность трансформаторов составляет 331 МВ·А. Завод специализируется по выплавке марганцевых ферросплавов с использованием чиатурских марганцевых руд (концентратов).

Таким образом, страны СНГ – производители ферросплавов (Россия, Украина, Казахстан и Грузия) – располагают большими производственными мощностями с суммарной установленной номинальной мощностью печных трансформаторов свыше 4500 МВ·А. Оптимистические прогнозы дальнейшего развития производства ферросплавов в странах СНГ подкрепляются также наличием минерально-сырьевой базы для выплавки в больших объемах марганцевых (Никопольский, Большетокмакский, Чиатурский и другие марганцеворудные бассейны), хромистых (Кемпирсайское и Сарановский хромитоносные массивы), кремнистых ферросплавов, силикоалюминия, а также ферросплавов малой группы (ферромолибдена, ферровольфрама, феррованадия, ферротитана, феррониобия, ферробора, ферросиликоциркония, ферроникеля, ферросиликокальция и ферробора).

Для изготовления электродных углеродных масс, угольных и графитированных электродов для дуговых ферросплавных и сталеплавильных электропечей в странах СНГ имеется мощная сырьевая база антрацитов, углей, нефти, каменноугольного связующего.

Решению проблем в области повышения качественной и ценовой составляющих конкурентоспособности ферросплавов во многом способствуют проводимые в странах СНГ фундаментальные и прикладные исследования по изучению термодинамики расплавов жидких ферросплавов и шлаков, структуры и свойств твердых ферросплавов, новых видов минерального сырья и восстановителей, электрических режимов плавки, разработки сквозных инновационных технологий, обеспечивающих высокое качество ферросплавов, снижение удельного расхода электроэнергии и решение природоохранных задач.