

6  
A-56

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО  
ЗНАМЕНИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

На правах рукописи

Инженер И.И. Барашкин

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ПРОЦЕССА  
ВЫПЛАВКИ 45%-НОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ В ЗАКРЫТЫХ  
ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

Специальность № 321  
Металлургия черных металлов

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

Днепропетровск

1970

Работа выполнена на кафедре электрометаллургии стали и ферросплавов Днепропетровского металлургического института, Алмазьянском заводе ферросплавов.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники УССР, профессор, доктор технических наук С.И.Хитрик.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор А.С.Микулинский, кандидат технических наук В.А.Кравченко.

Ведущее предприятие - Никопольский завод ферросплавов.

Автореферат разослан "30" ИИ 1970 г.

Защита диссертации состоится ноябрь 30/11 1970 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней металлургического факультета Днепропетровского металлургического института (г.Днепропетровск, 5, пр.Гагарина, 4).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета,  
доцент, кандидат технических наук

О.ЕРЕСКОВСКИЙ



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО  
ЗНАМЕНИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инженер И.И.Барашкин

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ПРОЦЕССА  
ВЫПЛАВКИ 45%-НОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ В ЗАКРЫТЫХ  
ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

Специальность № 321  
Металлургия черных металлов

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

Днепропетровск  
1970

Центральная нау

1.

Программой создания материально-технической базы коммунизма в СССР предусмотрено значительное увеличение производства стали и сплавов и дальнейшее улучшение их качества. Высокие темпы роста производства стали и высокие требования к ее качеству требуют более быстрого развития ферросплавной промышленности, являющейся основой качественной металлургии.

Учитывая, что вопросы комплексной механизации и автоматизации производственных процессов, улучшения санитарно-гигиенических условий труда и устранения загрязнения воздушного бассейна могут быть кардинально решены лишь при укрытии электропечей сводами, было принято решение о строительстве в СССР закрытых электропечей большой мощности для выплавки ферросплавов. Основные элементы конструкции до пуска закрытых печей не были проверены в промышленных условиях в нашей стране, а известные из литературных источников зарубежные данные о выплавке ферросилиция в подобных агрегатах имели рекламный характер.

Освоение процесса выплавки ферросилиция в промышленном масштабе начали в закрытых печах типа ОКБ-613 мощностью 16,5 Мва. Первые кампании выплавки 45%-ного ферросилиция в закрытых печах показали, что шихта часто спекалась и зависала в загрузочных воронках, в газоходах и на колошнике отлагались и спекались в газонепроницаемую корку продукты возгонов. Температура и давление газа под сводом распределялись неравномерно, через загрузочные воронки выбивалось большое количество колошникового газа. Погружение электродов в шихте менялось часто в больших пределах. Расстройства хода печи носили затяжной характер, исправления поддавались чрезвычайно трудно. После продолжительных простоев шихта спекалась в воронках и на колошнике, что вызывало расстрой-

ства технологического процесса даже в нормально работающей до остановки печи. Корректировки состава шихты влияли на ход процесса с большим запозданием. Под действием высоких температур железобетонные своды, загрузочные воронки и шихтоспускные течи быстро приходили в негодность. Стойкость сводов, в лучшем случае, достигала двух месяцев, а воронки сгорали через несколько суток. Гирлянды короткой сети, расположенные над загрузочными воронками, окислялись под действием высоких температур выбивающихся из-под свода колошниковых газов. Срок службы гирлянд не превышал трех месяцев. Для ликвидации перечисленных неполадок, печи продолжительное время простаивали на ремонтах. Техничко-экономические показатели работы закрытых печей были неудовлетворительными.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке, исследованию и освоению процесса выплавки 45%-ного ферросилиция в закрытых электропечах. В работе были исследованы и разработаны следующие вопросы:

1. Условия работы, совершенствование и разработка отдельных узлов электропечей ОКБ-613 мощностью 16,5 Мва.
2. Строение ванн закрытых электропечей и механизм процесса выплавки 45%-ного ферросилиция.
3. Технологические особенности выплавки 45%-ного ферросилиция в закрытых электропечах.
4. Техничко-экономическая оценка получения 45%-ного ферросилиция в закрытых электропечах.

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ОКБ-613 МОЩНОСТЬЮ 16,5 Мва.

Для успешного освоения технологического процесса выплавки ферросилиция необходимо было иметь, прежде всего, надежную в работе конструкцию закрытой печи. Так как некоторые узлы электропечи ОКБ-613 оказались неработоспособными или несовершенными и печи продолжительное время простаивали (38,8% от календарного времени), то наряду с освоением технологии были изучены условия эксплуатации, разработаны и усовершенствованы свод, загрузочные воронки, короткая сеть, футеровка ванны, системы шихтподачи и газоочистки.

Освоение выплавки ферросилиция начали в печах, укрытых железобетонными сводами различных конструкций. Испытывались различные жароупорные бетоны на глиноземистом цементе, тонкомолотом шамоте и магнезите с шамотными заполнителями. Максимальная стойкость железобетонных сводов составила 65 суток. Разрушения на сводах были вызваны местными перегревами и носили характер оплавления поверхности, обращенной к колошнику печи. В результате эксплуатации железобетонных сводов была выявлена их непригодность в условиях выплавки ферросилиция.

Автором совместно с группой инженеров разработана и предложена конструкция плоского металлического водоохлаждаемого свода, которая была изготовлена и прошла успешные испытания на закрытой печи при выплавке ферросилиция. Стойкость такого свода составила более 2-х лет. Разработанная конструкция металлического водоохлаждаемого свода имеет ряд преимуществ перед желе-

зобетонными сводами. Она обеспечивает продолжительную эксплуатацию печей в закрытом режиме при выплавке всех марок ферросплавов. Конструкция проста по устройству, изготовлению и монтажу. Важной особенностью конструкции является взаимозаменяемость элементов. Плоская форма свода позволила применять для формирования подсводного пространства загрузочные воронки высотой до 400 мм и уменьшить длину электродов на 600–800 мм. Внедрение металлического водоохлаждаемого свода позволило успешно продолжить работы по освоению технологического процесса выплавки ферросилиция в закрытых печах. После положительных результатов испытания первого образца свода проектные институты без существенных изменений использовали его для укрытия ферросплавных печей на других заводах. В настоящее время все закрытые печи в нашей стране оборудованы металлическими водоохлаждаемыми сводами.

При освоении закрытых печей был использован опыт сооружения и пуска печей открытого типа, но вместе с этим было внесено ряд существенных изменений. Для сооружения печей ранее применялись необработанные углеродистые блоки. При строительстве закрытых печей ОКБ-613 были применены обработанные на заводе-изготовителе углеродистые блоки. Детали углеродистой футеровки унифицировали. Была предложена и внедрена конструкция футеровки летки, позволяющая удалить от летки швы между углеродистыми блоками стен, предупредить аварийные выходы металла из печи и продлить межремонтный период ванн.

Режим сушки и разогрева новой футеровки во многом определяет срок ее службы. При разогреве первых закрытых печей ОКБ-613 возникали значительные осложнения по коксованию электродов. Ха-

рактерной особенностью коксования электродов при пуске закрытых печей является то, что они нагреваются одинаково по всей длине ниже свода и в большей степени в районе загрузочных воронок, где они обильно омываются отходящими газами. Вследствие этого при коксовании длинных концов электродов, находящихся под сводом, вдоль кожуха с поверхности образовывалась корка скоксованной массы, в то время как по центру электрода по всей высоте масса находилась в жидком состоянии. Выход летучих веществ в этом случае при коксовании массы был затруднен. Кроме того, имела место значительная сегрегация компонентов массы. По этим причинам электроды получались пористыми, крошились или обрывались. В результате накопленного опыта был найден наиболее приемлемый метод коксования электродов, обеспечивающий успешный пуск печей. Сушку и разогрев футеровки, коксование электродов производили в зависимости от наличия дровами, коксом или газом. Продолжительность этой операции составляла 4 суток. За первые сутки температуру под сводом равномерно поднимали до 300–350°C, за вторые – до 650–700°C и дальнейший разогрев вели при этой температуре. К началу сушки футеровки концы электродов располагали на уровне загрузочных воронок. Начиная со вторых суток, электроды равномерно перепускали по 20–25 мм в час. Дальнейший разогрев футеровки и коксование электродов производили на ступени напряжения 132 в. Мощность печи поднималась постепенно до 3–4 Мвт и затем начиналась загрузка шихты. Уровень колошника поднимался постепенно, и печь переводилась в закрытый режим работы через 5–7 суток от начала загрузки шихты.

Во время капитальных ремонтов закрытых печей после 5–5,5 лет эксплуатации исследовали характер и степень износа футеровки.

Характер износа футеровки на обследованных печах был аналогичный. Верхний ряд углеродистых блоков подины по диаметру охвата электродов сработался на 200-300 мм. Магнетитовый кирпич на всей площади находился в спекшемся состоянии. Шамотный кирпич спекся на площади, соответствующей диаметру углеродистой футеровки. По центру ванны спеклось 5-6 рядов, а по периферии 1-2 ряда. Углеродистые блоки стен практически сохранились невредимыми, толщина стен уменьшилась на 10-20 мм. Блоки и масса в швах углеродистой футеровки прошли стадию графитации. Леточные и примыкающие к ним стеновые блоки практически изношены полностью. Кладка, примыкающая к стеновым блокам, спеклась на 1/3-1/4 часть длины кирпича. Кладка выше стеновых блоков сработалась на 100-500 мм. Толщина гарниссажа на уровне стеновых блоков против электродов составляла 400-500 мм. Полученные данные позволяют сделать вывод о целесообразности проводить капитальные ремонты печей ОКБ-613 с полной заменой футеровки на выплавке 45%-ного ферросилиция через 10 лет, а ремонты с частичной заменой футеровки - через пять лет.

Запроектированный токоподвод закрытых печей ОКБ-613 имеет существенные особенности. Однофазные печные трансформаторы располагаются на плавильной площадке вокруг печи по вершинам равнобедренного треугольника. Соединение трансформаторов в треугольник осуществлялось на кольце токоподвода. При пуске закрытых печей было выявлено, что гирлянды короткой сети, расположенные в непосредственной близости с электродами над загрузочными воронками, под действием высокой температуры пламени колошниковых газов быстро окисляются и приходят в негодность. Кроме того, коэффициент неравномерности нагрузки контактных щек составлял 3,9. Поэтому токоподводящие кольца из схемы убрали, а на участке от под-

вижных башмаков до контактных щек токоподвод выполняли из медных водоохлаждаемых труб. Расстояние от центра ванны до неподвижных башмаков на период освоения печей с железобетонными сводами выбрали равным 5740 мм, а затем с внедрением металлических водоохлаждаемых сводов уменьшили до 3750 мм. Разработали и внедрили фигурные подвижные башмаки, позволившие сблизить токовые трубы на башмаках до 370 мм. После проведенной модернизации коротких сетей и электродержателей индуктивное сопротивление печной установки снизилось до 0,994 ком,  $\cos \varphi$  повысился на 6,3%, а производительность печей возросла на 5,6%.

Для очистки газов ферросплавных печей от пыли были установлены газоочистки, состоящие из орошаемого водой скруббера, трубы-распылителя, пенного фильтра и каплеуловителя. Система состояла из двух параллельных линий, которые объединялись по чистому газу после каплеуловителей. Конструкция узла отбора газа из-под свода представляла собой неохлаждаемый стакан и наклонный газоотвод от стакана до скруббера. Песочный затвор между стаканом и крышкой не обеспечивал достаточной плотности, что приводило к подосу воздуха. Газ из печей отсасывался одной ниткой газоочистки от одной точки, поэтому давление под сводом распределялось неравномерно. Величина перепада давления составляла 1,0-2,0 мм вод.ст. Недостатки в конструкции газоочистки препятствовали освоению процесса выплавки ферросилиция в закрытых печах, поэтому в схему внесли ряд изменений. Все аппараты газоочистки установили около печи на отметке +5,4 м, а газодувки оставили на прежнем месте на отметке +13,0 м. Пенный фильтр был исключен из схемы газоочистки из-за малой эффективности очистки газа. Замена песочного затвора водяным на стакане газоотвода позволила полностью ликвидировать

подсос воздуха на этом участке и резко снизить простои печей для очистки газоотводов. Стаканы, крышки и наклонные газоотводы выполнили водоохлаждаемыми, стойкость этих деталей увеличилась в 6-7 раз и составляет 1,5-2 года. В газоотводах установили пленочное орошение для смывания отлагающейся из газа пыли. Для более плавного регулирования давления под сводом осуществили рециркуляцию чистого газа от газодувок в газопровод перед трубой-распылителем. Провели исследование эффективности работы газоочистки при различных расходах воды на орошение. На основании проведенной работы установили оптимальный расход воды на орошение газоотвода и скруббера  $35-40 \text{ м}^3/\text{час}$ , трубы-распылителя -  $2,3-2,5 \text{ м}^3/\text{час}$ . Давление воды необходимо поддерживать не менее 3,5 ат. В газоотводе и скруббере улавливается около 80% всей пыли, в трубе-распылителе степень очистки газа составляет 99,2-99,3%, а конечная запыленность газа составляет  $7-12 \text{ мг/м}^3$ . После проведенных исследований по очистке ферросплавный газ начали использовать как энергетическое топливо в котельной.

В процессе работы закрытых печей на бетонных сводах было разработано и испытано несколько типов загрузочных воронок из жаропрочной стали, жаростойкого бетона на жидком стекле и тонкомолотом магнезите с шамотным наполнителем, на высокоглиноземистом цементе. Высота загрузочных воронок составляла 800-1250 мм. Все испытанные воронки разрушались через 3-5 суток работы. После внедрения плоского металлического водоохлаждаемого свода за воронками сохранилась функция изоляции плит от токов шихты. Высоту воронок уменьшили до 400 мм. Разработали и испытали еще несколько видов воронок: армированные из жаропрочного бетона, наборные из доменного и высокоглиноземистого кирпича, охлаждаемые из жаропроч-

ного бетона со стальным и медным змеевиками, охлаждаемые с коробчатым каркасом. Лучшую стойкость (до 6 месяцев) показали водоохлаждаемые воронки. Расход воды на охлаждение воронок составляет  $39-44 \text{ м}^3/\text{час}$ , а тепловая нагрузка -  $224-238 \text{ тыс. ккал/час}$ .

При проектировании и строительстве первого цеха с закрытыми печами было предусмотрено порционное дозирование компонентов шихты и подача их из склада шихты в плавильный цех скиповыми подъемниками. В схеме подготовки и подачи шихты предусматривалась сушка коксика в сушильных барабанах и перемешивание составляющих компонентов в шихтосмесителях. Из печных бункеров шихта подавалась в загрузочные воронки по трем точкам вокруг каждого электрода периодически небольшими порциями. Принятая схема шихтоподдачи имеет ряд преимуществ, так как позволяет оперативно менять состав шихты, упрощается планировка плавильного цеха. Но вместе с этим в процессе эксплуатации схемы шихтоподдачи было выявлено ряд существенных недостатков и узлов несовершенной конструкции.

Проведенными исследованиями и анализом фактических данных выявлено, что содержание водорода в отходящем газе при использовании влажного кокса составляет 1-2%, так как влага из шихтовых материалов практически полностью удаляется в загрузочных воронках. По этим соображениям установленные сушильные барабаны для сушки коксика из схемы подготовки шихты были исключены. Шихтосмесители оказались в схеме излишними, так как при последующих перевалках по-прежнему наблюдалось расслоение компонентов шихты. Кроме этого, в них дополнительно измельчается кокс и количество фракции менее 5 мм увеличивалось на 5-7%. Провели исследования степени сегрегации шихты при различных способах разгрузки печных

бункеров, которые позволяют при выборе способа загрузки закрытых печей отдать предпочтение непрерывной загрузке шихты с постоянно заполненными течками и регулярной подпиткой печных бункеров небольшими порциями. Но по три течи для подачи шихты на каждый электрод оказалось недостаточно. Поэтому на каждый электрод для подачи шихты установили по 5 течек, расслоение компонентов при этом резко снизилось. Это позволило уменьшить высоту загрузочных воронок и сократить длину электродов.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ВАНН ЗАКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ МОЩНОСТЬЮ 16,5 Мва И МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ 45%-НОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ.

Обзор основных схем механизма восстановления кремнезема свидетельствует о сложности процесса получения ферросилиция. Большинство имеющихся данных получено в лабораторных условиях, которые недостаточно увязаны с физико-химическими превращениями шихтовых материалов в действующих электропечах. Обзор литературных данных также не дает четкого ответа о строении ванн печей, характере схода шихты и распределении температурных полей в ее объеме.

Учитывая это, были произведены замеры температуры шихты в загрузочных воронках и верхней части колошника до глубины 400-500 мм и установлено, что на температуру шихтовых материалов при прочих равных условиях влияет высота загрузочных воронок и давление газа под сводом печи. Оптимальным следует считать уровень заполнения воронок шихтой равный 450-500 мм, а давление газа под сводом в пределах 0,1-0,5 мм вод.ст. При этих условиях температура шихты на выходе из воронок не превышает 540°C.

На печах мощностью 16,5 Мва при диаметре загрузочных воро-

нок 1850 мм скорость схода шихты изменяется в пределах 0,4-1,7 м/час. Во время выпуска сплава из печи скорость схода шихты увеличивается до 1,7 м/час, а затем замедляется. Это объясняется оседанием колошника и колебанием погружения электродов в шихте в период между выпусками сплава. Щупы, установленные на колошник на расстоянии 500-600 мм от электродов, за 6 часов опустились всего лишь на 150-400 мм. На печах мощностью 16,5 Мва зона активного схода шихты составляет около 1850 мм, следовательно диаметр загрузочных воронок должен быть выбран в указанных пределах. Опробовали загрузочные воронки диаметром 2,0 м, работа печи при этом заметно изменилась. Вследствие медленного схода шихты по периферии ванны под сводом образовались ложные воронки из спекшейся шихты, газы поэтому выходили преимущественно через воронки вокруг электродов. При уменьшении диаметра воронок до 1850 мм работа печи нормализовалась. Были опробованы воронки диаметром 1650 мм. При смещении соосности электродов и воронок поступление шихты на колошник прекращалось, температура под сводом резко возрастала, подсводовое пространство и газоходы забивались пылью.

Методом зондирования рабочего пространства изучили особенности строения тиглей работающих закрытых печей. Установили, что хороший выход металла и шлака наблюдается при расстоянии рабочих концов электродов от подины 800-1000 мм, а приемлемая запыленность колошникового газа обеспечивается при слое шихты, перекрывающем газовые полости вокруг электродов, равном 600-800 мм. На основании исследования параметров газовых полостей рекомендовано для печей мощностью 16,5 Мва расстояние от подины до загрузочных воронок выбирать в пределах 2600-2800 мм.

Исследование физико-химических превращений шихтовых материа-



лов и строения ванн проводили на работающих и остановленных на капитальный ремонт закрытых печах. Для этих целей печи отключали без проплавления шихты, содержимое ванн охлаждали водой и рыхлили буро-взрывным способом. Такой способ разборки ванн позволил визуально проследить за их строением, сделать замеры рабочего пространства и отобрать пробы для анализов. Кроме этого, для изучения превращений шихтовых материалов пробы отбирали на работающих печах из загрузочных воронок и верхних горизонтов ванн. На основании изучения макростроения содержимого ванн, химического и петрографического анализов отобранных проб выделили следующие характерные зоны в ваннах ферросилициевых печей: зона активного схода шихты, дно тиглей, шлако-карбидная зона, гарниссаж стен, зона медленного схода шихты.

Процессы преобразования шихтовых материалов интенсивно протекают в зоне активного схода шихты. Особенностью работы закрытых печей является прежде всего то, что шихтовые материалы при загрузке в воронки вокруг электродов могут нагреваться и поступать на колошник с температурой до  $1000^{\circ}\text{C}$ . В верхних горизонтах колошника под влиянием температуры и газовой среды шихтовые материалы покрываются пленкой конденсатов, состоящих из продуктов распада и взаимодействия окиси кремния и окиси углерода. Куски кварцита растрескиваются и кварц в них превращается в кристобалит. Кокс с поверхности кусков превращается в карбид кремния. Стальная стружка превращается в корольки сплава, содержащего до 20% кремния. В стенках газовых полостей кварцит полностью расплавляется, а углерод кокса почти полностью превращается в карбид кремния. Благодаря высокой температуре в стенках газовых полостей вблизи электрических дуг протекают основные восстановительные процессы

между кремнеземистым расплавом и карбидом кремния, остатками углерода кокса и кремнием. Газообразные продукты реакции удаляются в более холодные верхние горизонты, где вступают в различные взаимодействия и образуют конденсаты. Кремний, образующийся в результате химических реакций, растворяется в низкопроцентном сплаве или стекает в горя ванну, где формируется 45%-ный ферросилиций. На подине ванны формируется шлакокарбидная зона, которая является основанием тиглей и фильтром для продуктов плавки, препятствующим выносу невосстановленных шихтовых материалов и улету окиси кремния во время выпуска сплава. Здесь окончательно формируется и скапливается сплав, шлак. Шихтовые материалы в зоне медленного схода шихты постепенно опускаются к стенкам газовых полостей и претерпевают описанные физико-химические превращения. Во вращающихся печах зона схода шихты значительно больше, чем в стационарных, так как шихта более равномерно прогревается по окружности ванны.

Получение ферросилиция представляет собой сложный ступенчатый процесс, включающий большое число различных физических и химических превращений шихтовых материалов с образованием таких промежуточных соединений, как окись кремния и карбид кремния. Изучение выломов из печей показывает, что чрезвычайно важным промежуточным соединением в механизме процесса выплавки ферросилиция является окись кремния, которая обладает довольно высокой упругостью пака и поэтому вступает в реакции в газообразном состоянии, являясь поставщиком кислорода к твердому углероду. Большое количество возгонов в подсводовом пространстве печи является результатом, прежде всего, проникновения части окиси кремния на поверхность колошника и ее распада. Такая же картина отложений

продуктов распада окиси кремния наблюдается и в гарниссаже и верхних слоях шихты. Окись кремния образуется главным образом по реакциям (1), (2), (3) (табл. I), а также в зоне электрических дуг — в процессе термической диссоциации кремнезема. Образовавшаяся окись кремния восстанавливается до кремния по реакциям (4) и (5). Вторым основным промежуточным продуктом, играющим большую роль в процессе получения ферросилиция, является карбид кремния. Изучение выломов из ванн печей показывает, что карбид кремния является неперменной фазой во всех горизонтах и во всех зонах, начиная от колошника и кончая шлаком. Образование карбида кремния может протекать по реакциям (6) — (9). Наиболее вероятной реакцией образования карбида кремния в верхних горизонтах ванны является реакция взаимодействия газообразной окиси кремния с углеродом кокса и

Таблица I

## Основные реакции в системе

№ п/п	Реакции	Уравнения изменения свободной энергии реакций, кал.
1.	$\text{SiO}_2(\tau) + \text{C}(\tau) = \text{SiO}(\tau) + \text{CO}(\tau)$	322400 - 158,06 Т
2.	$\text{SiO}_2(\tau) + \text{Si}(\text{ж}) = 2 \text{SiO}(\tau)$	121430 - 52,87 Т
3.	$2\text{SiO}_2(\text{ж}) + \text{SiC}(\tau) = 3\text{SiO}(\tau) + \text{CO}(\tau)$	338750 - 156,3 Т
4.	$\text{SiO}(\tau) + \text{C}(\tau) = \text{Si}(\text{ж}) + \text{CO}(\tau)$	37800 - 34,3 Т
5.	$\text{SiO}(\tau) + \text{SiC}(\tau) = 2\text{Si}(\text{ж}) + \text{CO}(\tau)$	35150 - 17,34 Т
6.	$\text{SiO}(\tau) + 2\text{C}(\tau) = \text{SiC}(\tau) + \text{CO}(\tau)$	-19550 - 0,42 Т
7.	$\text{SiO}_2(\tau) + 3\text{C}(\tau) = \text{SiC}(\tau) + 2\text{CO}(\tau)$	134070 - 87,33 Т
8.	$\text{Si}(\tau) + \text{C}(\tau) = \text{SiC}(\tau)$	-27350 - 8,88 Т
9.	$\text{SiO}(\tau) + 3\text{CO}(\tau) = \text{SiC}(\tau) + 2\text{CO}_2(\tau)$	-96260 - 81,1 Т
10.	$\text{SiC}(\tau) + \text{Fe}(\text{ж}) = \text{FeSi}(\text{ж}) + \text{C}(\tau)$	20485 - 9,87 Т
II.	$\text{SiO}_2(\text{ж}) + 2\text{SiC}(\tau) = 3\text{Si}(\text{ж}) + 2\text{CO}(\tau)$	222100 - 104,16 Т

сажистым углеродом. Подтверждением этому является то, что поры в кусочках кокса остаются не заполненными шлаком, а углерод в результате реакций превращается в карбид кремния. Реакция (7) не может получить большого развития, так как на поверхности контакта кусков кварцита и кокса появляются прослойки образовавшегося продукта и отлагается большое количество конденсатов, а возможности обновления контактов ограничены. Многочисленными исследованиями доказано, что разрушение карбида кремния железом начинается при  $1500^\circ\text{C}$  с образованием растворов кремния в железе и моносилицида железа по реакции (10), а также по реакциям (5), (II).

Исследования превращений шихтовых материалов в ваннах ферросилициевых печей показали, что газовая фаза играет существенную роль в процессе получения ферросилиция. Поэтому нужно создать такие условия для протекания физико-химических процессов, при которых бы меньше выносилось возгонов в подсводовое пространство. Для обеспечения хорошей фильтрации окиси кремния необходимо подобрать оптимальные технологические параметры ведения процесса вылавки ферросилиция.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ВЫПЛАВКИ 45%-НОГО ФЕРРОСИЛИЦИД В ЗАКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ.

Уже в начальный период освоения закрытых печей стало ясно, что технологический процесс выплавки ферросилиция значительно отличается от плавки в открытых печах, поэтому процесс плавки подвергли всестороннему изучению и глубокому анализу.

Одним из основных факторов, обеспечивающим успешную работу печи, является оптимально выбранное соотношение кокса и кварцита в шихте. Так как в подсводовом пространстве печи поддерживается

положительное давление, исключавшее подсос воздуха, то угар кокса в закрытой печи по сравнению с открытой протекает в меньшей степени. На основании анализа результатов работы печей и материального баланса установили, что избыток углерода в шихте против теоретически необходимого количества для восстановления кремнезема должен составлять около 2%. Для определения оптимального количества отходов графитации в шихте изучали влияние на ход технологического процесса выплавки 45%-ного ферросилиция в закрытых печах различных навесок отходов. Исследования показали, что при одинаковом электрическом режиме с увеличением количества отходов графитации в шихте для обеспечения достаточного погружения электродов необходимо уменьшить в составе шихты количество углерода, вносимого коксом. Допустимая запыленность отходящего газа ( $20-30 \text{ г/м}^3$ ), при которой не забивается подсводовое пространство возгонами, хороший сход шихты в загрузочных воронках и устойчивая посадка электродов достигаются при отношении углерода шихты к теоретически необходимому количеству выше 95%. При расходе отходов графитации 183 кг/т удельный расход электроэнергии снизился на 1,1%, кокса на 29%, кварцита на 9%. При более интенсивном использовании отходов графитации (до 300 кг/т) необходимо устанавливать электрический режим, соответствующий полезному фазному напряжению около 76 в. При подборе оптимального гранулометрического состава шихтовых материалов лучшие показатели работы печей достигаются при использовании овручского кварцита фракции  $20 + 65 \text{ мм}$  и коксика  $5-20 \text{ мм}$ .

Характер отсоса колошникового газа и пыли из-под свода в значительной степени влияют на ход технологического процесса. Поэтому была изучена зависимость состава, температуры и количе-

чества газа, выделяющегося через загрузочные воронки, от давления под сводом печи. Наиболее благоприятные условия для обслуживающего персонала, эксплуатации оборудования и ведения технологического процесса создаются при избыточном давлении под сводом  $0,1-0,5 \text{ мм вод.ст.}$  Температура отходящего газа при таких условиях не превышает  $650^\circ\text{C}$ , содержание окиси углерода составляет 85-87%. При отсосе газа из одной точки печи давление под сводом распределяется неравномерно, перепады в величинах давления достигают  $1-2 \text{ мм вод.ст.}$  После внедрения отсоса газа двумя нитками газоочистки одновременно из двух точек, расположенных под углом  $120^\circ$ , количество отсасываемого газа повысилось до 95%.

Для определения оптимального электрического режима производили замеры электрических параметров печной установки и обрабатывали показатели работы печи при выплавке 45%-ного ферросилиция. При этом установили зависимость удельного расхода электроэнергии от полезного напряжения. Минимальный удельный расход электроэнергии обеспечивается при полезном напряжении около 77 в., подсчитанном по показаниям счетчиков активной и реактивной электроэнергии. Минимальная себестоимость сплава в ценах 1966г. также соответствует минимальному удельному расходу электроэнергии.

#### ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЛУЧЕНИЯ 45%-НОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ В ЗАКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ.

Для более полной оценки процесса выплавки ферросилиция в закрытой печи составили материальный и тепловой балансы. Шихта состояла из кварцита, кокса и стальной стружки. Хотя балансы составляли в период освоения закрытых печей, однако полученные данные позволили установить распределение элементов между продуктами плав-

ки и оптимальный состав шихты. В период составления баланса отношение углерода кокса к теоретически необходимому углероду для восстановления кремнезема кварцита составило 0,996, при этом общие потери кремния составили 7,3%. Для обеспечения более полного восстановления кремнезема, жидкоподобного состава шлака, предупреждения чрезмерных потерь ферросилиция со шлаком и снижения расхода электродной массы количество восстановителя в шихте нужно рассчитывать на 2% больше теоретически необходимого количества для восстановления кремнезема кварцита. В шихту для открытой печи мощностью 16,5 Мва дает избыток углерода около 5%, а для печей меньшей мощности - до 10%. При сравнении расходных коэффициентов, полученных во время балансовых плавов, на закрытой печи с показателями производства 45%-ного ферросилиция в открытых печах одинаковой мощности установлено, что удельный расход кварцита и кокса оказался в ней меньше соответственно на 2,4% и 9,7%, а расход электроэнергии на 1,1% больше. При сравнении статей теплового баланса закрытой печи и открытой печи мощностью 11,4 Мва выявили, что потери тепла через свод на закрытой печи (4,3%) оказались близкими потерям тепла через колошник на открытых печах (4,41%). Тепловой КПД обеих типов печей находился на одном уровне (около 0,84).

В результате проделанной работы по совершенствованию конструкции закрытых печей (сводов, загрузочных воронок, коротких сетей, газоочисток, системы подачи шихты), а также по подбору оптимальных состава шихты и гранулометрического состава компонентов, газового и электрического режимов, размеров загрузочных воронок и уровня колошника, использованию в составе шихты отходов графитации электродного производства производительность закрытых

печей повысилась почти в 2 раза и достигнута проектная мощность. Сопоставляя достигнутые показатели работы открытых и закрытых печей Алмазьянского завода ферросплавов видно, что используемая мощность печей практически равная, но производительность закрытых печей на 1,2% ниже, а себестоимость на 0,88% выше, чем в открытых печах. Затраты на использованные шихтовые материалы и электроэнергию находятся на одном уровне. Если использовать 70% колошникового газа закрытых печей и производить очистку отходящего газа, то себестоимость 45%-ного ферросилиция, выплаваемого в закрытых печах, будет на 2,18% ниже, чем в открытых печах.

#### В ы в о д ы.

1. Проведена работа по совершенствованию конструкции первых закрытых печей ОКБ-613 мощностью 16,5 Мва, так как железобетонные своды, загрузочные воронки, короткие сети оказались нероботоспособными и сдерживали освоение технологического процесса выплавки ферросилиция. Разработан и внедрен металлический водоохлаждаемый свод плоской конструкции, стойкость которого составляет не менее двух лет. Срок службы предложенных загрузочных воронок составляет около 6 месяцев. Усовершенствованы короткие сети, схемы газоочистки и отсоса газа из-под свода, подготовки и загрузки шихты в печи, футеровка ванны. Разработан метод разогрева и пуска закрытых печей. Изменения конструкции отдельных элементов обеспечили устойчивую работу электропечей с закрытым колошником. Изучены особенности службы оборудования закрытых печей и определены оптимальные условия его эксплуатации.

2. На основе изучения скорости схода шихты, распределения температур в загрузочных воронках, строения ванн методом зондиро-

вания, состава проб шихты из верхней части ванны, выломки из остановленных печей, отложений пыли и шлаков представлен механизм процесса получения ферросилиция, определены рациональный уровень колошника и размеры загрузочных воронок.

3. Разработан, исследован и освоен процесс выплавки 45%-ного ферросилиция в закрытой печи. Выявлено влияние давления газа под сводом на его состав, электрического режима и состава шихты на технико-экономические показатели работы печей и установлены оптимальные их величины. Обобщены особенности ведения плавки в печах с закрытым колошником. Разработаны методы устранения расстройств технологического процесса.

4. В результате проделанной работы производительность закрытых печей повысилась почти в 2 раза и достигнута проектная мощность. Себестоимость одной тонны 45%-ного ферросилиция при использовании 70% колошникового газа будет на 2,18% ниже, чем в открытых печах. А производительность обеих типов печей после внедрения всех рекомендаций будет находиться на одном уровне.

5. Внедрение закрытых печей в качестве металлургических агрегатов в ферросплавной промышленности позволило комплексно механизировать и автоматизировать производственные процессы, улавливать, очищать и использовать колошниковые газы, значительно улучшить условия труда обслуживающего персонала и предотвратить загрязнение воздушного бассейна.

6. Изменения, внесенные в конструкции закрытых печей, и накопленный опыт по ведению технологического процесса выплавки 45%-ного ферросилиция использованы проектными институтами и родственными заводами при строительстве, пуске и эксплуатации подобных печных агрегатов.

Диссертационная работа изложена на 129 стр. машинописного текста, содержит 22 таблицы, 55 рисунков. В списке использованной литературы приведены 130 наименований.

Материалы диссертации доложены:

1. На Всесоюзном семинаре по совершенствованию процессов выплавки ферросплавов в закрытых печах, г.Кадиевка, 1968 г.

2. На Всесоюзном научно-техническом совещании по электротермии и электротермическому оборудованию, Тбилиси, 1968 г.

3. На Всесоюзном научно-техническом совещании по совершенствованию технологии и повышению качества ферросплавов, Никополь, 1969 г.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих изданиях:

1. Г.Ш.Микеладзе, Е.М.Надирадзе, Ш.С.Ихакадзе, Б.П.Гогоршвили, Г.А.Дгубуадзе, П.С.Солошенко, В.Е.Семенов, И.И.Барашкин, Ю.С.Ширяев, Ю.П.Поспелов, Л.С.Кацевич и В.Л.Розенберг. Промышленные опыты по выплавке 45%-ного ферросилиция в мощной закрытой электропечи, Сталь, 1965, № 5.

2. И.И.Барашкин, В.Е.Семенов, А.Г.Лихачев, И.П.Воропаев, В.П.Гладковский, С.А.Веселов. Усовершенствование конструкции закрытых печей и освоение выплавки ферросилиция. Черметинформация, 1969, серия 5, информац. № 2.

3. И.И.Барашкин, В.Е.Семенов, Ю.Ф.Лотц, В.А.Кислицин. Стойкость футеровки закрытых печей при выплавке ферросилиция. Бюллетень ЦНИИЧМ, 1968, № 24.

4. В.Т.Бабенко, И.И.Барашкин, И.П.Воропаев, Д.В.Гриценко, Д.Д.Желтов, М.Н.Кучеренко, Г.В.Майсак, Л.Ф.Пекарский, В.Е.Семе-

нов, П.С.Солошенко, И.И.Эльман-Шур. Водоохлаждаемый свод для руднотермических печей. Авторское свидетельство, № 216771, 20/XI-1963.

5. И.И.Барашкин, С.М.Белоконь, М.И.Гольцман, Л.С.Неустроев, В.Е.Семенов. Мокрая очистка отходящих газов закрытых ферросплавных печей. Черметинформация, 1967, серия 13, информ.№ 6.

6. Л.А.Мальцев, Н.Ф.Ахмедшин, А.А.Живичкина, Я.С.Щедровицкий. И.И.Барашкин, Л.Ф.Пекарский и В.Е.Семенов. Вторичный токоподвод закрытой ферросплавной печи. Сталь, 1965, № 12.

7. Л.А.Мальцев, Я.С.Щедровицкий, И.И.Барашкин, Л.Ф.Пекарский. Установление оптимального режима работы закрытых ферросилициевых печей. Теория и практика металлургии, 1966, выпуск 8, Южно-Уральское книжное издательство.

8. И.И.Барашкин, В.Е.Семенов, А.Г.Лихачев, С.А.Веселов. Выплавка 45%-ного ферросилиция в мощных закрытых электропечах с применением отходов графитации электродного производства. Сталь, 1968, № 6.

9. И.И.Барашкин, А.В.Горох, Р.Ф.Першина. О строении ванны закрытой печи и поведении шихтовых материалов при выплавке 45%-ного ферросилиция, Сталь, 1969, № 12.

10. А.В.Горох, Р.Ф.Першина, Я.С.Щедровицкий, Г.И.Соболев, М.С.Хрущев, Ю.С.Максимов, И.И.Барашкин. Вещественный состав шлаков при выплавке ферросилиция. Сталь, 1969, № 10.

Подписано к печати 22/12 = 70г. БТ-11793

Зах. №372 Тираж 220 Объем 1,25п.л.

Днепропетровск 1970г. Ротапринт ДМетИ