

ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический
университет"

Кафедра материаловедения и физики металлов

ЭЛЕКТРОПЛАВКА ЧУГУНА И СТАЛИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению лабораторных работ и выполнению
самостоятельной работы по дисциплине
“Производство отливок из чугуна и стали”
для студентов направления 150400.62 «Металлургия»,
профиля «Технология литейных процессов»
очной формы обучения
Часть 3



Воронеж 2014

Составитель канд. техн. наук Л.С. Печенкина

УДК 621.74

Электроплавка чугуна и стали: методические указания к проведению лабораторных работ и выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Производство отливок из чугуна и стали» для студентов направления 150400.62 «Металлургия», профиля «Технология литейных процессов» очной формы обучения. Ч. 3 / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. Л.С. Печенкина. Воронеж, 2014. 40 с.

В методических указаниях приведены описания лабораторных работ, отражающих основные группы процессов, протекающих в металлургических агрегатах, при плавке чугуна и стали, раскислении, модифицировании. Приведены краткие теоретические сведения и контрольные вопросы; даны объем, порядок выполнения работ, указания по составлению отчетов.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе Word 2003 и содержатся в файле Методичка (часть3).doc.

Предназначены для студентов четвёртого курса.

Табл. 2. Ил. 1. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. А.А. Лукин

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. А.Т. Косилов

Издаётся по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

©ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный
технический университет", 2014

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Плавка стали в дуговой электропечи

Цель работы. Ознакомиться с устройством, работой дуговых электропечей и изучить технологию электроплавки стали.

1. Общие сведения

Электросталеплавильный способ занимает ведущее положение в производстве качественной и высоколегированной стали [1]. Этим способом можно получать разнообразный по составу высококачественный металл с низким содержанием серы, фосфора, кислорода и других вредных или нежелательных примесей и с высоким содержанием легирующих элементов – хрома, никеля, марганца, кремния, ванадия, молибдена, вольфрама, титана и других элементов, придающих стали особые свойства.

1.1. Электрическая дуга как источник тепловой энергии

Электрическая энергия в дуговых печах трансформируется в тепловую в разрядном промежутке между торцом электрода и поверхностью металла. Электрическая цепь на этом участке замыкается дуговым разрядом.

Для возбуждения дуги концы электродов, к которым приложено напряжение, сначала приводят в соприкосновение, а затем разводят на некоторое расстояние. При разведении электродов в точках контакта повышаются сопротивление, количество выделяющегося на этом участке джоулева тепла и температура концов электродов.

Современные дуговые электропечные установки работают с источниками как постоянного, так и переменного тока. Род тока во многом определяет особенности дуги. У дуги постоянного тока один электрод постоянно является катодом,

второй – анодом. В цепи постоянного тока состояние дуги после ее возбуждения быстро стабилизируется.

Существенно изменяются условия горения дуги и ее характеристики при питании переменным током. В этом случае сила тока дуги и тепловое состояние газового промежутка изменяются непрерывно. В течение каждого периода электрод является поочередно то катодом, то анодом. Дуга горит прерывисто, неустойчиво.

Для питания промышленных дуговых печей, как правило, используют переменный ток, ввиду его более низкой стоимости и возможности передачи его на значительные расстояния со сравнительно небольшими потерями. Постоянный ток используют для питания дуговых печей лишь в исключительных случаях: при невозможности применения переменного тока, при невозможности обеспечения необходимого качества металла.

Неспокойная, прерывистая дуга в электропечах нежелательна, так как в этом случае мощность трансформатора используется не полностью, замедляется плавление металла, снижается производительность установки. Сталеплавильные дуговые электропечи являются печами прямого действия – дуга горит между электродом и поверхностью металла. В зависимости от периода плавки дуга горит между электродом и твердой холодной шихтой, электродом и прогретой твердой шихтой и, наконец, между электродом и поверхностью жидкой ванны. Наименее устойчивое горение дуги наблюдается в первом случае. По мере разогрева шихты и появления озера жидкого металла горение дуги становится более устойчивым. После полного расплавления металла горение дуги стабилизируется, паузы практически отсутствуют. Мерами повышения стабильности горения дуги являются: теплоизоляция зоны разряда, изменение условий ионизации газа в межэлектродном промежутке, включение в цепь дополнительной индуктивности (эта мера уменьшает $\cos \phi$ установки, поэтому пользоваться ею следует кратковременно).

Мощность, выделяющаяся в дуге, характеризуется произведением силы тока на падение напряжения в дуге:

$$P_{\partial} = IU_{\partial}.$$

В общем случае отвод тепла от дуги происходит теплопроводностью, излучением и конвекцией.

1.2. Рабочее пространство дуговых печей

В идеальном случае форма рабочего пространства должна обеспечивать минимум тепловых потерь, равномерную тепловую нагрузку всей поверхности огнеупорной футеровки и ее высокую стойкость, хорошие условия для протекания процессов между металлом и шлаком, позволять осуществлять завалку шихты в один прием при любой насыпной плотности лома. Все эти (противоречивые) требования выполнить одновременно полностью невозможно. Поэтому форму и размеры плавильного пространства выбирают такими, чтобы оптимально сочетались требования и технологии и теплообмена. На рис.1 представлен профиль рабочего пространства 100-т дуговой электропечи.

Размеры ванны должны быть такими, чтобы в неё можно было вместить необходимое количество жидких металла и шлака и чтобы при этом оставался еще небольшой (10-15 %) резерв объема, необходимый для кипения и перемешивания металла.

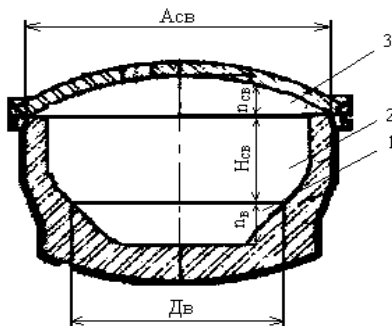


Рис.1. Профиль рабочего пространстве 100-т дуговой электропечи: 1-ванна; 2-свободное пространство; 3 - подсводовое пространство

1.3. Футеровка дуговых печей

Поскольку отдельные участки футеровки работают в разных условиях, следует рассматривать условия службы огнеупоров подины, откосов, стен и свода.

В течение длительного времени огнеупорная футеровка подины непосредственно контактирует с расплавленным металлом и шлаком. После выпуска плавки и при загрузке холодной шихты подина резко охлаждается. При загрузке шихты корзиной подина в целом испытывает механический удар, а поверхностный слой подины может разрушаться кусками скрапа. В период плавления при низком опускании электродов (при легковесной шихте) возможен перегрев и вымывание материала подины (образование ям).

При плавлении в окислительный период футеровка подины насыщается FeO . В восстановительный период оксиды железа переходят из футеровки в металл и шлак. При сливе и после слива металла футеровка подины непосредственно контактирует со шлаком и насыщается им. Еще в большей степени, чем подина, воздействию шлаков при высоких температурах подвержена футеровка откосов, являющихся вследствие этого наиболее слабым участком футеровки печей. Подина и откосы существенно влияют на ход процесса в сталеплавильной ванне: на состояние и активность шлака, на расход огнеупоров, шлакообразующих, электроэнергии. К футеровке подины и откосов предъявляется ряд требований: высокой огнеупорности, термостойкости, высокого сопротивления химическому и механическому воздействию металла и шлака.

Температурные условия работы внутренней поверхности стен особенно тяжелы: так, температура некоторых их участков может превысить огнеупорность материалов, а при открывании рабочего пространства и загрузке шихты стены быстро охлаждаются – скорость

изменения температуры внутренней поверхности стен может достигать 10000 °С / ч. Внутренняя поверхность стен должна иметь высокие огнеупорность, термостойкость, низкий коэффициент объемного расширения, высокий коэффициент температуропроводности, большое тепловое сопротивление. Особо тяжелые условия работы у нижнего пояса футеровки стен (300 – 400 мм), находящегося под прямым излучением дуг и воспринимающего нагрузку от верхних слоев кладки. Этот пояс должен изготавливаться из особо огнеупорных материалов и иметь достаточно большую толщину.

Свод является наименее долговечной частью футеровки дуговых печей, поскольку испытывает значительные температурные колебания, подплавление; работает в условиях постоянной сжимающей нагрузки от распора, снижающей температуру начала деформации свода. Имеет место и химическое взаимодействие на свод газовой атмосферы, содержащей активную пыль. Сводовые огнеупоры должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокую огнеупорность, термостойкость, химическую стойкость по отношению к плавильной пыли, большое тепловое и электрическое сопротивление.

Учитывая многообразие требований к футеровке различных элементов печи, ее изготавливают многослойной, с использованием разнообразных огнеупорных материалов. В зависимости от характера технологического процесса футеровку дуговых печей можно выполнять из кислых или основных огнеупорных материалов.

Для кислых печей используют кварцит и изделия из него (динас) с содержанием основного компонента (SiO_2) 95 – 97 %.

Для футеровки основных печей применяют изделия из магнезитового порошка с добавлением бедных хромистой и железной руд; иногда используют доломит. Высокоогнеупорные магнезит-хромовые изделия подразделяют на следующие марки: ПШСП – периклазошпинелидные магнезитохромитовые плотные с

тонкомолотой хромовой рудой в шихте; МХСП – магнетитохромитовые плотные с крупнозернистым хромом в шихте; ПШСО – периклазошпинелидные магнетитохромитовые обычные с тонкомолотой хромовой рудой в шихте; МХСО – магнетитохромитовые обычные с крупнозернистой хромовой рудой в шихте. Основная составляющая (65 – 70 %) этих изделий – оксид магния (периклаз). Содержание хромовой руды колеблется в пределах 5 – 18 %.

Кладку подин и откосов выполняют из магнетитовых (периклазовых) изделий огнеупорностью не менее 2000°C, изготавливаемых прессованием из обожженного до спекания магнетита. В зависимости от химического состава магнетитовые изделия бывают марок М-91 (магнетитовые изделия обычной плотности для кладки подин и откосов электросталеплавильных печей ниже уровня шлака), МП-91 (изделия плотные для кладки откосов в районе шлакового пояса), МП-89 (плотные изделия для кладки футеровки электропечей в исключительных случаях). Для тепловой изоляции подины и стен, а также для футеровки сливного желоба используют шамотный кирпич, имеющий низкую теплопроводность и высокую термостойкость. Шамотный кирпич нельзя использовать для рабочего слоя футеровки (из-за низкой огнеупорности, 1680 – 1730 °C), но можно широко использовать для футеровки сталеразливочных ковшей и припаса (вследствие высокой термостойкости). Для тепловой изоляции применяют также асбест, шамотный порошок и др.

Футеровка новой электропечи обычно 3-слойная, она состоит из верхнего набивного слоя, образующего после спекания монолитную массу; из кирпичной кладки – основания для набойки и теплоизоляционного слоя. В случае работы без набивного слоя толщина кирпичной кладки должна быть увеличена. На большинстве электропечей максимальная толщина футеровки подины равна максимальной глубине ванны. Футеровка стен также, как правило, 3-слойная (слои – изоляционный, арматурный, рабочий). Футеровка свода из

кирпича марок ПШСП и МХСП. Для увеличения стойкости футеровки отдельные её участки целесообразно выполнять из огнеупоров с особыми свойствами, в частности из плавленолитых огнеупоров.

В связи с высокими тепловыми нагрузками в современных электропечах (а также в связи с ограниченностью сырьевых ресурсов для производства высококачественных огнеупоров) применяют водяное охлаждение стен и сводов дуговых печей. Это позволяет существенно увеличить срок службы огнеупорной футеровки. Охлаждение осуществляют с помощью труб и холодильников разных типов.

1.4. Оборудование дуговых сталеплавильных электропечей

Дуговые печи даже одинаковой емкости часто имеют существенные различия, которые обусловлены:

- а) применением неодинаковых способов загрузки шихты;
- б) применением различных систем опор печи на фундамент;
- в) использованием различных способов открывания рабочего пространства для загрузки шихты;
- г) расположением и использованием разнотипных механизмов и др.

Существуют два способа загрузки лома: через рабочее окно мольдами (в старых цехах) и сверху через открытый свод загрузочными корзинами (бадьями). Последний способ имеет ряд преимуществ, поэтому все современные печи загружаются шихтой сверху. Они могут быть четырех типов: с выкатным корпусом, с откатным порталом, с отворачивающимся сводом, с наклоняющимся сводом. Наибольшее распространение получили печи с выкатным корпусом (серия ДСВ) и с поворотным сводом (серия ДСП). Отечественные дуговые сталеплавильные электропечи регламентируются по массе стали. Разработаны типовые дуговые электропечи массой от

0,5 до 100 т: ДСП - 0,5; ДСП - 1,5; ДСП - 3; ДСП - 6; ДСП - 12; ДСП - 25; ДСП - 50 ДСП - 100.

Корпус электропечи включает кожух, днище, сливной носок. Кожухи выполняют цилиндрическими, ступенчатыми, коническими и др. кожухи изготавливают сварными из листовой стали Ст. 3 толщиной от 16 до 40 мм. Днище чаще всего сферическое, но может быть и коническим. Рабочее окно делают таких размеров, чтобы было возможно через него вводить в печь мульдзу завалочной машины, извлекать из печи обломки электродов, производить горячий ремонт футеровки. Для сталевыпускного отверстия в стене печи делают вырез в виде прямоугольника 150 x 200 мм. К днищу печи могут быть приварены рельсы и зубчатые сегменты, прикрепляют сливной носок с желобом и насадкой. Для удержания кирпичной кладки свода применяют сводовое кольцо, входящее в песочный затвор (съёмный или совмещенный с кожухом).

Для удержания электродов на заданной высоте и для подвода к ним электрического тока применяют электродержатели. На печах средней емкости электрод зажимают в неподвижном корпусе колодками. Подвод тока к электродам обеспечивается контактными щеками из омедненной стали, меди, иногда из хромистой (1 % Cr) бронзы или латуни (80 % Cu, 20 % Zn). Для контакта медь-графит плотность тока не должна превышать $2,6 \text{ A} / \text{cm}^2$. Ток от кабелей к электродержателю подводится медными плоскими шинами (или трубошинами). Подъем электродов при завалке шихты, регулирование длины дуги осуществляют с помощью механизма подъема электродов.

Наклон печи в сторону сталевыпускного отверстия для слива металла и шлака в конце плавки и для наклона печи в сторону рабочей площадки при скачивании шлака осуществляется с помощью механизма наклона.

Поворот корпуса печи вокруг вертикальной оси осуществляется с помощью механизма поворота корпуса.

Кроме перечисленных в составе установки имеются механизм выката ванны (в печах ДСВ), механизмы подъема свода и отворота его.

Электрическое оборудование дуговых электропечей включает: электроды, исполнительные механизмы регуляторов мощности, понижающие трансформаторы с дросселями, короткую сеть, коммутационную, измерительную и защитную аппаратуру, провода высокого и низкого напряжения.

Для сталеплавильных дуговых электропечей применяют графитированные электроды круглого сечения [2]. Диаметр их определяется емкостью печи и мощностью трансформатора. Условия их работы исключительно тяжелые, поэтому они должны обладать высокими электропроводностью, прочностью, тугоплавкостью, стойкостью против окисления. Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяют изделия из углерода. Сырье для производства электродов – графит, антрацит, каменноугольный, паковый и нефтяной коксы. Исходные материалы дробят, прокаливают, измельчают, рассеивают, дозируют и смешивают со связующими (пек, смолы). Прессуют электроды выдавливанием через мундштук на мощных гидропрессах. Обжиг электродов без доступа воздуха проводят при 1250 – 1350 °С в течение 15 суток. Графитизацию производят в специальных электропечах пропусканием тока, при этом их температура поднимается до 2300 – 2800 °С (атмосферный углерод постепенно переходит в ориентированную кристаллическую форму – графит). После этого электроды подвергают механической обработке. В графитированных электродах зольность 0,1 – 0,5 %; содержание серы до 0,1 %. Их удельное электрическое сопротивление $(8 - 12) \cdot 10^{-10}$ Ом·см, допустимая плотность тока до 20 А / см².

1.5. Плавка стали в дуговых электропечах

а) Плавка в кислой электропечи [3].

Электропечи с кислой футеровкой емкостью 3 – 6 т являются основными плавильными агрегатами при производстве стального фасонного литья. По сравнению с основными электропечами они обладают существенными преимуществами: более высокой производительностью, меньшими эксплуатационными расходами, вследствие повышенной стойкости футеровки, меньшего расхода электродов и электроэнергии, снижения трудоемкости технологических операций (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные технико-экономические показатели дуговых электропечей ДС-5МТ с кислой и основной футеровкой (сталь 35 – 45Л, 35ГЛ, 40ХЛ и др. [4])

Показатель	Футеровка	
	Кислая	Основная
Стойкость футеровки, плавов	230	110
Масса плавки, т	7,1	6,3
Длительность плавки, мин	140	185
Производительность, т / ч	3,1	2,1
Расход электроэнергии, кВт·ч / т	585	670
Расход графитовых электродов, кг / т	6,2	7,4

Стоимость кислых огнеупоров, приходящихся на 1 т стали, примерно в 2,5 раза меньше, чем основных.

Кислые силикатные шлаки менее электропроводны, чем известковые основные, нагрев их ниже, что повышает стойкость футеровки.

Так как в кислых печах сера и фосфор практически не удаляются, то необходимо подбирать низкофосфористую и

низкосернистую шихту: обычно 40 – 60 % стального лома, до 50 % отходов производства (литники, скрап, бракованные отливки). При мягкой шихте (с низким содержанием углерода) добавляют 10 – 15 % чушкового чугуна. В качестве шлакообразующих применяют сухой формовочный песок, известь (известняк) и в небольшом количестве железную руду. Образующиеся при плавлении шихты окислы железа и марганца взаимодействуют с кремнеземом футеровки и образуют насыщенные кремнеземом железомарганцевые силикаты. Кремнезем вносится также пригаром формовочной смеси на отходах и песком. Для разжижения шлака и уменьшения в нем количества тяжелых окислов вводят известь. Конечный шлак имеет примерно следующий состав: 55 % SiO_2 ; 10 % CaO ; 10 % FeO ; 15 % MnO ; 5 % Al_2O_3 . Плавку в кислой дуговой электропечи проводят под одним шлаком, чаще методом переплава, реже с окислением. Основные периоды следующие:

1. Заправка печи после выпуска предыдущей плавки (5 – 10 мин).
2. Завалка шихты (5 – 10 мин).
3. Расплавление (70 – 120 мин в зависимости от мощности печного трансформатора).
4. Короткий окислительный период (10 – 15 мин при плавке с окислением).
5. Доводка по температуре и составу (20 – 40 мин).
6. Раскисление и выпуск плавки (5 – 10 мин).

Средняя продолжительность плавки в 5 т кислых дуговых электропечах колеблется от 130 до 180 мин.

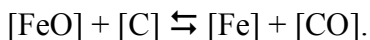
После выпуска предыдущей плавки из печи удаляются остатки шлака, а на поврежденные места забрасывают сухой кварцевый песок, смоченный жидким стеклом. Благодаря высокой температуре футеровки заправочный материал хорошо сваривается с ней.

После загрузки шихты для быстрого ее расплавления трансформатор включают на полную мощность, для чего первичные обмотки переключают на треугольник, повышая

вторичное напряжение до 220 – 260 В. Под действием высокой температуры дуг шихта под электродами плавится, жидкий металл стекает вниз, накапливаясь в центральной части подины. Электроды опускают вниз, в шихте проплавляются колодцы диаметром, на 30 – 40 % большим диаметра электрода. По мере плавления шихты и подъема уровня жидкого металла электроды поднимаются, так как автоматические регуляторы поддерживают длину дуг постоянной. Для ускорения плавления остатки шихты сталкивают с откосов под дуги. Для предохранения жидкого металла от окисления в печь для наведения шлака дают отработанную формовочную смесь, песок.

Плавка в дуговой электропечи обычно ведется методом переплава. Но при наличии легковесной, загрязненной шихты проводят короткий окислительный период с целью удаления из металла газов и вредных примесей. Для проведения окислительного периода шихту рассчитывают таким образом, чтобы по расплавлению содержание углерода в жидком металле было на 0,05 – 0,10 % выше заданного.

По расплавлении металла отбирают пробу на химанализ; на шлак дают железную руду и нагревают металл. По мере повышения температуры развивается реакция обезуглероживания и металл закипает.



По достижении содержания углерода несколько ниже заданного кипение ванны прекращают присадкой ферромарганца из расчета на среднее содержание и приступают к доводке металла по химсоставу и температуре. При этом печной трансформатор переключается с треугольника на звезду, вторичное напряжение уменьшается до 100 – 120 В.

На заключительном этапе плавки проводится конечное раскисление. В результате формируются неметаллические включения, природа и характер которых определяют качество

стали. Сталь обычного назначения раскисляют алюминием (1 кг / т), вводимым в виде чушек на шомполах в печь под шлак или в ковш. При комплексном раскислении алюминий вводят в печь, силикокальций – на струю металла, ферроцерий – в ковш.

б) Плавка в основной дуговой печи.

В основных печах выплавляют наиболее ответственные сорта конструкционных и специальных марок стали и сплавов. Главное преимущество основной футеровки – возможность проведения глубокой дефосфорации и десульфурации и возможность раскисления безжелезистыми ($\text{FeO} < 0,5 \%$) белыми шлаками.

В качестве шлакообразующих используется свежееобожженная известь (известняк), плавленый шпат, бой шамотного кирпича, кварцит или песок. Окислительные шлаки образуются в результате присадок железной руды или продувки металлической ванны техническим кислородом. Для восстановительных шлаков применяют порошки кокса, молотого ферросилиция и алюминия. В шлаки частично переходит окись магния из подины и откосов. Конечный шлак имеет примерно следующий состав: $\text{CaO}=45\text{--}55 \%$; $\text{SiO}_2=15\text{--}25 \%$; $\text{MgO}=8\text{--}12 \%$; $\text{Al}_2\text{O}_3=5\text{--}7 \%$; $\text{CaF}_2=8\text{--}12 \%$; $\text{MnO}\leq 1,0 \%$; $\text{FeO}\leq 1,0 \%$.

Сталь в основных печах выплавляют либо с полным окислением, либо методом переплава (сплавлением). Последний вариант плавки ведется следующим образом:

1. Заправка печи после выпуска предыдущей плавки.
2. Завалка шихты.
3. Плавление шихты.
4. Окислительный период, во время которого осуществляется дефосфорация, кипение и нагрев металла, и скачивание окислительного шлака.
5. Восстановительный период, во время которого происходит раскисление металла и шлака, десульфурация и доводка до заданного химического состава.
6. Конечное раскисление выпуск плавки.

В интенсификации плавки отдельные этапы плавки совмещаются по времени (плавление и дефосфорация). Некоторые этапы плавки протекают параллельно (раскисление, десульфурация и доводка по химическому составу).

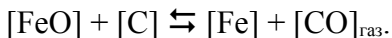
Метод окисления. При плавке с окислением шихты составляют из расчета получить после расплавления содержание углерода на 0,2 – 0,3 % выше верхнего предела в заданной марке стали. Для лучшей дефосфорации, которую начинают в процессе плавления, в завалку дают до 3 % извести (известняка) и 2 % железной руды. Перед расплавлением на шлак дополнительно дают порции известняка и железной руды. При наличии окислительного шлака с избытком извести фосфор окисляется закисью железа (до фосфорного ангидрида) и связывается в прочные соединения тетракальциевого фосфата.



Эта сильно экзотермическая реакция наиболее активно протекает в холодной ванне на поверхности контакта металл – шлак, и уже в конце плавления содержание P_2O_5 в шлаке поднимается до 1,5 %. При этом в шлак удаляется не менее 50 % находящегося в шихте фосфора. После полного расплавления шихты шлак (для удаления фосфора) частично скачивают, задают в печь известь и железную руду и приступают к окислительному процессу.

В процессе окисления ванны достигается дальнейшая дефосфорация, соответствующие состав и температура жидкой стали. Процесс окисления желателен вести с вспениванием шлака и непрерывным его сходом через порог рабочего окна в шлаковню. Для этого на шлак дают порции железной руды и производят быстрый нагрев металла. Интенсифицируют окислительный процесс вводом в металл газообразного кислорода через стальные футерованные трубы под давлением 210400 – 1013000 Па. При окислении газообразным кислородом скорость выгорания углерода возрастает до 1,5 %

в час, против 0,3 – 0,6 % в час при окислении железной рудой. По мере повышения температуры и окисленности металла ванна закипает:

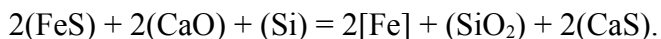
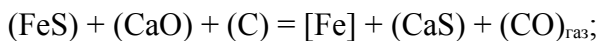


Пузырьки окиси углерода, проходя через шлак, вспенивают его. Для дальнейшей десульфурации металла в процессе кипения (при повышенной температуре процесса) необходимо непрерывное обновление шлака путем его самопроизвольного стекания в шлаковню и периодической присадки извести и железной руды. При этом успешно совмещаются реакции окисления углерода и фосфора. Содержание фосфора в конце окисления должно составлять не более 0,02 %.

Окислительный процесс оканчивают при хорошо нагретом металле и содержании углерода, обеспечивающем попадание в заданный анализ с учетом присадки ферросплавов в восстановительный период. Окислительный шлак во избежание рефосфорации тщательно скачивают сначала самотеком, а затем деревянными скребками.

Восстановительный период плавки предусматривает максимальную десульфурацию стали, доведение ее по составу и температуре и рациональное конечное раскисление для получения заданных свойств стали.

Восстановительный шлак наводится из извести, плавленого шпата и боя шамота (или песка) в соотношении 5:1:1. По расплавлении шпата шлак обрабатывается (раскисляется) порошками молотого 75 %-ного ферросилиция и кокса (по 5 кг / т каждого). Количество шлака составляет 3 – 5 % к массе металла. По мере уменьшения закиси железа в шлаке протекает активная диффузия кислорода и серы из металлической в шлаковую ванну. Процесс диффузионного раскисления и десульфурации протекает одновременно по реакции



Эти реакции необратимы, так как окись углерода улетучивается, а кремнезем в основном шлаке связывается в силикаты кальция. Для ускорения восстановительного периода диффузионное раскисление сочетают с осадочным. Для этого в начале восстановительной операции в металл присаживают алюминий или другие сильные раскислители, которые способствуют удалению кислорода из металлической ванны (до 80 %), быстрому наведению безжелезистого белого шлака и тем самым ускоряют десульфурацию стали.

Одновременно с раскислением и десульфурацией в восстановительный период доводят сталь до заданного химического состава присадками соответствующих ферросплавов; феррохром, ферромарганец и ферровольфрам в нагретом состоянии вводят в металл в начале восстановительного периода, а легкоокисляющиеся ванадий и титан – в конце перед выпуском плавки. Никель и молибден практически не окисляются, и поэтому первый дают в завалку, а второй вводят в металл в окислительный период.

При наличии белого шлака (на воздухе рассыпается в порошок), содержащего не более 1 % FeO, и необходимой температуры жидкой стали проводят конечное раскисление алюминием, и плавку выпускают из электропечи. Длительность восстановительного периода для разных марок стали в зависимости от емкости печи составляет 30 – 120 мин. При совместном сливе металла с белым шлаком и интенсивном их перемешивании в ковше дополнительно удаляется до 50 % содержащейся в стали серы.

Еще больший эффект рафинирования достигается при обработке стали в ковше синтетическим шлаком. В этом случае после скачивания окислительного шлака проводят короткий восстановительный период в основном с целью доводки металла до заданного химического состава, а

операции рафинирования переносят в ковш. Высокоосновной, безжелезистый синтетический шлак состава примерно 53 – 55 % CaO и 43 – 45 % Al₂O₃ выплавляют в отдельной шлакоплавильной печи, футерованной угольными блоками. Шлак в количестве 5 – 6 % от веса металла сливают в ковш и подают под сталеплавильную печь, из которой сталь выливают мощной струей с высоты 3 – 4 м. Синтетический шлак разбивается на мелкие капли и эмульгируется в металл, благодаря чему площадь контакта металл – шлак резко возрастает (до 100 м² / т против 0,3 – 0,7 м² / т в дуговой электропечи), и процессы раскисления и десульфурации протекают значительно быстрее и полнее, чем при диффузионном раскислении в дуговой электропечи. Коэффициент распределения серы между металлом и шлаком ($\eta_s = \frac{(S)}{[S]}$) при такой обработке достигает 100 – 200; при

рафинировании восстановительным шлаком он не превышает 30 – 50. В течение 1 – 3 мин независимо от исходной концентрации содержание серы в стали снижается до 0,005 – 0,010 %, а кислорода до 0,003 – 0,004 %. Длительность восстановительного периода резко сокращается, и производительность электропечей увеличивается на 15 – 20 % при экономии электроэнергии около 100 кВт·ч / т.

Метод переплава. Этим методом выплавляют преимущественно легированные и высоколегированные стали и сплавы для максимального использования легирующих элементов, содержащихся в шихте. Количество легированных отходов в шихте может достигать 100 %. Шихта должна быть чистой по фосфору и не окисленной.

Плавку ведут без окисления или же с частичным окислением металлической ванны кислородом. В последнем случае после короткой (10 – 15 мин) продувки ванны кислородом и получения углерода на нижнем пределе марочного содержания производят диффузионное раскисление шлака с целью восстановления из него окислов марганца, хрома, вольфрама или ванадия. Шлак раскисляют порошками

75 %-ного ферросилиция, силикохрома и в отдельных случаях алюминия (для высокохромистых сплавов). Рафинировку стали проводят обычным способом, как при плавке с окислением.

2. Техника безопасности при выполнении работы

2.1. К выполнению работ не допускаются лица без предварительной сдачи правил техники безопасности и не прошедшие инструктаж по конкретно выполняемой работе.

2.2. Во время работы печи нельзя заходить за ограничения короткой сети. Перед подъемом на площадку свода печи для осмотра механизмов зажима электродов необходимо отключать напряжение и принимать меры, исключающие возможность случайной подачи напряжения.

2.3. В процессе плавления шихты нельзя находится вблизи рабочего окна печи, так как возможны случаи обвалов и выбросов металла и шлака из печи.

2.4. Во время продувки ванны кислородом, вводимым через рабочее окно, необходимо находиться за предохранительным щитом.

2.5. При выполнении операций удаления из печи шлака, перемешивании металла скребками, отборе проб металла и шлака, разделки сталевыпускного отверстия необходимо пользоваться защитными очками и предохранять лицо от излучения и брызг металла и шлака.

2.6. При выпуске плавки и наполнении сталеразливочного ковша металлом находиться на безопасном расстоянии, исключающем попадание на одежду и открытые участки тела брызг металла и искр.

2.7. Запрещается самовольное вмешательство в производственный процесс, выполнение операций не предусмотренных порядком выполнения настоящей работы. Выполнение всех указаний цехового руководителя работы обязательно.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе на дуговой электропечи в условиях литейного цеха.

3.2. Ознакомиться с устройством дуговой электропечи.

3.3. Ознакомиться с шихтовыми и шлакообразующими материалами. Записать состав шихты.

3.4. Провести хронометраж плавки. Данные замеров занести в табл. 2.

3.5. По данным хронометража сделать анализ технологичности плавки, отметить недостатки и дать свои предложения по совершенствованию технологии.

Таблица 2

Хронометраж плавки

Время, ч (мин)	Технологические операции, отбор проб, вид и количество присаживаемых материалов	Электрический режим			Химический состав, %				
		I, A	U, B	cos φ	C	Si	Mn	P	S

4. Содержание и оформление отчета

4.1. Привести основные правила техники безопасности при работе на дуговой электропечи.

4.2. Дать эскиз дуговой электропечи с основными элементами ее конструкции и описание работы печи.

4.3. Привести расчет шихты для получения заданной марки стали.

4.4. Дать описание технологического процесса плавки стали заданной марки в дуговой электропечи с подробным хронометражем технологических операций и электрического режима (таблица 2).

4.5. Указать типаж применяемых дуговых электропечей с их основными техническими характеристиками.

4.6. Указать использованную производственную документацию и отразить ее краткое содержание.

4.7. Сделать выводы о проведенной работе.

Контрольные вопросы

1. Назовите существующие разновидности электрических печей и перечислите основные механизмы электродуговых печей.

2. Укажите механизмы для зажима электродов на дуговых печах.

3. Расскажите, как устроены и работают основные механизмы печи.

4 Опишите, как осуществляется загрузка электродуговых печей.

5. Расскажите, каков состав, технология изготовления и свойства электродов.

6. Перечислите и охарактеризуйте компонента шихты для электродуговой плавки.

7. Укажите назначение, состав, основные свойства и типы огнеупорной футеровки электродуговых печей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Влияние химического состава и скорости охлаждения на твердость чугуновых отливок

Цель работы:

1. Ознакомиться с технологией плавки серого чугуна (СЧ) в индукционной тигельной печи.
2. Изучить влияние перегрева и изотермической выдержки жидкого металла на изменение его химического состава.
3. Определить угар элементов при легировании в печи.
4. Определить содержание кремния в готовой отливке.
5. Определить твердость отливок.

1. Общие сведения

1.1. Индукционная тигельная печь как агрегат для плавки чугуна

Плавка чугуна в индукционных тигельных печах (ИТП) по сравнению с плавкой в вагранках или в электродуговых печах имеет ряд преимуществ. К ним относятся:

- более низкая стоимость металлошихты, в которой дорогие чушковые чугуны частично или полностью заменяются стальным ломом и ферросплавами;
- минимальный расход дефицитного литейного кокса (используется только мелочь для науглероживания);
- минимальный угар элементов, особенно для простых или низколегированных СЧ;
- низкий уровень выделения пыли и газов, нет необходимости в газоочистке;
- высокие скорости нагрева жидкого металла - $5 - 15^{\circ}\text{C}/\text{мин}$;
- при низком расходе электроэнергии (перегрев на 100°C - $50 - 60 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$)

- высокие физико-механические свойства металла, что позволяет получать чугун, высоких марок, например, СЧ 40-45 без легирования и отливать детали с толщиной стенок на нижнем пределе допусков;

- низкий уровень шума при работе.

ИТП довольно легко вписываются в плавильные отделения работающих литейных цехов. В последние годы их все чаще используют как вторичный агрегат в дуплекс-процессах для гомогенизации и быстрого нагрева жидкого чугуна. В ИТП возможно проведение десульфурации как с основной, так и с кислой (нейтральной) футеровкой [5].

Широкое внедрение ИТП в промышленности сдерживается из-за сложности и сравнительно высокой стоимости электрооборудования. К недостаткам ИТП относится также низкий тепловой КПД при нагреве и плавлении твердой шихты, (до 30%), что влечет за собой повышенный расход электроэнергии (480-620 кВт·ч/т) и низкую производительность печи в этот период плавки.

1.2. Подготовка к плавке

Перед плавкой необходимо рассчитать и подготовить шихту. В качестве металлошихты для индукционной плавки можно применять чушковые чугуны, стальной и чугунный лом, возврат, стальную и чугунную стружку, тонколистовую стальную обрезь и высечку, ферросплавы.

После расчета все компоненты шихты взвешиваются на весах, причем ферросплавы необходимо размельчить до фракции 20-40 мм. В промышленности для удаления влаги, эмульсии и масел с металлошихты используют ее подогрев до 400 - 800⁰С или обработку на специальных центрифугах и мойках с последующим подогревом. В лабораторных условиях достаточно визуального осмотра, удаления механических примесей с поверхности металлошихты и отсортировки очень окисленных и загрязненных кусков.

Перед загрузкой необходимо осмотреть тигель. Небольшие трещины и осыпи замазываются специальным огнеупорным составом (для кислой футеровки-96-97% кварцевого песка, 3-4% каолиновой глины, 2,0-2,5% сверх 100% - жидкое стекло). Перед загрузкой шихты в тигель нужно проверить подачу воды для охлаждения индуктора.

Загрузку шихты в тигель можно вести по двум схемам в зависимости от ее фракции. При наличии разнофракционной шихты на дно тигля слоем 3-5см укладывается мелочь, ферросплавы и карбюризаторы (науглероживатели). Более крупные и тугоплав-кие куски укладываются ближе к внутренней поверхности тигля. Середина тигля заполняется мелочью.

При использовании чушкового чугуна, а также крупных болванок они помещаются на подстилающий слой мелочи, как и в первом случае, причем возможно ближе к внутренней поверхности тигля. Остаток мелочи засыпается в промежутки между крупными кусками шихты.

Плотность магнитного потока, а следовательно величина и плотность вихревых токов, возбуждаемых в металлошихте наиболее высока у индуктора, т.е. у внутренней поверхности тигля в его центральной части. В середине тигля плотность магнитного потока минимальна. Плотность магнитного потока резко падает в воздушных промежутках, так как магнитная проницаемость воздуха в десятки раз ниже, чем металлошихты. Поэтому во всех случаях для сокращения периода плавления шихту необходимо укладывать как можно плотнее.

После загрузки металлошихты тигель накрывается крышкой и на печь надвигается кожух вытяжной вентиляционной системы.

1.3. Плавка

Перед включением печи необходимо убедиться что охлаждающая вода подается на индуктор, конденсаторные батареи и генератор. Включать и управлять печью разрешается только плавильщику!

Плавление шихты нужно вести при максимальной электрической нагрузке. Для повышения КПД необходимо поддерживать коэффициент плавильной установки близким к 1, что практически достигается включением и отключением дополнительных емкостей конденсаторов.

В период плавления необходимо следить, чтобы в тигле не образовались «мосты» и настыли, так как жидкий металл под ними быстро перегревается и может разрезать футеровку. Поэтому, особенно при использовании стального лома, склонного к свариванию и образованию «мостов», шихту в период плавления нужно осаживать легкими ударами лома или пики с изолированными рукоятками.

Измерение температуры жидкого металла в печи производится платино-платинородиевой термопарой погружения, показывавший прибор милливольтметр М-63, или КСП-3 с градуировкой ПП.

Присадку металлошихты и ферросплавов для корректировки химического состава, легирования и модифицирования жидкого металла производить мелкими порциями, во избежание резкого охлаждения металла и выбросов.

Стальной лом и чугунные чушки присаживать только в подогретом виде. Нагрев производить в печи сопротивления до температуры 700-800° С.

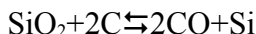
В процессе нагрева твердой шихты плавления и перегрева жидкого металла его химический состав меняется.

Угар элементов тем больше, чем мельче и окисленнее шихта, длительнее нагрев и плавление, интенсивнее электродинамическое перемешивание которое увеличивается с увеличением подводимой мощности.

Перемешивание с одной стороны обеспечивает выравнивание химического состава и температуры металла во всем объеме тигля, улучшает дегазацию и рафинирование металлов от неметаллических включений за счет их выноса на поверхность расплава. С другой стороны активное перемешивание при длительной выдержке (30 - 60 мин) в сочетании с высокотемпературным нагревом способствует насыщению металла газами, главным образом водородом и кислородом [6,7]. Кроме того, в результате перемешивания поверхность жидкого металла становится выпуклой и оголяется, так как шлак скатывается к стенкам тигля, образуя на них настывы - "воротник" или разъедает футеровку. Это затрудняет наводку шлака и усвоение ферросплавов малого удельного веса.

В промышленных печах интенсивность перемешивания регулируется отключением верхних витков индуктора. В лабораторной печи ИСТ-0,06 интенсивность перемешивания регулируется только величиной подводимой мощности.

В режиме выдержки при температурах более 1400-1450°C возможно восстановление кремния из кислой футеровки за счет углерода



Этот процесс протекает тем интенсивнее, чем выше температура и содержание углерода и ниже содержание кремния. Однако на практике кремний-восстановительный процесс подавляется окислением и угар кремния даже в кислых ИТП составляет 10-15%.

Угар элементов в периоды плавления, выдержки и перегрева можно определять по формуле (1)

$$U = \frac{E_{\text{нач}} - E_{\text{кон}}}{E_{\text{нач}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где U - угар элемента, %

$E_{\text{нач}}$, $E_{\text{кон}}$ - концентрации элемента вначале выдержки (в шихте) и в конце выдержки (после расплавления), %.

Общий угар элементов при плавке чугуна в ИТП ниже, чем в других плавильных агрегатах и его значение не превышает 3% при плавке на кусковой шихте, против 3-10 % угара в вагранках и 2-5 % в электродуговой печи. Значительно ниже и газонасыщенность металла: 5-11 см³ /100 г против 9-15 см³ / 100 г в чугунах вагранок с подогревом дутья и 20-28 см³ при холодном дутье.

2.4. Легирование серого чугуна

Легирование серого чугуна в ИТП повышает точность химического состава, придает отливкам различные специальные свойства, например, износостойкость, антифрикционные свойства и т.д. позволяет при плавке с "болотом" - жидким остатком предыдущей плавки, получать порции легированных в разной степени чугунов.

Расход ферросплава на легирование можно определить по формуле (2).

$$g_{\text{фсп}} = \frac{M([E]_{\text{к}} - [E]_{\text{осм}})}{[E]_{\text{фсп}}} \cdot \frac{100}{100 - U} \quad (2)$$

где $g_{\text{фсп}}$ - масса ферросплава, кг;

M - масса жидкого металла в печи, кг,

$[E]_{\text{к}}$, $[E]_{\text{осм}}$, $[E]_{\text{фсп}}$ - содержание легирующего элемента в готовом металле, до легирования и в ферросплаве;

U - угар легирующего элемента, %.

Разность $100-U$ можно считать коэффициентом усвоения легирующего компонента η_E . Он тем выше, чем выше температура и интенсивность перемешивания металла и меньше размер кусков ферросплава. Наибольшая усваиваемость при размере кусков 1-4мм. При плавке в ИТП первые два требования легко выполняются.

Зная содержание легирующего элемента в ферросплаве, концентрацию его в металле до и после легирования, а также массы ферросплава и жидкого металла в печи, легко, преобразуя формулу (2), определить усвоение и угар легирующего элемента

$$\eta_E = 100 - U = \frac{M([E]_K - [E]_{ocm})}{g_{\phi cn} [E]_{\phi cn}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$U = 100 \cdot \left[1 - \frac{M([E]_K - [E]_{ocm})}{g_{\phi cn} [E]_{\phi cn}} \right] \quad (4)$$

Перемешивание металла в тигле, его перегрев и выдержка при высоких температурах воздействуют на жидкое состояние чугуна, которое характеризуется газонасыщенностью, наличием неметаллических включений и примесей. Низкая газонасыщенность и рафинирование металла в результате умеренного перемешивания, а также воздействие высокотемпературной выдержки, приводит к уменьшению центров кристаллизации и графитизации в чугунах индукционной плавки, обуславливает большую величину переохлаждения их при кристаллизации. Величина переохлаждения чугунов индукционной плавки на 40-50° С выше, чем у ваграночных и достигает 170°С.

Поэтому немодифицированные чугуны индукционной плавки склонны к образованию структурно-свободного цементита, увеличению связанного углерода, измельчению графита и образованию междендритного графита. Образование структурно-свободного цементита выявляется в виде «отбела», который хорошо виден на изломах клиновых проб.

Таким образом, термовременная обработка чугунов индукционной плавки без модифицирования может отрицательно повлиять на их механические свойства. В то же время, если отбел минимален и междендритный графит

отсутствует (а это возможно при максимальных для данных условий значений углеродного эквивалента), то измельчение и уменьшение разветвленности графита и перлитизация матрицы благоприятно сказывается на механических свойствах чугуна.

Вопрос об усадочности чугуна индукционной плавки по сравнению, например, с ваграночным остается неясным. Однако следует учитывать, что склонность чугунов индукционной плавки к отбелу увеличивает объем концентрированных усадочных раковин и может вызвать при определенных условиях образование трещин в результате значительных термических напряжений.

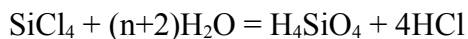
2.5. Определение кремния

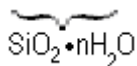
Содержание Si в сталях составляет 0,1 – 1%, в чугунах 0,1 – 4%. Кремний склонен к образованию поликремниевых кислот, имеющих коллоидный характер, а также комплексных ионов сложного состава. Эти свойства могут быть использованы в аналитических целях. В анализе чаще всего применяют гравиметрический метод определения Si, основанный на выделении кремниевой кислоты.

При растворении навески связанный кремний под действием кислоты (HCl, H₂SO₄, HNO₃, HClO₄) переходит в кремниевую кислоту, образующую осадок (силикогель) и частично коллоидный раствор (силикозоль). Процесс протекает стадийно. Сначала образуются летучие соединения кремния (SiCl₄, SiHCl₃):

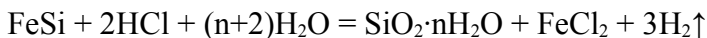


они подвергаются гидролизу с образованием ортокремниевой кислоты:

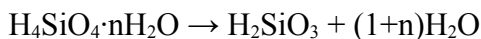




Общая реакция:



Перевод всей кремниевой кислоты в нерастворимое состояние достигается её обезвоживанием при 130-150 °С:



При более высоких температурах метакремниевая кислота переходит в диоксид кремния:



Обезвоживание кремниевой кислоты при температуре не более 150 °С изменяет её коллоидную структуру, делая осадок компактным и доступным промыванию, менее загрязненным посторонними элементами.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Рассчитать шихту для плавки чугуна. Химический состав чугуна задается преподавателем. Масса металла 25-30 кг.

2.2. Взвесить на аналитических весах навеску 0,5-1 г исследуемого металла.

2.3. Растворение навески в стакане в смеси кислот $V = 30-50 \text{ см}^3$. Состав $\text{H}_2\text{SO}_4 - 2$ части ($\rho = 1,3$), $\text{HNO}_3 - 1,5$ части, при нагревании до белых паров SO_3 и дополнительно ещё 2-3 минуты. По окончании растворения навески добавляем 6-10 $\text{см}^3 \text{ HNO}_3$ ($\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$).

2.4. Растворение солей Cr^{3+} , Fe^{3+} и др. и обезвоживание кремниевой кислоты. Доливаем 15 $\text{см}^3 \text{ HCl}$ ($\rho = 1,19 \text{ г/см}^3$) после охлаждения стакана, перемешиваем, затем доливаем 60-

120 см³ горячей воды. Накрываем чашку стеклом и нагреваем до полного растворения и ещё кипятим 4-6 мин.

2.5. Отделение осадка через фильтр ‘белая лента’.

2.6. Промывание осадка HCl (1:10) горячей! до отрицательной реакции на Fe (проба с 5% KSCN). Затем промыть 2-3 раза горячей водой.

2.7. Прокаливание осадка при 1000-1100 °С в течении 30 мин.

2.8. После охлаждения взвесить тигель с осадком.

2.9. Рассчитать содержание Si (%) в отливке по формуле

$$m_{Si} = \frac{m_{SiO_2}}{a} \cdot 0,4672 \cdot 100$$

где a – масса навески;

m_{SiO_2} – масса осадка.

0,4672 – коэффициент пересчета SiO₂ в Si.

2.10. Определить по номограмме твердость при полученном содержании кремния, указанных преподавателем условиях получения отливок и сравнить ее с экспериментальными данными.

3. Содержание и оформление отчета

3.1. Дать краткое описание технологии плавки чугуна в ИТП.

3.2. Привести расчет массы легирующей добавки из условия введения в металл 0,7 – 2 % легирующего элемента.

3.3. Указать порядок и результаты определения кремния в готовой отливке, полученную твердость.

3.4. Сделать выводы о проведенной работе.

Контрольные вопросы

1. Значение плавки чугуна в ИТП.
2. Как объяснить возможность получения в ИТП чугунов высших марок без легирования?
3. Каковы удельные расходы электроэнергии на нагрев и плавление шихты, перегрев и изотермическую выдержку.
4. Каков порядок загрузки металлической шихты в тигель?
5. Поясните возможность протекания кремний восстановительного процесса.
6. Возможности легирования чугуна в ИТП.
7. Почему не модифицированные СЧ индукционной плавки склонны к отбелу?

Плавка стали в вакуумной индукционной печи

Цель работы. Ознакомится с устройством, работой вакуумной индукционной печи и с технологией плавки стали в ней.

1. Общие сведения

1.1. Получение и измерение вакуума в литейном производстве

С целью повышения качества стали в сталеплавильном производстве применяют обработку металлических расплавов вакуумом[2]. Основная характеристика вакуума-остаточное давление в системе. Условно различают низкий (100 Па) , средний (100-0.1 Па) , высокий (0.1-0.0001 Па) , сверхвысокий (<0.0001 Па) вакуум. В вакуумных установках для выплавки и обработки стали применяют низкий, средний, и высокий вакуум.

Основными элементами любой вакуумной установки, кроме рабочей камеры, в которой создают разрежение, являются насосы для эвакуации газов и приборы для измерения остаточного давления.

Важнейшими характеристиками вакуумных насосов являются:

- Быстрота действия, (скорость откачки), определяемая объемом газа, проходящим через сечение впускного патрубка при данном давлении.
- Начальное давление, т.е. впускное давление, начиная с которого насос начинает нормально работать.
- Максимальное впускное давление, т.е. предельное давление на стороне впускного патрубка насоса, превышение которого приводит к возрастанию давления на стороне впускного патрубка.
- Предельный вакуум, т.е. минимальное давление, которое может быть достигнуто данным насосом.

В металлургической практике получили распространение насосы:

а) механические с вращающимся ротором, действие которых основано на механическом вытеснении газа, заполняющего рабочий объем, движущимися частицами (пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и золотниковые);

б) пароструйные, в которых используется эжектирующее действие струи пара рабочей жидкости в результате диффузии молекул газа в струю пара или вязкостного захвата их (пароэжекторные и диффузионные).

Механические насосы создают предельное разряжение 2-0,5 кПа; диффузионные – 10^{-5} Па.

В вакуумной аппаратуре, используемой в металлургическом (литейном) производстве, наиболее широкое применение нашли вакуумметры различных типов (деформационные, термоэлектрические, ионизационные), позволяющие измерять давление 10^5 - 10^{-5} Па.

1.2. Вакуумные индукционные печи

Для вакуумной индукционной плавки (ВИП) разработаны различные конструкции установок периодического (ИСВ-0,025-ПФ, ИСВ-0,06-ПФ) и полунепрерывного (ИСВ-0,6-НИ) действия.

В печах периодического действия после каждой плавки вакуумную плавильную камеру необходимо разгерметизировать для замены изложницы или формы с отливкой и загрузки следующей порции шихты. В печах полунепрерывного действия смену изложниц и загрузку шихты осуществляют через шлюзовые устройства без нарушения вакуума в плавильной камере, что позволяет проводить без разгерметизации несколько плавов, число которых обычно определяется стойкостью тигля.

Те и другие печи имеют специфические конструктивные особенности, обуславливающие их преимущества и недостатки.

Печи обоих типов могут выполняться со стационарной камерой и наклоняющимся тиглем (слив металла осуществляется наклоном тигля внутри неподвижной камеры) и с поворотными тиглями (для слива металла наклоняется вся плавильная камера). Такое конструктивное исполнение также характеризуется определенными преимуществами и недостатками.

Выпускаются индукционные сталеплавильные вакуумные печи серии ИСВ емкостью 0.0016; 0.0040; 0.010; 0.25; 0.060; 0.016; 0.040; 1.0; 2.5; 6.0; 10; 16 т.

Футеровку вакуумных индукционных печей изготавливают из основных и нейтральных тугоплавких и трудно восстановимых окислов (магнезита, электрокорунда, двуокиси циркония и др.) со связующими (борная кислота, декстриновая эмульсия, жидкое стекло, плавиковый шпат и др.).

Печи емкостью до 30 кг, как правило, съемные и взаимозаменяемые (индуктор с футеровкой). Иногда тигли емкостью до 15 кг изготавливают на пресс-формах заранее, просушивают и прокаливают; после установки в индуктор в них проводят первую плавку.

Высоколегированные жаропрочные сплавы выплавляют в вакуумных тигельных печах небольшой вместимости (5-20 кг) для так называемой порционной плавки и заливки.

1.3. Технологический процесс плавки в вакуумной индукционной печи

Обычно плавку в вакуумной печи малой емкости ведут методом переплава. В тигель загружают шихтовую заготовку и собственные отходы, систему герметизируют. При загрузке шихты устанавливают нагретую и прокаленную в нагревательной печи до 900-1000 °С форму и закрепляют ее. Откачка воздуха ведется сначала механическим, затем бустерным и диффузионным насосами. При достижении остаточного давления в печи 133,3 Па включают генератор, подают максимальную мощность на индуктор печи

(коэффициент мощности при этом стараются поддерживать ближе к единице). Обычно нужная температура и скорость заливки формы регулируются автоматически. Плавка идет быстро без шлака, с открытым зеркалом ванны, угара элементов практически нет. Полный цикл плавки массой 8-12 кг завершается в течение 12-15 мин. При достижении металлом заданной температуры контролируемой фотопирометром, мощность печи снижают (до 20-30% от начальной) и наклоном тигля печи производят заливку формы. Противодействие воздуха отсутствует, поэтому металл заполняет самые тонкие сечения отливок при температуре, более низкой, чем при заливке на воздухе. Залитая форма охлаждается в вакууме до температуры, ниже которой металл не окисляется. После этого камеру заполняют воздухом и извлекают залитую форму.

При необходимости возможно проведение плавки металла и заливки форм в среде инертного газа, которым заполняют камеру печи после создания в ней необходимого разрежения. В этом случае ослабляется интенсивность кипения металла в тигле, предотвращаются его выбросы, слиток (отливка) получается более плотным.

1.4. Особенности плавки в индукционной вакуумной печи

Сортамент высококачественных отливок из жаропрочных, нержавеющих и конструкционных сталей непрерывно увеличивается. К ним предъявляются повышенные требования, которые не могут быть удовлетворены открытыми методами плавки. Плавка в вакуумных печах позволяет:

- Защитить жидкий металл от воздействия атмосферы и предохранить его от насыщения газами.
- Уменьшить содержание растворенных в металле газов за счет снижения их растворимости и дегазации жидкого металла при выдержке в вакууме.

- Снизить содержание неметаллических включений за счет их разрушения при взаимодействии с углеродом (оксиды) или же в результате термической диссоциации (нитриды, гидриды) или путем всплывания в жидком расплаве.
- Освободить металл от вредных примесей, обладающих высокой упругостью пара (Sb, Bi, Pb, Sn, Cu, As и др.).
- Выплавить металл с содержанием легирующих элементов (даже таких как Al, Ti и др.) в очень узких пределах; этим достигается высокая однородность физико-механических свойств стали различных плавов.
- Резко повысить уровень физико-механических и эксплуатационных свойств стали и сплавов.

По эффективности удаления кислорода, азота и водорода из сплавов метод ВИП является непревзойденным. Так, в жаропрочной стали (0,15 % C; 15,5 % Cr; 5,3 % Mn; 10 % Fe; 2 % Ti; 3 % Al, остальные Ni) количество кислорода составляет 0,0025 % (при открытой плавке 0,017 %), азота 0,002 % (против 0,004 %), водорода 0,00005 % (против 0,0006 %).

Содержание неметаллических включений составляет 0,005 % (против 0,030 % при плавке в основной дуговой электропечи, 0,010 % в вакуумной дуговой печи).

Сталь ШХ15, выплавленная в вакуумной индукционной печи, имеет предел усталости 880 МПа (против 610 МПа - в основной дуговой электропечи).

2. Техника безопасности при выполнении работы

2.1. К работе на установке допускаются лица не моложе 18 лет, сдавшие экзамен по правилам техники безопасности и выполнению технологических процессов, прошедшие курс практического обучения работе на печи.

2.2. Обязательно наличие диэлектрических ковриков у пульта управления печью, возле механизмов отбора проб, измерения температуры, ввода легирующих элементов.

2.3. Нельзя загружать в тигель печи влажные и неочищенные шихтовые материалы.

2.4. При внезапном прекращении подачи охлаждающей воды в индуктор печи нужно немедленно отключить нагрузку, жидкий металл слить по изложницам, кокилям или застудить.

2.5. Перед пуском воздуха или инертного газа в плавильную камеру следует убедиться, что вакуумные затворы, соединяющие плавильную камеру с паромасляными и механическими насосами, закрыты.

2.6. Допуск посторонних лиц к печи разрешается только администрацией цеха.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Изучить технологические инструкции по подготовке шихтовых материалов, по подготовке к плавке плавильного агрегата. В процессе выполнения работы строго соблюдать все требования инструкций.

3.2. При переходе к плавкам иной марки стали, обязательно провести обмывочную плавку отходами данной стали. Следует контролировать натекание воздуха на холодном и на горячем тигле (не менее одного раза в сутки).

3.3. Загрузку шихты, в зависимости от выплавляемой марки стали, осуществлять в порядке, установленном технологической инструкцией. Оставшуюся часть шихты загрузить в контейнеры, которые закрепить в загрузочной камере печи. После закрытия загрузочной камеры открыть шибер между плавильной и загрузочной камерами.

3.4. В дозатор загрузить легирующие добавки, раскислители. После закрытия дозатора открыть шибер между плавильной камерой и дозатором, а также между плавильной камерой и камерой предварительной дегазации.

3.5. Включить форвакуумный насос, создать разрежение не менее 1000 Па и проверить его приборами ПНИ-2, БГ-2А-Г.

3.6. Перекрыть шиберы, соединяющие плавильную камеру и форвакуумные насосы, открыть заслонки

паромаслянных насосов. достичь разрежение в плавильной камере не более 100 Па, которое контролируется теми же приборами (см. п. 5).

3.7. Включить печь на мощность, составляющую 30-35 % от максимальной (на 20 мин); по мере расплавления шихты периодически осаживается. Догрузить остальную часть шихты через загрузочную камеру.

3.8. Полностью расплавить металл (шлак счищается спецсчищалками).

3.9. Перекрыть заслонки паромасляных насосов (перед напуском аргона вакуум в плавильной камере должен быть не более 100 Па). Напускать аргон до давления 9-9.5 кПа.

3.10. Ввести из дозатора на зеркало расплава раскислители; поднять температуру до $1590+10^{\circ}\text{C}$ (для данного конкретного сплава), проверить ее W-Мо-термопарой. Переключить печь на режим, обеспечивающий поддержание постоянной температуры расплава.

3.11. Перейти к контролю химического и фазового состава выплавляемой стали (по методике, принятой на предприятии). При необходимости провести корректировку состава сплава.

3.12. Произвести заливку форм и выгрузить залитые опоки из печи. Закончить плавку.

4. Содержание и выполнение отчета

4.1. Привести основные правила техники безопасности при работе на вакуумной индукционной печи.

4.2. Привести эскиз печи и дать описание ее конструкции и работы.

4.3. Привести расчет шихты для получения выбранной марки стали.

4.4. Описать технологию вакуумной плавки стали с подробным хронометражем.

4.5. Записать химический состав стали до и после плавки. Подсчитать угар элементов.

4.6. Привести результаты изучения микроструктуры выплавленной стали и сравнения ее с микроструктурой стали, выплавленной открытым способом.

4.7. Указать использованную производственную документацию и привести ее краткое содержание.

4.8. Сделать выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Типы вакуумных индукционных печей.
2. Получение и измерение вакуума в литейном производстве.
3. Назначение порционной плавки.
4. Назначение вакуумной индукционной плавки стали.
5. Основные операции технологического процесса вакуумной индукционной плавки.
6. Особенности ВИП.
7. Основные требования техники безопасности при ВИП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрометаллургия стали и ферросплавов [Текст] /Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Рошин, М.А. Рысс и др. -2-е изд. - М.: Metallurgy, 1984. - 568 с.
2. Шульте, Ю.А. Производство отливок из стали [Текст] / Ю.А. Шульте. - Киев-Донецк: Вища школа, 1983. - 184 с.
3. Производство стальных отливок: учебник для вузов [Текст] / Л.Я. Козлов, В.М. Колокольников, К.Н. Вдовин и др. ; под ред. Л.Я. Козлова.- М.: МИСИС,2003.-352с.
4. Шульте, Ю.А. Электрометаллургия стального литья [Текст] /Ю.А. Шульте. - М.: Metallurgy, 1970. - 224с.
5. Платонов, Б.П. Индукционные печи для плавки чугуна [Текст] /Б.П. Платонов. - М. Машиностроение, 1976. - 176с.
6. Справочник по чугунному литью [Текст] ; под ред. Н.Г. Гиршовича. - 3-е изд. - Л: Машиностроение, 1978. -758с.
7. Трухов, А.П. Литейные сплавы и плавка [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.П. Трухов, А.И. Маляров. - М.: Издательский центр „Академия”, 2004. - 336с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Лабораторная работа №1	1
2. Лабораторная работа №2	21
3. Лабораторная работа №3	32
Библиографический список	40

ЭЛЕКТРОПЛАВКА ЧУГУНА И СТАЛИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к проведению лабораторных работ и выполнению
самостоятельной работы по дисциплине
“Производство отливок из чугуна и стали” для студентов
направления 150400.62 «Металлургия»,
профиля «Технология литейных процессов»
очной формы обучения
Часть 3

Составитель Печенкина Лариса Степановна

В авторской редакции

Компьютерный набор Л.С. Печенкиной

Подписано к изданию 07.05.2014.

Уч. – изд. л. 2,4

ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный
технический университет"

394026 Воронеж, Московский просп., 14