

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Братковский Е.В., Шаповалов А.Н.

ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ И ФЕРРОСПЛАВОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплинам
«Электрометаллургия стали и ферросплавов»,
«Современные методы получения высококачественных сталей и сплавов»

Направление подготовки: 22.03.02 «Металлургия»
Профиль 1 «Металлургия черных металлов»
Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр
Форма обучения: очная, заочная

Новотроицк - 2019

УДК 669.18
ББК 34.327
Б 87

Рецензенты:

Профессор кафедры технологий и обработки металлов МГТУ им. Г.И. Носова,
д.т.н., Румянцев М.И.

Заместитель начальника электросталеплавильного цеха по технологии
АО «Уральская Сталь», к.т.н., Кузнецов М.С.

Братковский Е.В., Шаповалов А.Н. Электросталь и ферросплавов:
Лабораторный практикум. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2019. – 67с.

Лабораторный практикум по дисциплинам «Электросталь и ферросплавов», «Современные методы получения высококачественных сталей и сплавов» предназначен для изучения устройства и основных технологических процессов, происходящих при выплавке сталей и ферросплавов в современных электропечах, а также моделирования технологических операций, выполняемых в электросталеплавильных процессах при различных вариантах технологии.

Приведены теоретические разделы по темам лабораторных работ, методики проведения, требования к оформлению отчетов и вопросы для самопроверки.

Лабораторный практикум составлен в соответствии с требованиями образовательного стандарта высшего образования НИТУ «МИСиС» по направлению подготовки 22.03.02 Металлургия, обучающихся по всем профилям, реализуемым в НФ НИТУ «МИСиС».

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологиче-
ский университет «МИСиС», 2019

Содержание

Введение	4
Порядок выполнения, оформления и защиты лабораторных работ	5
Лабораторная работа № 1. Устройство дуговой сталеплавильной печи (ДСП) прямого действия.....	6
Лабораторная работа № 2. Изучение технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи	17
Лабораторная работа № 3. Изучение устройства и принципа действия лабораторных электропечей.....	33
Лабораторная работа № 4. Имитационное моделирование обработки электростали на агрегате доводки стали (АДС).....	44
Лабораторная работа № 5. Изучение различных видов ферросплавов	54
Библиографический список.....	66

Введение

Лабораторный практикум предназначен для проведения лабораторных работ по дисциплинам «Электрометаллургия стали и ферросплавов», «Современные методы получения высококачественных сталей и сплавов» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 22.03.02 «Металлургия» очной и заочной форм обучения.

В практикум включены пять лабораторных работ, тематика которых охватывает все разделы изучаемых дисциплин. Работы № 1 и 2 проводятся в фасоннолитейном цехе (ФЛЦ) АО «Уральская Сталь», работы № 3 и 5 проводятся в учебных лабораториях филиала по форме «Групповые работы», работа №4 – в компьютерном классе по форме «Компьютерные имитаторы».

Продолжительность лабораторных работ №№ 1-3 составляет по 4 академических часа, лабораторных работ № 4 и 5 – по 2 академических часа. Общая трудоёмкость освоения лабораторного практикума составляет 16 академических часов. Студенты очной формы обучения выполняют все работы практикума, студенты заочной формы выполняют работы, указанные преподавателем.

При выполнении представленных в практикуме лабораторных работ студенты приобретают общекультурные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции, предусмотренные учебным планом подготовки бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия» для дисциплин «Электрометаллургия стали и ферросплавов», «Современные методы получения высококачественных сталей и сплавов».

Порядок выполнения, оформления и защиты лабораторных работ

В лабораториях и компьютерных классах НФ НИТУ «МИСиС» находится оборудование, позволяющее изучать шихтовые материалы и продукты электросталеплавильного производства, конструкцию современных электропечей, моделировать процессы выплавки и ковшевой обработки электростали.

Все лабораторные работы выполняются бригадами студентов. В целях экономии времени персоналом лаборатории могут быть выполнены вспомогательные операции. Предпочтительно последовательное выполнение лабораторных работ в соответствии с содержанием практикума.

На первом лабораторном занятии преподаватель должен ознакомить студентов с задачами лабораторного практикума, требованиями, предъявляемыми к отчетам, правилами внутреннего распорядка лаборатории. В ряде случаев преподаватель должен напомнить студентам некоторые теоретические сведения, непосредственно относящиеся к той или иной работе, либо организовать показ тех или иных операций.

После вводной беседы преподаватель знакомит студентов с правилами техники безопасности, что фиксируется в специальном журнале.

Приступая к выполнению работы, студент должен изучить ее описание, ознакомиться с рекомендованной литературой и составить конспект с указанием цели работы, теоретического введения, технологических параметров основных процессов, схем установок и приборов.

В начале каждого лабораторного занятия студенты должны защитить отчет по предыдущей работе и получить допуск к выполнению следующей работы.

После окончания каждой работы студенты предъявляют преподавателю на подпись результаты опытов и наводят порядок на рабочем месте.

По каждой лабораторной работе оформляется отчет, который должен начинаться с названия работы и содержать следующие разделы: цель работы, краткое теоретическое введение, методика проведения работы, схемы и описание лабораторных установок, результаты измерений, расчетов и выводы. Индивидуальные требования по оформлению отчетов изложены в описании представленных в практикуме лабораторных работ.

Защищенные лабораторные работы являются допуском к экзамену по дисциплинам «Электрометаллургия стали и ферросплавов», «Современные методы получения высококачественных сталей и сплавов».

Лабораторная работа № 1. Устройство дуговой сталеплавильной печи (ДСП) прямого действия

1 Цель работы

- изучение устройства дуговой сталеплавильной печи;
- изучение механического и электрического оборудования электродуговых печей.

2 Теоретическое введение

Электрическая дуговая печь – печь для плавки металлов и сплавов, в которой используется тепловой эффект электрической дуги. Первые промышленные дуговые печи построены в 1898-1901 П. Эру во Франции и Э. Стассано в Италии. В России первая дуговая печь была установлена в 1910 на Обуховском заводе в Петербурге.

В литейном производстве дуговые печи используют для выплавки стали и чугуна из металлического лома и для перегрева жидкого чугуна, получаемого в вагранках или других первичных плавильных печах, для выплавки ферросплавов и чугуна из руд, а также в химической промышленности – для производства карбида кальция, фосфора и др. продуктов.

В дуговых печах можно получать высококачественный металл с низким содержанием фосфора, серы, кислорода и других вредных и нежелательных примесей, легированные стали с высоким содержанием легирующих добавок. Дуговые печи лучше других приспособлены для переработки металлического лома. Металлизированные окатыши, заменяющие лом, можно загружать в электропечь непрерывно при помощи автоматических дозирующих устройств.

2.1 Классификация дуговых электрических печей

Дуговые электропечи классифицируют по роду тока и способу нагрева.

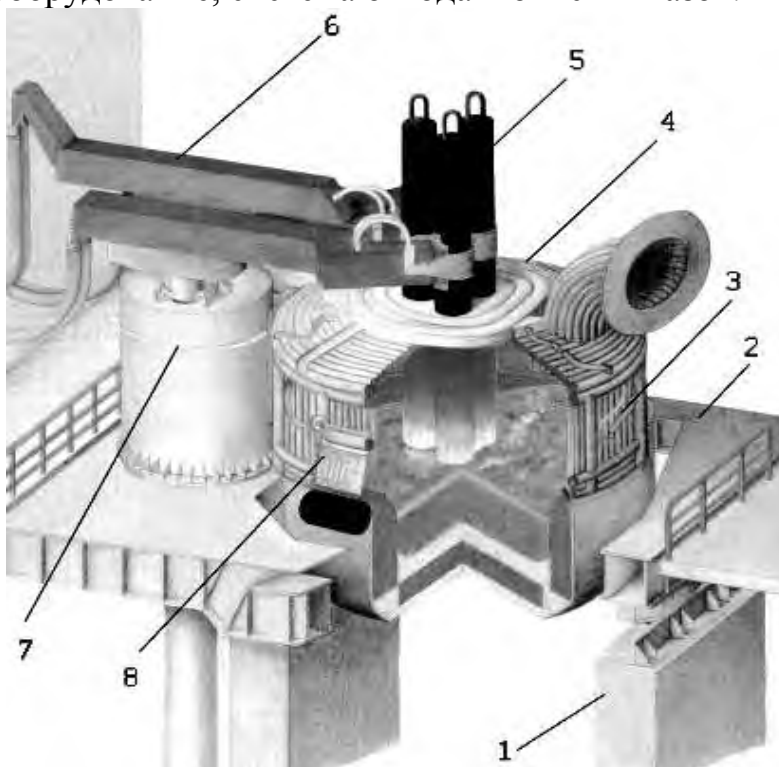
По роду тока дуговые печи подразделяют на печи, работающие на переменном токе, и печи постоянного тока.

По способу нагрева:

- печи прямого действия, в которых электрическая дуга горит между концами электродов и расплавляемым материалом;
- печи косвенного действия, где электродуговой разряд горит между электродами, расположенными над нагреваемым материалом, и теплообмен между электрической дугой и материалом осуществляется в основном за счет излучения;
- печи с закрытой дугой, в которых дуги горят под слоем твёрдой шихты, окружающей электроды. Шихта нагревается теплом, выделяющимся в дуге, а также джоулевым теплом, образующимся при прохождении тока через шихту.

2.2 Конструкция дуговых сталеплавильных печей прямого действия

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) прямого действия предназначены для выплавки стали в слитки для последующего передела в прокатных цехах, а также для получения фасонного литья, ферросплавов, химических продуктов. Промышленностью освоен выпуск дуговых печей вместимостью от 0,1 до 250 т. Печи состоят из следующих основных частей (рисунок 1.1): корпус, механизм наклона, футеровка, свод, электроды, электрододержатели, подъемно-поворотный механизм свода и электрододержателей, система водяного охлаждения, электрооборудование, система отвода и очистки газов.



1 - фундамент; 2 - наклонная платформа; 3 - корпус печи; 4 - свод печи; 5 - электроды; 6 - электрододержатели; 7 - подъемно-поворотный механизм свода и электродов; 8 – рабочее (завалочное) окно

Рисунок 1.1 – Конструкция современной дуговой сталеплавильной печи

Система загрузки печи бывает двух видов: через рабочее (завалочное) окно мультозавалочной машиной и через верх при помощи бады. Загрузку через окно применяют только на небольших печах. При загрузке печи сверху в один-два приема в течение 5 мин меньше охлаждается футеровка, сокращается время плавки; уменьшается расход электроэнергии; эффективнее используется объем печи. Для загрузки печи свод приподнимают на 150-200 мм над кожухом печи и поворачивают в сторону вместе с электродами, полностью открывая рабочее пространство печи для введения бады с шихтой.

Корпус. Корпус (кожух) печи служит для поддержания огнеупорной футеровки и крепления различных механизмов. Он должен выдерживать все нагрузки от футеровки и жидкого металла, а в некоторых конструкциях и от механизмов наклона печи и подъема свода.

Корпус современной ДСП, как правило, состоит из двух разъемных частей по границе огнеупорной футеровки и водоохлаждаемых панелей – днища и кожуха печи. Несущие элементы корпуса сваривают из листовой низкоуглеродистой стали толщиной от 15 до 60 мм (в зависимости от размеров печи) и усиливают ребрами жесткости.

Днище кожуха печи повторяет конфигурацию ванны печи и футеровано огнеупорными материалами. Кожух печи формирует свободное пространство и представляет собой водоохлаждаемый трубчатый каркас-коллектор (рисунок 1.2). С внутренней поверхности в окна кожуха размещаются стеновые водоохлаждаемые панели, обычно в количестве 8-14 штук. При необходимости простые по конструкции и легкоразъемные соединения обеспечивают их быструю замену. Благодаря тому, что каркас печи охлаждается, уменьшаются размеры его деталей и снижается их масса. Более того, каркас обладает повышенной стойкостью к тепловому воздействию, что существенно увеличивает срок его службы. К верхней цилиндрической части каркаса печи приваривают литое кольцо желобчатого типа, одновременно выполняющее роль жесткой конструкции и песчаного затвора печи.

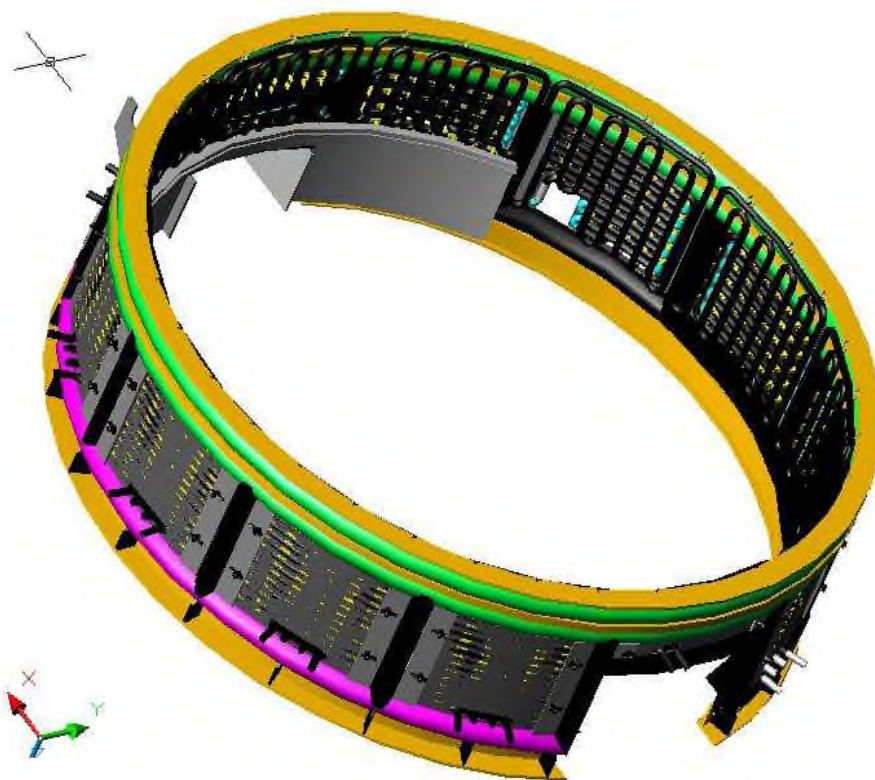
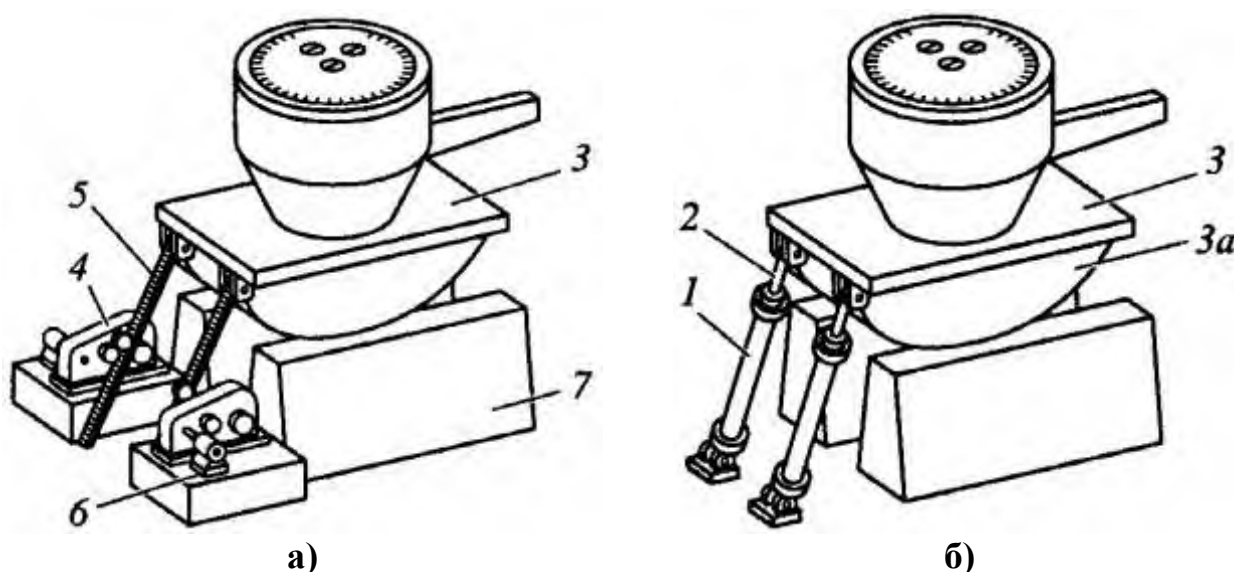


Рисунок 1.2 – Общий вид каркаса печи со стеновыми водоохлаждаемыми панелями

По периметру кожуха выполняют несколько технологических окон для установки стационарных стеновых топливо-кислородных горелок, инжекторов для подачи порошкообразных материалов, загрузочного окна и сталевыпускного отверстия (или отверстия в крышке эркера для обслуживания сталевыпускного отверстия).

Механизм наклона. Для слива металла печь наклоняют на 40-45° в сторону сливного носка (на современных печах с эркерным выпуском на 12-15°), а для скачивания шлака на 10-15° в сторону рабочего окна. Станина печи (опорный механизм), на которой установлен корпус, опирается на два (четыре) опорных сектора, которые перекатываются по горизонтальным направляющим. В секторах имеются отверстия, а в направляющих – зубцы, при помощи которых предотвращается проскальзывание секторов при наклоне печи. Наклон печи осуществляется при помощи рейки и зубчатого механизма или гидравлическим приводом (рисунок 1.3). Два цилиндра укреплены на неподвижных опорах фундамента, а штоки шарнирно связаны с опорными секторами люльки печи.

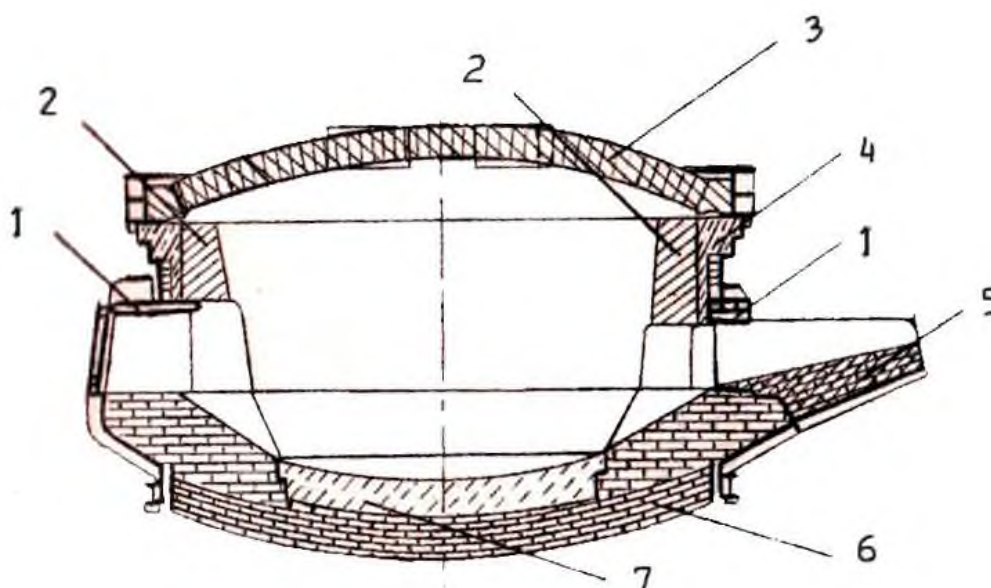


1 – гидроцилиндр; 2 – шток; 3 – станина; 3а – опорный сегмент; 4 – редуктор; 5 – зубчатая рейка; 6 – электродвигатель; 7 – фундаментная балка

Рисунок 1.3 – Станина (люлька) и механизмы наклона печи с гидравлическим (а) и электромеханическим (б) приводом

Футеровка. Подина состоит из нескольких слоев. Первый слой, соприкасающийся с жидким металлом и шлаком – набивной из огнеупорного порошка (рисунок 1.4). При кислом процессе используют набивку из кварцевого песка, при основном – набивку из магнезитового порошка. Второй слой подины при кислом процессе выполняют из динаса, а при основном – из магнезитового или высокоогнеупорного периклазоуглеродистого кирпича. Последующие слои состоят из шамота, диатомита и асбеста. Общая толщина подины равна примерно глубине ванны и может достигать 1 м для крупных печей. Стены печей – многослойные. Первый слой в зависимости от процесса выкладывают из динасового или магнезитового или доломитового кирпича, второй – из шамотного кирпича, третий – из диатомитового порошка, который, выполняя роль теплоизоляции, одновременно компенсирует расширение огнеупоров при их нагреве и тем самым предохраняет каркас от разрушения. Вместо огнеупорных кирпичей иногда применяют набивные блоки, изготовленные из кварцевого песка или магнезитового порошка. У сверхмощных сталеплавильных печей стены из ог-

неупоров заменяют водоохлаждаемыми панелями и применяют эркерный выпуск.



1 – охлаждаемая рама; 2 – доломитовые блоки; 3 – силикатный кирпич;
4 – доломитовый порошок; 5 – шамот; 6 – магнезит;
7 – набивка из магнезито-доломитового порошка
Рисунок 1.4 – Футеровка основной электродуговой печи

Рабочее (завалочное) окно. Для загрузки шихты в печи небольшой емкости и подгрузки легирующих и флюсов в крупные, печи скачивания шлака, осмотра, заправки и ремонта печи имеется загрузочное окно, обрамленное литой водоохлаждаемой рамой. К раме крепятся направляющие, по которым скользит футерованная заслонка. Для подъема заслонки используют пневматический, гидравлический или электромеханический привод.

Устройство выпуска металла. Устройство для выпуска стали расположено напротив рабочего окна. Устройство может выполняться в виде футерованного желоба (длина 1-2 м), соединенного с рабочим пространством футерованным отверстием для выпуска стали диаметром 120-150 мм. Современные ДСП оборудованы эркерным устройством выпуска стали (рисунок 1.5 б).

Свод. Водоохлаждаемый свод электропечи установлен на кожухе и изолирует сверху рабочее пространство печи. Свод ДСП состоит из центральной и периферийной частей. Современные дуговые печи имеют водоохлаждаемый свод, в котором футеровка присутствует только в центральной части, где расположены электроды (рисунок 1.6). Центральная огнеупорная часть выполняется, как правило, из высокоглиноземистого кирпича или жаропрочного бетона. Огнеупорная футеровка центральной части опирается на кольцо малого свода, представляющее собой водоохлаждаемую трубчатую конструкцию, которая обеспечивает быструю замену огнеупорной центральной части. В полностью водоохлаждаемой периферийной части свода предусмотрены отверстия для патрубка газоотсоса и подачи шлакообразующих материалов. Основной несущей конструкцией свода является водоохлаждаемый каркас-коллектор, кото-

рый представляет собой сварную металлоконструкцию в виде опорной рамы для крепления водоохлаждаемых панелей.

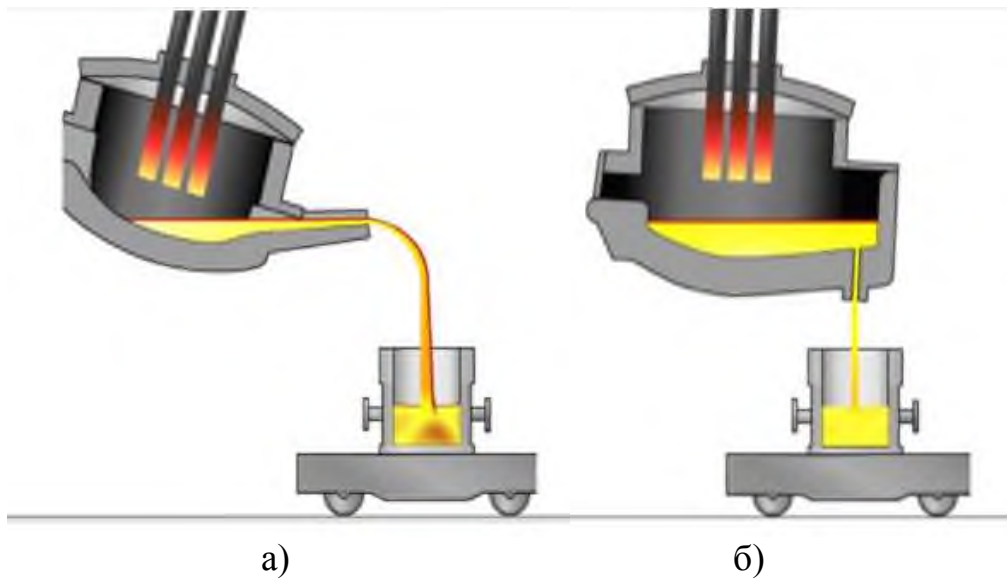


Рисунок 1.5 – Организация выпуска продуктов плавки:
а – выпуск с носка; б – экерный выпуск



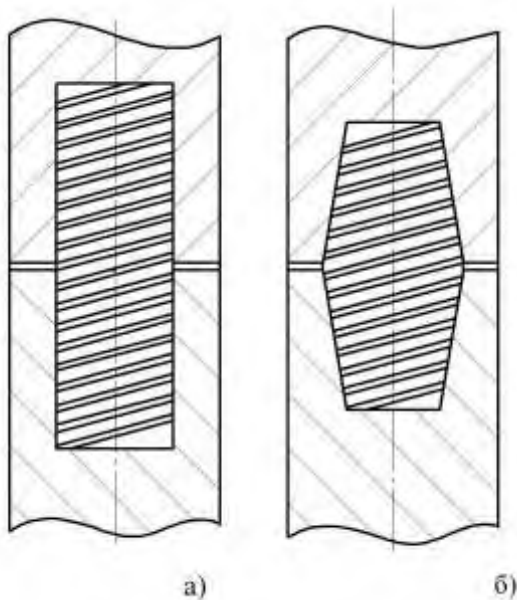
Рисунок 1.6 – Водоохлаждаемый свод печи ДСП-100

Механизм перемещения свода. Загрузку печей как правило выполняют сверху, для чего применяют специальные механизмы для подъема и поворота свода. При загрузке шихты свод вместе с электродами поднимают и поворачивают на 80-100°. Открытую печь загружают с помощью специальных загрузоч-

ных корзин. По окончании загрузки свод возвращают в исходное положение и начинают рабочий цикл плавки. У некоторых печей свод после подъема остается в приподнятом положении, а печь выкатывают из-под свода на позицию загрузки. По окончании загрузки печь устанавливают в первоначальное положение, а свод опускают.

Электроды. Ток в плавильное пространство печи подается через электроды, собранные из секций, каждая из которых представляет собой круглую заготовку диаметром от 100 до 610 мм и длиной до 1500 мм. В малых электропечах используют угольные электроды, в крупных – графитированные. Графитированные электроды изготавливают из антрацита, термоантрацита (прокаленного антрацита), нефтяного кокса, каменноугольного пека и смолы в специальных печах путем обжига заготовок без доступа кислорода при температуре до 1600 К. Угольные электроды по сравнению с графитированными имеют меньшую механическую прочность и большее удельное сопротивление, поэтому их применяют на печах вместимостью до 3 т.

В процессе эксплуатации в результате окисления печными газами и распыления при горении дуги электроды сгорают. По мере укорачивания электрод опускают в печь. При этом электрододержатель приближается к своду. Наступает момент, когда электрод становится настолько коротким, что не может поддерживать дугу, и его необходимо наращивать. Для наращивания электродов в концах секций сделаны отверстия с резьбой, куда ввинчивается переходник-ниппель, при помощи которого соединяются отдельные секции (рисунок 1.7). Расход электродов составляет 5-9 кг на тонну выплавляемой стали.



а) цилиндрический; б) биконический

Рисунок 1.7 – Соединение электродов ниппелем

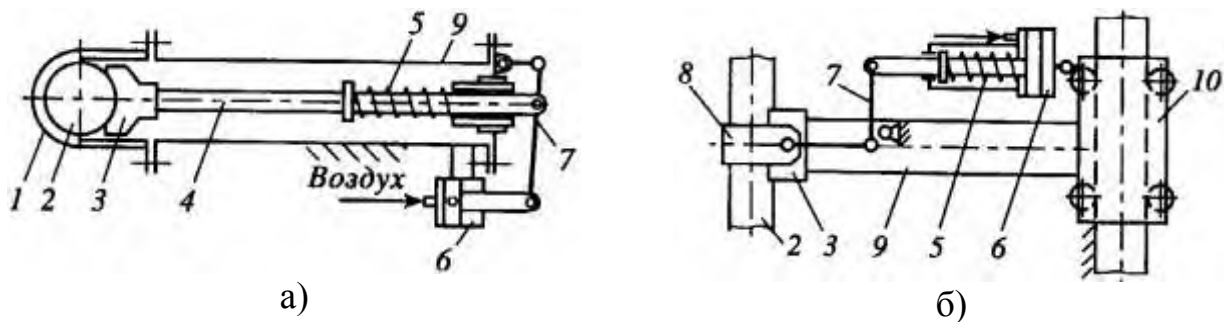
Электродержатели.

Электрододержатели предназначены для удержания электродов на заданной высоте и для подвода к ним электрического тока. К конструкции электрододержателей предъявляют ряд требований:

- для уменьшения электрических потерь в контакте и проскальзывания электродов зажим электродов должен быть плотным;

– должны быть достаточно жесткими, чтобы не прогибаться под тяжестью электродов и предотвращать вибрацию, которая может оказать влияние на стабильность горения дуги.

Наиболее распространенным в настоящее время является пружинно-пневматический электрододержатель. Зажим электрода осуществляется при помощи неподвижного кольца и зажимной плиты, которая прижимается к электроду пружиной. Отжатие плиты от электрода и сжатие пружины происходят при помощи сжатого воздуха (рисунок 1.8).



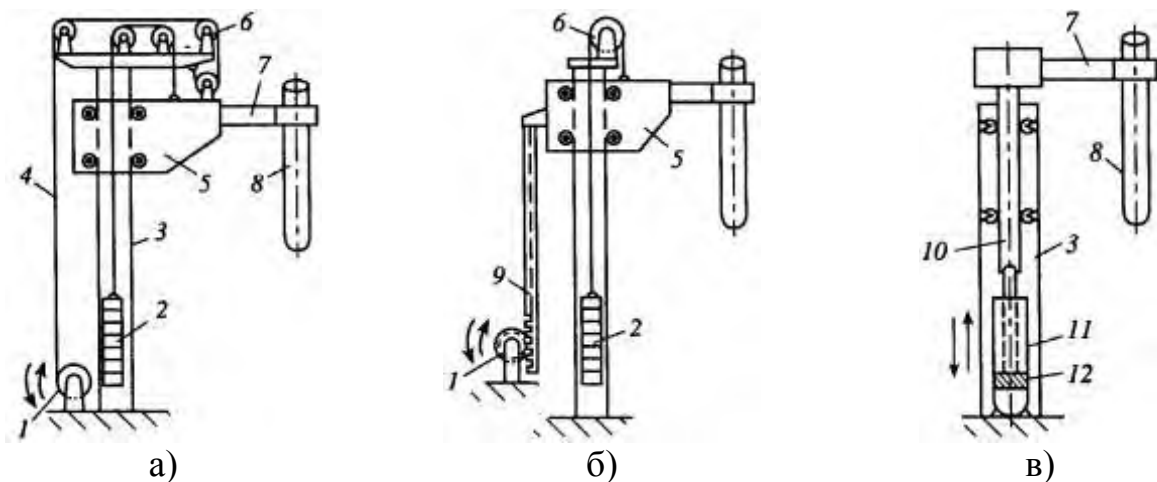
а – с подвижной колодкой; б – с неподвижной колодкой;

1 – кольцо (полукольцо); 2 – электрод; 3 – нажимная колодка; 4 – шток;
5 – пружина; 6 – пневмоцилиндр; 7 – рычажный механизм; 8 – хомут;
9 – рукав; 10 – каретка

Рисунок 1.8 – Схема пружинно-пневматических электрододержателей

На современных высокомоощных печах вместо пружинно-пневматических устанавливают схожие с ними пружинно-гидравлические механизмы зажима электродов. Ток подводится к электрододержателям с помощью пакета медных шин или водоохлаждаемых труб.

Механизмы перемещения электродов. Механизмы перемещения электродов должны обеспечить быстрый подъем электродов в случае обвала шихты в процессе плавления, а также плавное опускание электродов во избежание их погружения в металл или ударов о нерасплавившиеся куски шихты. Скорость подъема электродов составляет 2,5-6,0 м/мин, скорость опускания 1,0-2,0 м/мин. Каждый из трех электродов имеет свой независимый механизм зажима и перемещения. Механизм состоит из электрододержателя и устройств, обеспечивающих перемещение его с электродом в вертикальном направлении. Применяются механизмы перемещения электродов с кареткой, передвигающейся по неподвижной стойке и с подвижной телескопической стойкой электрододержателя (рисунок 1.9).

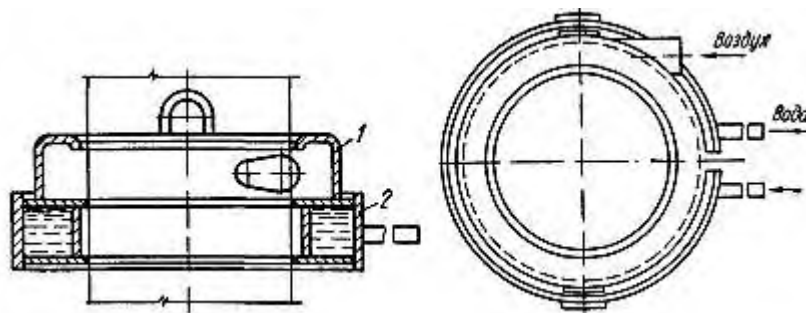


а – с электромеханическим канатным приводом; б – с электромеханическим реечным приводом; в – с подвижной стойкой и гидравлическим приводом;
 1 – привод; 2 – противовес; 3 – неподвижная стойка; 4 – канат; 5 – каретка;
 6 – ролик; 7 – рукав; 8 – электрод; 9 – рейка; 10 – подвижная стойка;
 11 – гидроцилиндр; 12 – поршень

Рисунок 1.9 – Схема механизмов перемещения электродов

Экономайзеры.

Это специальные уплотняющие устройства электродных отверстий, позволяющие предотвратить интенсивное окисление электродов, понизить температуру выступающей над печью части электродов, уменьшить количество подсасываемого холодного атмосферного воздуха, а также сократить тепловые потери. Конструкция наиболее простого экономайзера представлена на рисунке 1.10. На печах средней и малой емкости применяют экономайзеры в виде змеевик, кольца или цилиндра.



1-кольцо уплотнительное верхнее; 2- кольцо уплотнительное нижнее

Рисунок 1.10 – Экономайзер

Электрооборудование. Электрооборудование состоит из печного трансформатора с удельной мощностью до 1 МВА/т, дросселей (реактивное сопротивление), коммутационно-защитной аппаратуры, системы автоматического регулирования электрического режима. Практически все современные высокопроизводительные ДСП имеют высшую ступень вторичного напряжения печного трансформатора 1 кВ и более, а сила тока измеряется десятками тысяч ам-

пер. Мощность отдельной установки может достигать 50-140 МВА. Дополнительное реактивное сопротивление, регулирующее общее сопротивление электропечного контура (импеданс), что позволяет проводить плавку с пониженной рабочей силой тока и при повышенном вторичном напряжении.

По ходу плавки в электродуговую печь требуется подавать различное количество энергии. Менять подачу мощности можно изменением напряжения или силы тока дуги. Регулирование напряжения производится переключением обмоток трансформатора. Регулирование силы тока осуществляется изменением расстояния между электродом и шихтой путем подъема или опускания электродов. При этом напряжение дуги не изменяется. Опускание или подъем электродов производятся автоматически при помощи автоматических регуляторов, установленных на каждой фазе печи. В современных печах заданная программа электрического режима может быть установлена на весь период плавки.

Система отвода и очистки отходящих газов. Современные крупные сталеплавильные дуговые печи во время работы выделяют в атмосферу большое количество запыленных газов. Применение кислорода и порошкообразных материалов еще более способствует этому. Содержание пыли в газах электродуговых печей достигает 100 г/м^3 и значительно превышает норму. Для улавливания пыли производят отсос газов из рабочего пространства печей мощным вентилятором (или естественной тягой дымовой трубы). Для этого в своде печи делают четвертое отверстие с патрубком для газоотсоса. Патрубок через зазор, позволяющий наклонять или вращать печь, подходит к стационарному трубопроводу. По пути газы разбавляются воздухом, необходимым для дожигания СО. Затем газы охлаждаются водяными форсунками в теплообменнике и направляются в систему труб Вентури, в которых пыль задерживается в результате увлажнения. Применяют также тканевые фильтры, дезинтеграторы и электрофильтры. Используют системы газоочистки, включающие полностью весь электросталеплавильный цех, с установкой зонтов дымоотсоса под крышей цеха над электропечами.

3 Методика выполнения работы

Лабораторная работа проводится на плавильном участке фасоннолитейного цеха (ФЛЦ) АО «Уральская Сталь». До начала работы студенты самостоятельно изучают теоретическое введение. В ходе проведения работы студенты под руководством преподавателя и представителя ФЛЦ изучают устройство и оборудование ДСП-3, фиксируя в рабочей тетради основные характеристики, особенности механического и электрического оборудования печи.

В отчете по лабораторной работе быть следующие разделы.

- 1 Название и цель работы.
- 2 Устройство ДСП-3 ФЛЦ АО «Уральская Сталь».
- 3 Техническая характеристика ДСП-3 ФЛЦ АО «Уральская Сталь»;
- 4 Выводы.

Защита лабораторной работы проводится при наличии отчёта по контрольным вопросам.

4 Контрольные вопросы

- 1 Дайте общую характеристику электродуговой печи.
- 2 Расскажите о классификации дуговых печей по роду тока и способу нагрева.
- 3 Как формируется электрическая дуга в дуговых печах прямого действия?
- 4 Опишите конструкцию дуговой печи прямого действия.
- 5 Какие варианты загрузки шихты применяются на электродуговых печах?
- 6 В чем заключается конструктивное отличие крупных высокомошных ДСП?
- 7 Перечислите основные конструктивные элементы электродуговой печи прямого действия
- 8 Для чего и каким образом осуществляется наклон электродуговых печей?
- 9 Какие материалы применяют для футеровки подины электродуговой печи?
- 10 Какие варианты выпуска стали применяют на электродуговых печах?
- 11 Как осуществляется электрический контакт между электродом и токоподводящими контактными щечками?
- 12 Из чего изготавливают электроду электродуговых печей?
- 13 Что может стать причиной облома электродов?
- 14 Какие функции выполняют электрододержатели дуговых печей?
- 15 Для чего нужны механизмы перемещения сводов и электродов?
- 16 Какие функции выполняют экономайзеры?
- 17 Что входит в состав электрооборудования современной электродуговой печи?

Лабораторная работа № 2. Изучение технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи

1 Цель работы

- закрепление знаний технологии плавки стали в дуговой сталеплавильной печи;
- изучение содержания технологических операций и проведение хронометража выплавки стали;
- изучение контрольно-измерительной аппаратуры электродуговой печи и паспорта плавки.

2 Теоретическое введение

Технология плавки стали в дуговых печах определяется составом выплавляемой стали и предъявляемыми к ней требованиями, а также качеством шихты. В зависимости от этих факторов технология плавки даже в одной печи может быть существенно различной.

Имеются две основные разновидности технологии плавки легированной стали: плавка на углеродистой («свежей») шихте и плавка переплавом легированных отходов.

Углеродистая шихта характеризуется повышенным содержанием углерода, фосфора, серы и отсутствием или незначительным количеством легирующих элементов. Для передела такой шихты в качественную сталь требуется проведение специального окислительного периода, в течение которого окисляются углерод, фосфор и не которые сопутствующие элементы: кремний, хром, марганец, ванадий и др.

Наличие окислительного периода является характерной особенностью технологии плавки на свежей шихте, поэтому ее называют еще плавкой с полным окислением.

Плавка высококачественной стали на свежей шихте включает следующие этапы:

- подготовку шихтовых материалов,
- подготовку печи к плавке,
- загрузку шихты,
- период плавления,
- окислительный период,
- восстановительный период.

Выплавка рядовой стали проводится по упрощенной технологии под одним шлаком с интенсивным использованием кислорода и характеризуется отсутствием восстановительного периода.

Проведение всех периодов плавки позволяет глубоко очистить металл от вредных примесей – фосфора и серы. Окисление углерода в окислительный период вызывает кипение ванны и способствует дегазации металла – удалению растворенных в нем водорода и азота. Поэтому плавка с полным окислением

позволяет получать из рядовой шихты высококачественную сталь. Недостаток этого метода плавки заключается в потере некоторых содержащихся в шихте легирующих элементов (хрома, ванадия и др.) и большей продолжительности плавки.

При плавке методом переплава окислительный период исключают из суммарного процесса плавки, в результате чего некоторые из содержащихся в шихте легирующих элементов не окисляются и остаются в стали. Это позволяет полнее использовать легирующие элементы, содержащиеся в отходах, и уменьшить расход ферросплавов.

Продолжительность плавки методом переплава меньше, чем на свежей шихте, соответственно выше производительность агрегата, меньше расход электрической энергии. Себестоимость стали, выплавленной методом переплава, меньше себестоимости той же стали, выплавленной на свежей шихте.

Однако отсутствие окислительного периода делает невозможным удаление фосфора, поэтому для плавки методом переплава требуется чистая по фосфору шихта. Кроме того, отсутствие кипения ванны не позволяет удалять в течение плавки растворенные газы, что требует принятия дополнительных мер для их удаления.

На плавках методом переплава для ускорения нагрева металла, понижения в нем содержания углерода и растворенных газов ванну часто продувают газообразным кислородом. В результате экзотермических реакций кислорода с железом, кремнием и углеродом температура ванны быстро повышается, хром и другие легирующие элементы при этом окисляются незначительно, а выделяющаяся окись углерода оказывает дегазирующее действие. Такую разновидность технологии переплава называют плавкой с частичным окислением.

2.1 Подготовка печи к плавке

Огнеупорная футеровка печи изнашивается и для поддержания ее в рабочем состоянии необходимо регулярно ремонтировать наиболее пострадавшие участки ее. Поэтому после каждой плавки печь тщательно осматривают, подиону прощупывают железным штырем, выявляют все поврежденные места и принимают меры по устранению обнаруженных разрушений.

Сразу же после выпуска плавки печь необходимо очистить от остатков шлака и металла. Остатки шлака и металла удаляют металлическими скребками вручную. Это очень тяжелая операция, тем более, что ее выполняют под прямым тепловым излучением футеровки и по возможности быстро, пока шлак и металл не застыли, а футеровка достаточно разогрета для сваривания с заплавочным материалом.

Поврежденные участки футеровки после удаления остатков шлака и металла заправляют сухим магнезитовым порошком, а места наибольших повреждений – порошком, смоченным в жидком стекле. Наиболее пригоден для заправки специальный мелкозернистый порошок при размере зерна 0-1,5 мм без включений извести и доломита (белые и серые зерна). В состав заплавочных

смесей иногда включают размолотый бывший в употреблении магнезитовый кирпич.

После значительного ремонта подины для ее закрепления следует провести плавку без окисления при сравнительно низкой тепловой нагрузке.

Заправку печей небольшой емкости осуществляют, как правило, вручную лопатами, а передний откос – специальной ложкой. Для механизированной заправки средних и крупных печей используют заправочные машины. В рабочее пространство печи машины опускают краном сверху либо вводят через рабочее окно.

После заправки следует тщательно осмотреть стены и свод печи и выполнить необходимый ремонт.

2.2 Завалка (загрузка) шихты в печь

На современных электропечах загрузка шихты осуществляется сверху при помощи загрузочных бадей (корзин). Старые печи загружают, пользуясь мульдами. В первом случае вся шихта загружается в один-два приема и независимо от емкости печи длительность загрузки составляет 5-10 мин. Длительность завалки в случае использования мульд зависит от насыпной массы шихты и емкости печи. Завалка мульдами печи емкостью 40 т продолжается 40-50 мин. Быстрая завалка позволяет сохранить тепло, аккумулированное кладкой печи, в результате чего сокращается продолжительность плавления, уменьшается расход электроэнергии и электродов и увеличивается стойкость футеровки.

При завалке сверху порядок укладки шихты в бадье предопределяет расположение ее в печи. Для предохранения подины от ударов крупных падающих кусков на дно баджи желательнее загружать небольшое количество мелкого лома. Наиболее крупную шихту догружают вперемежку с шихтой средних размеров в центральную часть баджи так, чтобы в печи крупные куски оказались непосредственно под электродами. По периферии распределяют куски средних размеров, а сверху засыпают мелочь.

Такая последовательность загрузки баджи обеспечивает наиболее плотную укладку шихты в печи, что очень важно для стабильного горения дуг. Наличие сверху мелочи обеспечивает в начале плавления быстрое погружение электродов и исключает прямое воздействие излучения дуг на футеровку стен, а присутствие в шихте под электродами крупных кусков замедляет проплавление колодцев и исключает возможность погружения электродов до подины раньше, чем накопится слой жидкого металла, защищающий подину от прямого воздействия дуг.

Для достижения оптимальной укладки шихта должна состоять на 35-40% из крупного лома, 40-45% среднего и 15-20% мелкого, причем примерно половину мелочи нужно загружать вниз, а вторую половину – поверх остальной завалки.

При наличии в шихте легирующих элементов их надо располагать таким образом, чтобы обеспечивалась максимальная скорость их плавления и минимальный угар. Тугоплавкие металлы, такие как ферромолибден или ферро-

вольфрам, следует загружать в центральную часть бадьи. Легкоплавкие металлы, например, никель, в зоне дуг интенсивно испаряются. Для уменьшения потерь их целесообразно загружать ближе к откосам.

Содержание углерода в шихте должно быть на 0,4-0,6% выше нижнего предела в стали заданной марки. Недостающее количество в шихте углерода вводят используя для этого соответствующие присадки углеродсодержащих материалов – чугуна, кокс и электродный бой. В результате введения чугуна в металле увеличивается содержание фосфора, поэтому чугуном пользуются только на плавках с полным окислением и дозируют его в количестве не более 20% от массы шихты. Чугун характеризуется низкой температурой плавления, поэтому его загружают вместе с мелким ломом поверх всей завалки. Кокс и электродный бой для лучшего усвоения загружают поверх первой порции мелкого лома.

Для раннего образования шлака, предохраняющего металл от окисления, и для дефосфорации в процессе плавления в завалку вводят известь в количестве 2-3 % от массы металлошихты. В зависимости от состояния подины известь загружают либо на подину, либо после на часть ранее загруженной металлической шихты. Для дефосфорации металла уже в период плавления на плавках с полным окислением в завалку дают 1,0-1,5% железной руды. При зарастании подины руду засыпают непосредственно на подину, в остальных случаях ее загружают в бадью поверх части металлической шихты.

В случае мультимодальной завалки последовательность загрузки должна обеспечивать такой же порядок распределения шихты в печи, как и при бадьевой загрузке.

2.3 Плавление шихты

Главная задача этого периода плавки – быстрый перевод металлошихты в жидкое состояние.

Длительность периода плавления зависит от емкости печи, установленной мощности трансформатора, состава выплавляемой стали, электрического режима и ряда других факторов. Абсолютная продолжительность этого периода изменяется от одного до четырех часов, что составляет одну-две трети длительности всей плавки. Большое тепловосприятие ванны в период плавления позволяет в этот период работать с максимальной мощностью и при максимальном напряжении на дуге. Лишь в самом начале плавления, когда дуги открыты и расположены высоко (рисунок 2.1, а), излучение длинных дуг может привести к перегреву футеровки свода и стен. Поэтому в первые минуты рекомендуется применять более низкое напряжение. После образования колодцев дуги оказываются экранированными шихтой, что позволяет перейти к плавлению при максимальных напряжении и мощности.

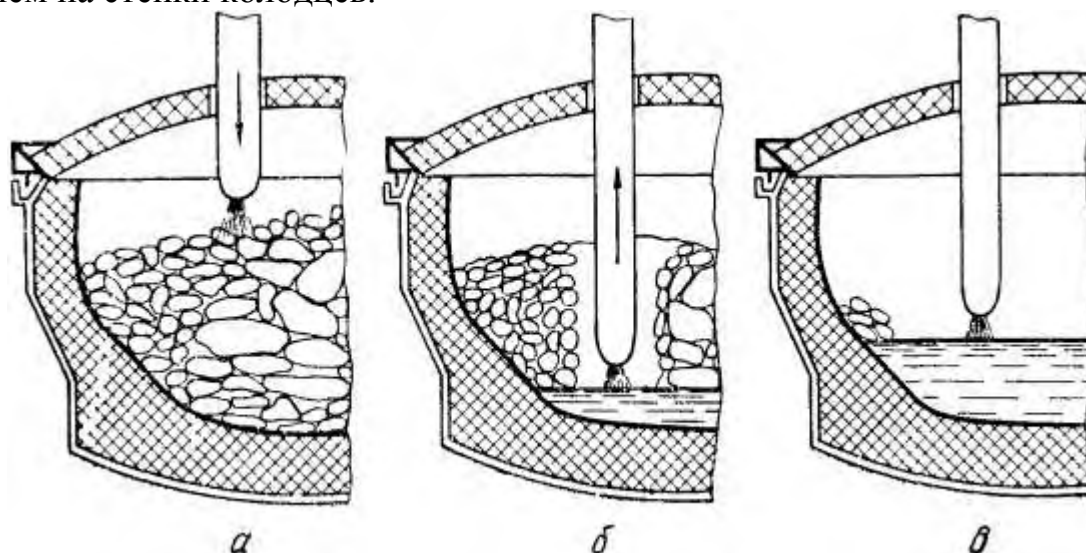
Работа на самой высокой ступени напряжения в период плавления целесообразна по двум причинам.

Во-первых, чем выше напряжение, тем при той же мощности меньше сила тока и тем меньше потери в цепи, т. е. тем выше электрический к.п.д.

Во-вторых, чем выше напряжение, тем длиннее дуга и тем на большую поверхность шихты распространяется ее излучение.

Если шихта подобрана и уложена правильно, то расположенная сверху мелкая шихта быстро проплавляется и дуги погружаются в шихту, не оказывая на футеровку заметного воздействия. В этом случае расплавление с самого начала можно вести на максимальной мощности.

Дуги прожигают в твердой шихте колодцы диаметром на 30-40% больше диаметра электродов. В процессе прожигания колодцев тепловосприятие шихты максимально, так как дуга горит непосредственно в твердой шихте, а боковое излучение дуг воспринимается стенками колодцев. Через 30-40 мин, считая от начала плавления, электроды опускаются в крайнее нижнее положение – до поверхности скопившегося на подине жидкого металла (рисунок 2.1, б). С этого момента скорость плавления несколько замедляется, так как тепло аккумулируется в основном жидким металлом, он перегревается и в нем растворяется твердая шихта. Лишь небольшая часть тепла дуги передается твердой шихте излучением на стенки колодцев.



а — начало плавления; б — проплавление колодца; в — конец плавления

Рисунок 2.1 — Этапы плавления шихты

Ускорение плавления шихты вне зоны действия дуг может быть достигнуто применением газо-кислородных горелок. При их использовании продолжительность плавления и расход электроэнергии сокращаются примерно на 15-20%, хотя общий расход топлива на плавку несколько увеличивается. Положительный экономический эффект достигается вследствие более низкой стоимости топлива по сравнению со стоимостью электроэнергии и электродов, а также в результате увеличения производительности печи.

Водоохлаждаемые газо-кислородные горелки в рабочее пространство вводят либо тангенциально и под углом примерно 15° к горизонту через отверстия в стенах либо через свод (рисунок 2.2). Тангенциальное расположение горелок менее удобно, так как они быстро забрызгиваются шлаком. Сводовые горелки в окислительный период используют как фурмы для вдувания кислорода. В пе-

риод плавления для предотвращения чрезмерного окисления шихты соотношение между кислородом и газом поддерживается в пределах 1,0-1,5.

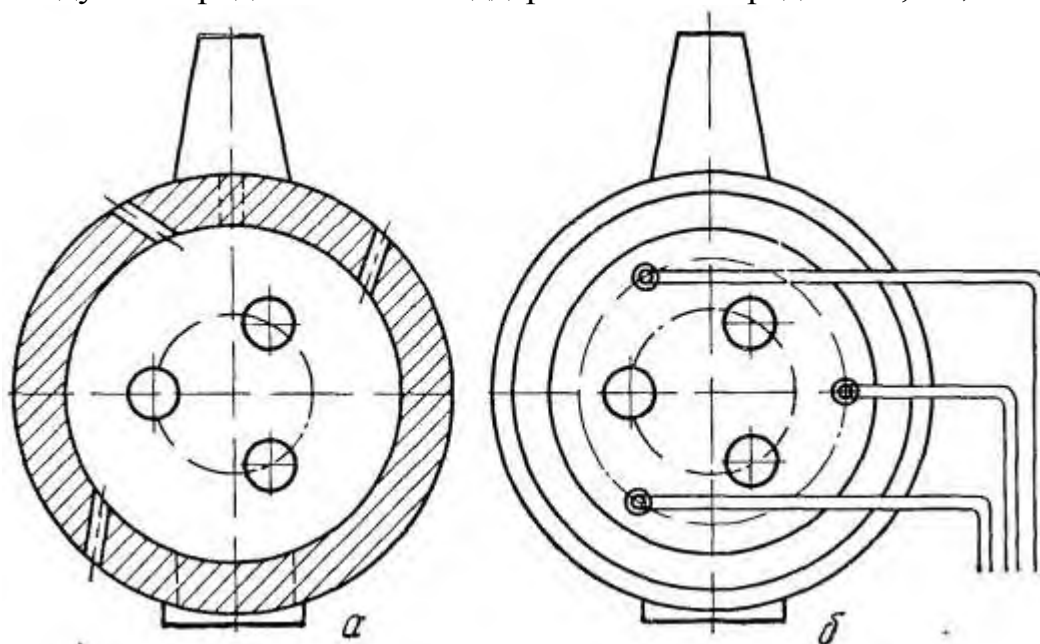


Рисунок 2.2 — Схема расположения боковых (а) и сводовых (б) газо-кислородных горелок

Широко пользуются интенсификацией в период плавления при помощи газообразного кислорода, вводимого через водоохлаждаемую фурму или футерованные трубы ($d = 3/4''$) непосредственно в жидкий металл. Выделение значительного количества тепла при окислении железа, марганца, кремния, углерода и других примесей способствует быстрому повышению температуры жидкого металла и растворению в нем оставшейся шихты.

В период плавления кислород целесообразно также применять для подрезки шихты. В процессе плавления отдельные куски шихты свариваются между собой, образуя мосты. При растворении нижних кусков может произойти обвал шихты и вызвать поломку электродов. Часть шихты застревает на откосах и не растворяется в жидкой ванне, а ее расплавление требует значительного времени. И в том и в другом случае необходимо шихту периодически обваливать. Обычно это делается с помощью завалочной машины, но при этом печь приходится отключать, поднимать электроды и через рабочее окно вводить на хоботе завалочной машины мульду и, пользуясь ею, обваливать шихту.

Эта операция значительно упрощается при подрезке шихты кислородом. Для этого струю кислорода направляют под основание застрявших кусков шихты, они оплавляются, и шихта погружается в расплавленный металл.

В процессе плавления происходит окисление примесей, вносимых шихтой. Практически полностью окисляются алюминий, титан, кремний, значительное количество хрома, марганца и других примесей. С целью сокращения длительности окислительного периода в период плавления целесообразно создавать условия, благоприятные для окисления фосфора. Для этого количество руды и извести в завалку надо рассчитывать таким образом, чтобы к концу периода плавления основность шлака была более 1,6 ед., а содержание закиси железа пре-

вышло 12%. При соблюдении этих условий в период плавления окислится более половины внесенного шихтой фосфора.

После полного расплавления шихты и тщательного перемешивания ванны отбирают пробу металла на полный химический анализ и на 3/4 скачивают шлак, вместе с которым удаляется значительная часть окислившегося фосфора. В случае получения в первой пробе пониженного содержания углерода шлак скачивают начисто и, пользуясь коксом или электродным боем, проводится науглероживание металла. Затем в печь присаживают известь с плавиковым шпатом в количестве 1,5-2,0% от массы металла и после их растворения приступают к окислительному периоду.

2.4 Окислительный период

Задачами окислительного периода являются:

1. снижение содержания фосфора ниже допустимых пределов в готовой стали;
2. удаление растворенных в металле газов (водород и азот);
3. нагрев металла до температуры, на 120-130 °С превышающей температуру ликвидуса;

Одновременно с фосфором окисляются и другие примеси металлошихты: углерод, кремний, марганец, хром и др. Если плавка ведется без восстановительного периода, то в окислительный период нужно также удалить серу из металла до содержания ниже допустимого предела.

Окисление фосфора осуществляют присадками железной руды с известью. Начинать присадку руды следует после предварительного подогрева металла, чтобы сразу же после введения руды началось окисление углерода и кипение металла. Руду и известь надо давать равномерными порциями, поддерживая энергичное кипение металла. Шлак в этот период должен быть пенистым, жидкоподвижным и самотеком сходить через порог рабочего окна.

Обеспечение самопроизвольного стекания и обновления шлака необходимо для эффективного удаления фосфора. По мере окисления углерода повышается температура плавления металла и уменьшается скорость окисления углерода. Скорость окисления к концу окислительного периода уменьшается почти в два раза: примерно с 0,6% в начале периода до 0,3% С/ч в конце. Для поддержания энергичного кипения необходимо повышать температуру металла, что затрудняет окисление фосфора, и поэтому снижения содержания фосфора в металле можно достигнуть лишь при постоянном обновлении шлака.

Присаживать очередную порцию руды и извести необходимо при уменьшении интенсивности кипения металла, образовавшегося из предыдущей порции руды. Введение крупных порций руды нежелательно, так как это может вызвать охлаждение металла и кипение будет слабым. Избыток в ванне непрореагировавшей руды при последующем повышении температуры может вызвать очень бурное окисление углерода и привести к выбросу металла и шлака из печи. Во избежание этого руду надо присаживать так, чтобы скорость окис-

ления углерода поддерживалась в пределах 0,4-0,6 % в начале периода и 0,2-0,3 % С/ч в конце.

Для контроля за ходом окислительных процессов регулярно через каждые 5-10 мин отбирают пробы металла, в которых проверяют содержание фосфора и углерода. При содержании фосфора менее 0,020%, если не оговорено его более низкие концентрации, окисление рудой можно прекратить. Правильно организованный температурный режим окислительного периода, постоянное обновление шлака при поддержании его основности в пределах 2,7-3,0 ед. и высоким содержанием в нем закиси железа (15-20%) позволяют без особых затруднений понизить содержание фосфора до 0,010-0,012 % и менее.

Кроме режима фосфора, в окислительный период регламентируется режим углерода. Технологическими инструкциями предусматривается, чтобы за период кипения было окислено не менее 0,3% углерода при выплавке высокоуглеродистой стали, содержащей 0,6% углерода и более, и не менее 0,5% при выплавке среднеуглеродистой и низкоуглеродистой стали. Для крупных печей эти количества могут быть несколько уменьшены. Окисление такого количества углерода необходимо для дегазации металла. Интенсивное кипение ванны, вызванное окислением углерода, является единственным эффективным средством снижения содержания азота в электропечи, причем эффективность дегазации возрастает с увеличением скорости окисления углерода.

Поэтому после понижения до необходимых значений концентрации фосфора окисление углерода целесообразно интенсифицировать. Очень высокие скорости выгорания углерода позволяет получить продувка металла газообразным кислородом. Окисление углерода газообразным кислородом позволяет сократить длительность периода, благодаря чему при расходе кислорода 4-7 м³/т на 5-10% увеличивается производительность печей и на 5-12% снижается расход электроэнергии. В процессе продувки отбираются пробы металла, в которых контролируется содержание углерода. К концу продувки содержание углерода должно быть немного ниже нижнего предела для заданной марки, в результате чего с учетом вносимого ферросплавами углерода и науглероживания от электродов обеспечивается получение заданного содержания его в металле.

Режим марганца в окислительный период обычно не регламентируется. Реакция окисления марганца в окислительный период близка к равновесию, поэтому нормальный ход плавки с необходимым повышением температуры к концу периода сопровождается восстановлением марганца из шлака.

В окислительный период окисляется и хром, причем значительное его количество окисляется еще в процессе плавления. Скачивание шлака в период плавления и постепенное его обновление в течение окислительного периода способствуют дальнейшему окислению хрома и потере его со шлаком.

Тугоплавкие окислы хрома сильно понижают текучесть шлака и затрудняют процесс окисления фосфора. Поэтому использование хромистых отходов на плавках с полным окислением нецелесообразно.

Достижением нужного содержания фосфора, углерода и необходимой температуры исчерпываются основные задачи окислительного периода. После присадки последней порции руды или окончания продувки кислородом, делают

выдержку в течение не менее 10 мин, во время которой отбирают пробу на анализ и замеряют температуру металла. Общая продолжительность окислительного периода составляет 40-70 мин, а в случае применения газообразного кислорода она может быть сокращена до 30 мин.

В окислительный период удаляется 40-60% серы, вносимой шихтой. Успешной десульфурации способствует высокая основность шлака (не менее 2,7-2,8) и его постоянное обновление. Благоприятные условия для удаления серы в окислительный период создаются при введении вместе кислородом порошкообразной извести.

2.5 Раскисление. Восстановительный период

По окончании окислительного периода сталь раскисляют. При этом возможны два варианта выполнения этой технологической операции:

1. глубинное раскисление без наводки восстановительного шлака, т. е. без восстановительного периода;

2. раскисление в восстановительный период.

Глубинное раскисление без скачивания окислительного и наводки восстановительного шлака начали применять в последние годы и толчком к развитию этого метода послужило значительное увеличение мощности печных трансформаторов, которая в восстановительный период используется в малой степени. Минуя восстановительный период выплавляют главным образом углеродистую и низколегированную конструкционную сталь.

При выплавке стали под одним шлаком (без наводки восстановительного шлака) после окончания окислительного периода в печь присаживают кусковой 45%-ный или 75%-ный ферросилиций (0,1%) и ферромарганец из расчета получения среднего заданного содержания марганца в металле. Затем при выплавке хромсодержащей стали в печь присаживают феррохром из расчета получения среднего заданного содержания хрома в стали. Длительность раскисления в печи составляет 10-20 мин, после чего сталь выпускают в ковш, где ее окончательно раскисляют ферросилицием и алюминием.

Выплавка стали под одним шлаком позволяет сократить длительность плавки и уменьшить расход электроэнергии и раскислителей, а также упростить ведение плавки. Однако при выплавке стали, к которой предъявляются повышенные требования по свойствам и в которой необходимо получить пониженное содержание окисных включений, особенно при низком содержании углерода (<0,15-0,20%), или низкое содержание серы (<0,015-0,020%), а также при выплавке стали, в которую вводится значительное количество окисляемых легирующих элементов (Al, Ti, V, W, Cr), раскисление проводят под восстановительным шлаком, который наводят после скачивания окислительного шлака.

Основными задачами восстановительного периода являются:

1. раскисление металла;
2. удаление серы;
3. корректировка химического состава металла;
4. регулирование температуры металла;

5. подготовка к выпуску высокоосновного жидкоподвижного шлака.

В начале восстановительного периода содержание углерода должно быть на 0,03-0,10% меньше нижнего предела в готовой стали. При меньшем содержании углерода металл необходимо науглеродить. Для этого на поверхность металла после скачивания окислительного шлака присаживают кокс или электродный бой и металл перемешивают. При этом усваивается примерно 60-70% углерода кокса и 70-80% углерода, вносимого электродным боем.

Восстановительный период начинается наведением известкового шлака из смеси извести, плавленого шпата и шамота в соотношении 5:1:1 в количестве 2,0-3,5% от массы металла. Для быстрого проплавления шлаковой смеси первые 10-15 мин после включения тока рекомендуется работать на средней ступени напряжения трансформатора. Остальную часть рафинировки проводят на низшей ступени напряжения, за исключением случаев присадки большого количества ферросплавов. Подводимую мощность регулируют в соответствии с температурой металла.

В течение длительного времени при выплавке легированных сталей применяли «классическую» технологию, основанную на диффузионном раскислении металла через шлак, когда раскисляющие вещества (кокс, ферросилиций, силикокальций, алюминий) в виде порошков присаживали к шлаку. Углерод, кремний, кальций и алюминий в шлаке восстанавливают окислы железа, марганца и хрома, и в объеме печи образуется восстановительная атмосфера. Понижение содержания закиси железа в шлаке вызывает переход кислорода из металла в шлак.

Диффузионное раскисление можно проводить под белым или карбидным шлаком. Для получения белого шлака в начале восстановительного периода шлак обрабатывают порошком кокса, а затем смесью порошков кокса и 75%-ного ферросилиция, причем количество кокса в смеси постепенно уменьшается. После 25-40 мин выдержки шлак светлеет (в нем понижается содержание окислов железа, марганца, хрома). При остывании такой шлак рассыпается в белый порошок. Расход кокса на раскисление под белым шлаком составляет 1-2 кг на 1т металла.

При увеличении расхода кокса до 2-3 кг/т количества углерода может хватить не только для восстановления окислов тяжелых металлов и компенсации окисляющего влияния атмосферы, но некоторая его часть может пойти на восстановление окиси кальция по реакции $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$.

Образованию карбида кальция способствуют высокие температуры и концентрация в шлаке углерода и окиси кальция, а также и восстановительная атмосфера. В герметизированной печи образуется карбидный шлак, содержащий более 2% CaC_2 . Такой шлак при определенных содержании взвешенного углерода и концентрации карбида кальция при охлаждении рассыпается в виде серого или темно-серого порошка.

Выдержка под карбидным шлаком сопровождается значительным науглероживанием металла, поэтому можно раскислять под карбидным шлаком только высокоуглеродистые стали. Если выплавляют среднеуглеродистые стали,

вместо карбидного шлака наводят слабокарбидный, содержащий 1,0-1,5% CaC_2 , что уменьшает скорость науглероживания металла.

Карбид кальция хорошо смачивает металл, поэтому при выпуске и разливке возможно запутывание карбидного шлака в металле с образованием грубых шлаковых включений. Во избежание этого перед выпуском плавки карбидный шлак необходимо перевести в белый, для чего в нем надо окислить избыточный углерод и карбид кальция. За 20-30 мин до выпуска в печь присаживают шлаковую смесь с повышенным содержанием плавикового шпата и шамота и на некоторое время оставляют открытым рабочее окно. Усиленный приток воздуха окисляет углерод и карбид кальция, в результате чего шлак превращается в белый.

Диффузионный обмен между шлаком и металлом протекает с малой скоростью, поэтому раскисление металла через шлак требует значительного времени, что является крупным недостатком этого способа раскисления. Поэтому на крупных печах, имеющих меньшую удельную поверхность раздела «металл-шлак», проводят «глубинное» раскисление путем введения раскислителей непосредственно в жидкий металл. Этим способом можно за несколько минут удалить из металла кислорода больше, чем за 1,5-2,0 ч диффузионного раскисления.

Восстановительный шлак при этом препятствует поступлению кислорода из атмосферы в металл, способствует удалению включений – продуктов глубинного раскисления и, что очень важно, способствует десульфурации металла. Поскольку все эти задачи в восстановительный период целесообразно решать комплексно и параллельно, в настоящее время для выплавки металла ответственного назначения наибольшее распространение получила технология, сочетающая преимущества диффузионного и глубинного раскисления.

По этой технологии после скачивания окислительного шлака на голое зеркало металла присаживают металлические раскислители в виде ферромарганца, ферросилиция, силикомарганца, силикохрома, алюминия, сплава АМС и других сплавов. Количество присадок должно быть таким, чтобы обеспечить содержание марганца на нижнем пределе в стали заданной марки и ввести 0,15-0,20% кремния и примерно 0,5-0,10% алюминия. Затем присаживают шлаковую смесь и после образования жидкого шлака его обрабатывают раскислительной смесью. Уже первые порции раскислительной смеси наряду с порошком кокса содержат молотый ферросилиций; в дальнейшем количество кокса в раскислительных смесях уменьшают.

В результате обработки такими смесями в печи образуется слабокарбидный или белый шлак, содержащий менее 0,6% FeO и 50-60% CaO при основности 2,5-3,0 и характеризующийся высокой десульфурующей способностью. Количество кислорода в металле благодаря глубинному раскислению резко уменьшается, что повышает скорость десульфурации. Увеличению скорости десульфурации способствует повышение жидкотекучести шлака при сохранении высокой основности его, что достигается присадками плавикового шпата. Плавиковый шпат, кроме того, может оказывать прямое влияние на десульфурацию, образуя с серой CaS и летучее соединение SF_6 .

Таким образом, в восстановительный период электроплавки создаются исключительно благоприятные условия для удаления серы. Коэффициент распределения серы между шлаком и металлом составляет 15-40 ед., а при наиболее благоприятных условиях достигает 60 ед.

Одной из главных задач восстановительного периода является доводка металла до заданного химического состава. Поэтому в начале этого периода, сразу после образования шлакового покрова, отбирают пробу металла на определение содержания углерода, марганца, хрома и никеля. При диффузионно-осадочном раскислении марганец вводится из расчета получения нижнего предельного содержания, имея в виду, что некоторое количество марганца может восстановиться из небольшого количества шлака, сохранившегося после окислительного периода.

Феррохром вводят в печь в начале восстановительного периода. Усвоение хрома составляет 96-98%.

Никель обладает значительно меньшим сродством к кислороду, чем железо, и поэтому в ванне практически не окисляется. Основную часть никеля, определяемую из расчета получения его на нижнем предельном содержании, дают в завалку. Усвоение никеля при выплавке стали составляет 98-100%.

Практически в ванне печей не окисляется и молибден, поэтому на плавках с окислением ферромolibден дают соответственно нижнему пределу в период кипения. На плавках стали с высоким содержанием молибдена его можно давать в завалку.

Ванадий легко окисляется, поэтому феррованадий присаживают в восстановительный период в хорошо раскисленный металл не позднее чем за 15 мин до выпуска при введении 0,5% феррованадия и не позднее чем за 30 мин при более значительных присадках.

Очень легко окисляется титан. Ферротитан присаживают в хорошо нагретый и хорошо раскисленный металл за 10-15 мин до выпуска. Легирование металлическим титаном или 60%-ным ферротитаном можно проводить в ковше. Усвоение титана составляет около 50%.

Длительность восстановительного периода определяется временем, необходимым для образования раскислительного шлака, раскисления шлака и металла, десульфурации и легирования металла. Обычно эта длительность составляет 70-120 мин. Для увеличения производительности печей эти процессы целесообразно интенсифицировать в печи или осуществлять раскисление, обессеривание и легирование вне печи.

2.6 Выпуск металла

При классической технологии во время выпуска ещё раз используют раскисляющую и десульфурующую способность белого печного шлака. Для этого в сталеразливочный ковш по возможности полно сливают шлак, а затем на него выпускают металл. Наклоном печи регулируют время выпуска металла из печи от 5 до 10 минут, при необходимости в ковш дают материалы, содержащие элементы с сильным сродством к кислороду (Al, Ti, Ca и т.д.). После

окончания выпуска металла наклоном печи в противоположную сторону через рабочее окно сливают остатки шлака.

2.7 Совершенствование технологии электроплавки

Классическая технология электроплавки с восстановительным периодом сложна и требует много времени на реализацию (3-5 часов). В настоящее время задачи глубокой десульфурации, а также раскисления и легирования металла успешно решаются при ковшевой обработке стали. Поэтому современная технология выплавки стали имеет несколько вариантов, существенно отличающихся от классического.

Наиболее распространённая из них – технология без восстановительного периода. Для её реализации лучше всего подходят печи, во-первых, с трансформатором удельной мощностью 0,7-0,8 МВт/т и дополнительными топливно-кислородными горелками, что позволяет максимально форсировать нагрев и плавление лома, во-вторых, с кислородными фурмами, способными вдуть в ванну 0,3-0,8 м³/(т-мин) кислорода, а также порошковые материалы, что даёт возможность сократить до минимума окислительный период; в-третьих, с донным выпуском металла, что обеспечивает отсечку окислительного печного шлака.

При такой технологии успешно решаются вопросы обезуглероживания, дефосфорации, а также нагрева металла. Остальное – раскисление и легирование, а также глубокая десульфурация стали – осуществляется в ковше. Наилучшим способом это реализуется в агрегате печь-ковш.

В современных ДСП, в зависимости от состава шихты, общая продолжительность плавки составляет от 45 минут до 1,5 ч, а удельный расход электроэнергии – 310-380 кВт ч/т.

Своими особенностями отличаются плавки в ДСП при применении в шихте металлизированного сырья или жидкого чугуна.

Однородный гранулометрический и химический состав металлизированного сырья (как правило, это восстановленные окатыши) позволяет организовать дозированную и непрерывную его подачу во время периода плавления. При этом горение дуг более устойчивое, увеличивается полезное использование мощности трансформатора печи, а акустический шум уменьшается. Плавление металлизированного сырья сопровождается образованием жидкоподвижного, пенистого первичного шлака, который непрерывно, самотёком уходит из печи. Это обеспечивает быструю и глубокую дефосфорацию. В отличие от лома металлизированное сырьё отличается низким содержанием серы (до 0,025%) и, особенно, цветных металлов, например, меди (менее 0,005%).

Практика работы дуговых печей ОЭМК выявила, что наилучшие технико-экономические показатели достигаются при доле металлизированных окатышей в металлошихте в 40-50%. Дальнейшее увеличение этой доли вызывает некоторое уменьшение производительности.

В металлизированном сырьё содержится 2-5% пустой породы, для её офлюсования, а также нормального шлакообразования в печь через свод подают из-

весть, расход которой удваивается против обычного. После полного расплавления проводят короткий (10-15 мин) окислительный период, фактически доводку. Затем металл выпускают в ковш и подвергают внепечной обработке.

Следует отметить, что из-за дополнительного расхода тепла на расплавление пустой породы и флюсов расход электроэнергии увеличивается на 10-15%. Для компенсации этого разрабатываются способы предварительного подогрева металлизированного сырья перед завалкой в печь, подобно подогреву лома в ДСП системы «ФУКС-Системтехник».

Появление ДСП, приспособленных для интенсивной продувки ванны кислородом, позволило использовать в их шихте жидкий чугун. Продувка сопровождается нагревом ванны за счёт окисления примесей чугуна и интенсивным образованием пенистого шлака, который самотёком частично уходит из печи. Таким образом обеспечиваются успешные обезуглероживание и дефосфорация металла. Раскисление и легирование металла также осуществляются в ковше на выпуске и при внепечной обработке. Полученные результаты свидетельствуют, что продолжительность плавки с применением жидкого чугуна может быть менее одного часа, а удельный расход электрической энергии за счёт физического и химического тепла чугуна может быть снижен до 200-240 кВт·ч/т и менее.

К современным техническим решениям и технологическим приёмам, повышающим эффективность электродуговой плавки, относятся:

- начало плавления лома с остатком порции металла предыдущей плавки - «болота»;
- применение топливокислородных горелок не столько как альтернативного источника энергии, сколько для ускоренного плавления лома в «холодных» зонах рабочего пространства печи;
- стремление работать с длинной дугой, которая максимально заглублена под уровень пенистого печного шлака;
- широкое применение технического кислорода с удельным расходом до 50 м³/т);
- эркерный бесшлаковый выпуск стали;
- непрерывное пневматическое перемешивание ванны жидкого расплава;
- исключение операции заправки ванны после каждой плавки за счет применения водоохлаждаемых элементов стен и свода и новых типов высококачественных периклазоуглеродистых огнеупоров для ванны печи.
- частичная или полная замена стального лома твердым или жидким чугуном или прямовосстановленным железом (DRI или HBI).

3 Методика выполнения работы

Лабораторная работа проводится на промплощадке фасоннолитейного цеха (ФЛЦ) АО «Уральская Сталь».

Перед началом лабораторной работы студент обязан изучить технологический процесс выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи (п. 2) и быть готовым ответить на контрольные вопросы.

Работа заключается в наблюдении за технологическими операциями выплавки стали в ДСП-3, фиксации их продолжительности и содержания, а также изучении паспорта плавки.

Порядок проведения работы:

1. Ознакомиться с конструкцией сталеплавильного агрегата.
2. Составить перечень контрольно-измерительной аппаратуры.
3. Ознакомиться с оборудованием, которое обслуживает электродуговую печь.
4. Выполнить хронометраж плавки, наблюдая за действиями мастера, сталевара и подручных, по показаниям контрольно-измерительной аппаратуры, за работой обслуживаемого оборудования агрегат. При хронометраже плавки фиксировать:

- время начала и конца каждой операции и этапа плавки;
- применяемое оборудование и приспособления;
- количество и порядок завалки шихтовых материалов;
- вид дополнительных присадок и их количество по ходу плавки;
- время отбора проб металла и шлака, измерения температуры металла;
- результаты экспресс-анализа проб и измерений температуры;
- показания контрольно-измерительных приборов;
- внешние признаки поведения сталеплавильной ванны.

5. Зафиксировать основные параметры плавки в паспорте плавки.

6. Оформить отчет по работе.

В отчете по лабораторной работе быть следующие разделы:

1. Название и цель работы.
2. Технологические операции электродуговой плавки.
3. Перечень контрольно-измерительной аппаратуры, оборудования и приспособлений, обслуживающих ДСП.
4. Хронометраж плавки
5. Паспорт плавки.
6. Выводы.

Защита лабораторной работы проводится при наличии отчёта по контрольным вопросам.

4 Контрольные вопросы

1 Перечислите разновидности технологии электродуговой плавки и опишите их особенности

2 В чем заключаются особенности плавки стали на углеродистой («свежей») шихте?

3 Перечислите технологические операции выплавки стали с полным окислением

4 В чём заключаются основные недостатки плавки стали на углеродистой шихте с полным окислением?

5 Расскажите об особенностях технологии выплавки стали методом переплава.

6 Перечислите достоинства и недостатки технологии выплавки стали методом переплава.

7 В чём заключается отличительная особенность технологии электроплавки с частичным окислением от других известных вариантов технологии?

8 В чём заключается работа по подготовке печи к плавке?

9 В каком порядке следует укладывать шихтовые материалы в корзину (бадью) при загрузке электродуговой печи?

10 На что влияет порядок укладки шихтовых материалов в корзину при загрузке электродуговой печи?

11 Укажите оптимальное соотношение фракционного состава металлического лома в шихте ДСП.

12 Какой запас по углероду необходимо иметь в начале электродуговой плавки и за счёт чего он создаётся?

13 Задачи и способы снижения продолжительности периода плавления.

14 Задачи окислительного периода и применяемые технологические приёмы для их решения.

15 Варианты проведения раскисления стали при электродуговой плавке.

16 Перечислите основные задачи восстановительного периода.

17 Расскажите о современных технических решениях и технологических приёмах, повышающих эффективность электродуговой плавки.

Лабораторная работа № 3. Изучение устройства и принципа действия лабораторных электропечей

1 Цель работы

- изучение устройства лабораторных электропечей;
- изучение принципа действия лабораторных электропечей.

2 Теоретическое введение

Электросталеплавильный способ является основным в производстве качественных и высоколегированных чугунов и сталей. Он обеспечивает получение разнообразных по составу высококачественных чугунов и сталей с низким содержанием вредных примесей: фосфора, серы, растворенных газов.

Выделение тепла в электропечах происходит либо в самом нагреваемом металле, либо в непосредственной близости от его поверхности. Это позволяет в сравнительно небольшом объеме сконцентрировать большую мощность и нагревать металл с большой скоростью до высоких температур, в отдельных случаях вплоть до температуры кипения. Расход тепла и изменение температуры металла при электроплавке достаточно просто поддаются контролю и регулированию.

В отличие от мартеновского и конверторного процессов выделение тепла в электропечах не связано с потреблением окислителя. Поэтому электроплавка может быть осуществлена в любой атмосфере: окислительной, восстановительной или нейтральной, и в широком диапазоне давлений – в условиях вакуума, при атмосферном или избыточном давлении. Изменяя состав атмосферы и давление газовой фазы, можно менять в нужную сторону условия протекания окислительно-восстановительных процессов, производить по ходу плавки вакуумирование металла или насыщать его или иным элементом из газовой фазы.

Электропечь лучше других агрегатов приспособлена для переработки металлического лома. Вся шихта в электропечь может быть загружена в один или два приема, причем твердой шихтой может быть занят весь объем печи, и это не вызывает затруднений при ее расплавлении. Период плавления в электропечах значительно короче, чем в мартеновских печах, работающих скрап-процессом.

В электрометаллургии применяются электрические печи трех типов.

К первому типу относятся дуговые печи прямого и косвенного нагрева. В них в качестве источника тепла используется тепло электрической дуги, которая горит либо между электродами (косвенный нагрев), либо между электродами и поверхностью металла (прямой нагрев). Дуговые печи косвенного нагрева применяются в основном для расплавления цветных металлов и сплавов, имеющих относительно низкую температуру плавления. Дуговые печи прямого нагрева являются основными печами, применяемыми в сталеплавильном производстве для получения высококачественной стали, а также большинства ферросплавов.

В печах второго типа - индукционных электрический переменный ток, проходя через индуктор, вызывает появление вихревых токов в шихтовых металлических материалах. Под воздействием этих токов шихта нагревается и плавится. Индукционные печи бывают с металлическим сердечником и безсердечниковые. Первые из них используются для плавления чугуна и некоторых сплавов цветных металлов. Безсердечниковые печи применяются для плавления стали.

Электрическими печами 3-го типа являются печи сопротивления. В них используется тепло, выделяющееся при пропускании электрического тока через элемент сопротивления. Большинство печей сопротивления применяется в качестве лабораторного оборудования. Также время промышленности широко используется печь электрошлакового переплава работающие по тому же принципу.

Устройство и принцип действия промышленных электрических печей обычный излагаются в курсах специализации, а с конструкцией лабораторных установок студенты знакомятся в ходе лабораторного практикума.

Данная работа выполняется с целью изучения устройства и принципа действия электрических плавильных печей, применяемых в учебной и научно-исследовательской работе студентов в лабораториях кафедры металлургических технологий и оборудования. Использование лабораторных электропечей в учебном процессе ведется при изучении всех курсов и, прежде всего, при изучении металлургии черных металлов, теории и технологии производства черных металлов, а также технологии сталеплавильного производства. Выполнив данную работу студент получает возможность четко обосновать выбор лабораторной электропечи для проведения конкретной плавки металла или шлака в условиях лаборатории кафедры по программе изучаемых дисциплин или курсовой научно-исследовательской работы (КНИР).

3 Методика выполнения работы

Изучение устройства и принципа действия электрических печей проводится путем ознакомления с элементами конструкции лабораторных установок, разбора схем их электроснабжения, зарисовки эскизов и составления отчёта. В лаборатории кафедры имеются индукционная тигельная печь и две печи сопротивления разных типов. В ходе выполнения работы студенты знакомятся с устройством и принципом действия всех типов печей.

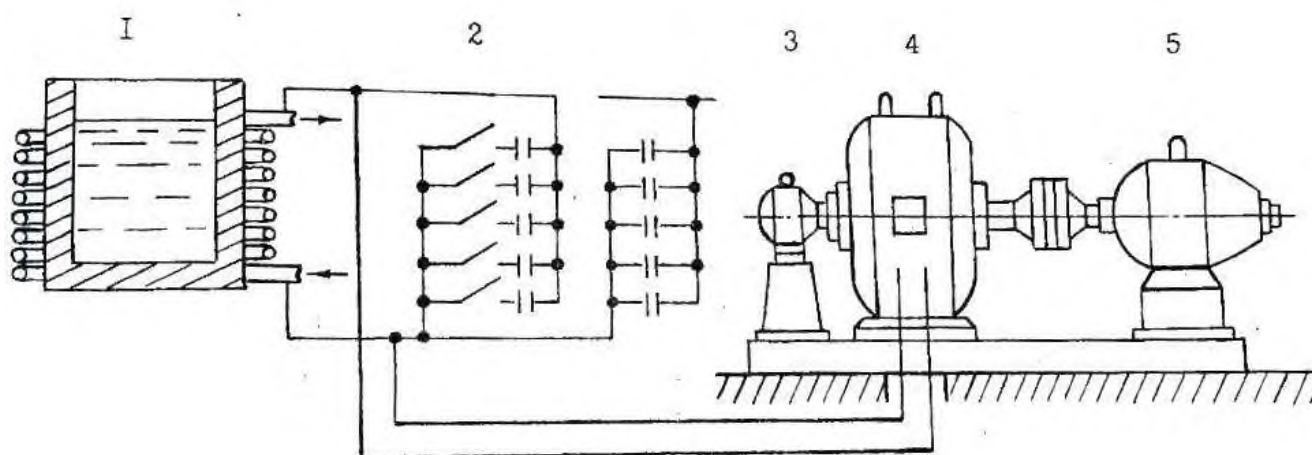
Изучение конструкции лабораторных электропечей производится при выключенном питании. Перед началом выполнения работы необходимо убедиться в отключении электропитания печей. Для ознакомления с внутренними элементами конструкции печей доступ к нему производится только в присутствии преподавателя. Открывание предохранительных кожухов (колпаков) осуществляется аккуратно для исключения возможности нанесения травм. Запрещается без необходимости трогать кнопки и ручки на щитах управления печей, настройки приборов и т.д.

3.1 Индукционная тигельная печь ИТП-15

Индукционные печи – это разновидность электрических печей, работа которых основана на принципе работы трансформатора. В индукционных печах переменное электромагнитное поле наводится с помощью спиралеобразного, охлаждаемого водой или воздухом индуктора (первичная обмотка), по которому пропускают первичный переменный электрический ток.

В качестве вторичной обмотки используется непосредственно переплавляемый литейный сплав или стенка тигля. Именно в них наводится вторичный ток, который генерируется в тепловую энергию.

Принципиальная схема индукционной плавки металла в тигельной печи приведена на рисунке 3.1.



- 1 – печь; 2 – конденсаторные батареи; 3 – возбудитель;
4 – преобразователь повышенной частоты;
5 – электродвигатель

Рисунок 3.1 – Индукционная плавка металлов в тигельной печи

Печь представляет собой плавильный тигель цилиндрической формы, выполненный из огнеупорного материала и помещенный в полость индуктора, подключенного к источнику переменного тока (рисунок 3.1). Металлическая шихта (материал, подлежащий плавлению) загружается в тигель и, поглощая электрическую энергию, плавится. В тигельной печи первичной обмоткой служит индуктор, обтекаемый переменным током, а вторичной обмоткой и одновременно нагрузкой – сам расплавляемый металл, загруженный в тигель и помещенный внутри индуктора, в котором индуцируется ЭДС.

Магнитный поток в тигельной печи проходит в той или иной степени по самой шихте. Поэтому для работы печи без сердечника имеют большое значение магнитные свойства, а также размеры и форма кусков шихты, определяющие плотность её укладки в тигле.

Под действием наводимой в металле ЭДС в металле циркулирует ток. За счет джоулева тепла, выделяющегося в металле при прохождении тока, металл

разогревается и плавится.

Магнитное поле индуктора замыкается через воздушную среду, поэтому часть подводимой к индуктору мощности теряется на преодоление сопротивления воздушной среды. При питании печей током промышленной частоты электрический к.п.д. печи сохраняется на достаточно высоком уровне только у печей, садка которых составляет несколько тонн. На величину электрического к.п.д. печи благоприятно влияет увеличение частоты тока, подаваемого к индуктору. Поэтому с уменьшением ёмкости печи (диаметра тигля) к индуктору следует подводить ток большей частоты.

Минимальное значение частоты тока можно определить по формуле:

$$f_{min} = 25 \cdot 10^2 \cdot \frac{\rho}{d^2} ,$$

где f – частота тока, Гц;

ρ – удельное электросопротивление проплавляемого металла, Ом·м;

d – внутренний диаметр тигля, м.

С этой целью печь лабораторная индукционная тигельная печь ИТП-15 оборудована мотор-генератором мощностью 15 кВт при частоте тока 2,4 кГц.

Индуктор электропечи обладает большой реактивной мощностью, вызванной самоиндукцией. В некоторых случаях реактивная мощность в несколько раз превышает активную, а $\cos \varphi$ не превышает 0,10. Для компенсации самоиндукции параллельно индуктору в цепь включаются конденсаторные батареи.

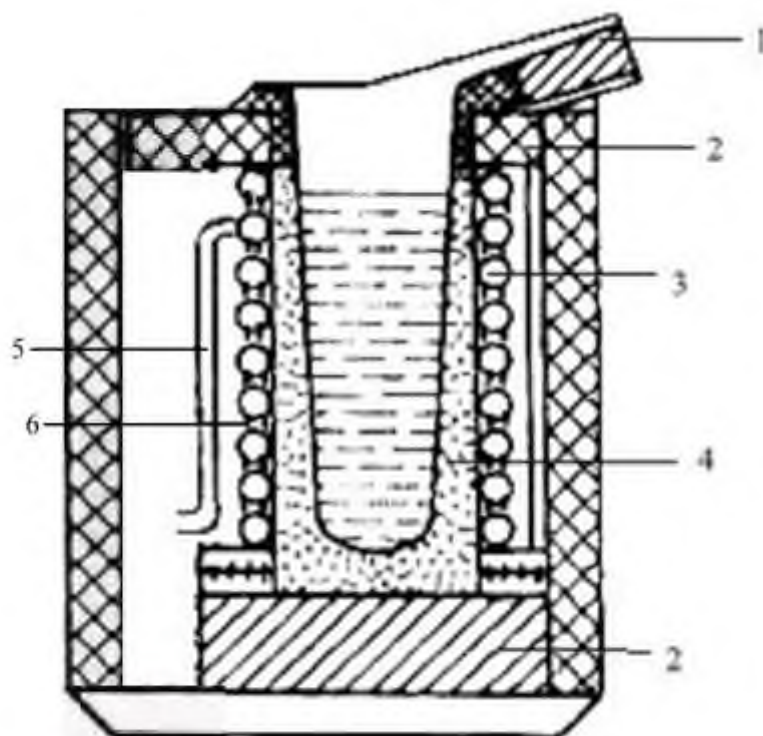
Каждый индукционная печь имеет несколько конденсаторов, так как необходимая ёмкость их меняется по ходу плавки. В начале процесса плавления шихтовых материалов, когда металл в тигле находится в виде разобренных кусков, требуется включать большое число конденсаторов. По мере расплавления шихты требуемая ёмкость конденсаторов уменьшается.

Токоподвод от щита управление для индуктора печи выполняется из медных шин и водоохлаждаемых кабелей.

Индуктор печи изготавливается из медных водоохлаждаемых трубок. Чтобы исключить возможность приближения витков индуктора друг к другу и предотвратить, таким образом, возможность короткого замыкания в индукторе, каждый виток его с помощью изоляционных материалов жестко крепится к вертикальным планкам.

Индукционная тигельная печь ИТП-15 мощностью до 15 кВт предназначена для плавки черных и цветных металлов и сплавов. Максимальная загрузка по стали (и чугуна) до 4 кг, по меди (и др. цветным металлам и сплавам) – до 10 кг.

Схема плавильного блока индукционной печи ИТП-15 показана на рисунке 3.2. Рабочее пространство печи изготовлено набивным из магнезитового порошка и имеет форму тигля. Индуктор от набивки изолирован асбестовой прокладкой, которая служит и слоем теплоизоляции, защитой от просыпания огнеупорного порошка между витками индуктора в процессе набивки. Набивка тигли ведётся использованием шаблона из листового железа.



1 – сливной носок; 2 – изоляционная плита печи; 3 – вдуоохлаждаемый индуктор; 4 – огнеупорная набивка; 5 – токопровод; 6 –асбестовая прокладка
 Рисунок 3.2 – Схема плавильного блока индукционной тигельной печи ИТП-15

Корпус печи изготовлен из асбесто-цементных плит и отдельных металлических деталей. В корпусе печи не допускаются замкнутые металлические контуры, так как при включении они будут греться, что приведет к преждевременному выходу печи из строя.

В состав плавильной установки помимо собственно тигельной печи с механизмом наклона входят источник питания (преобразователь частоты или трансформатор) со своим вспомогательным оборудованием и аппаратурой, компенсирующая конденсаторная батарея (коэффициент мощности печи до компенсации составляет 0,1-0,2), токоподвод, аппаратура автоматики, защиты и сигнализации, а также чиллер, обеспечивающий охлаждение оборотной воды. Внешний вид лабораторной плавильной установки представлен на рисунке 3.3.



1. блок индукционного нагревателя; 2 - блок конденсаторной батареи;
3 - плавильный узел (в сборе, с устройством наклона печи); 4 – чиллер
Рисунок 3.3 – Лабораторная плавильная установка индукционной тигельной
печи ИТП-15

Достоинствами индукционных тигельных печей являются

- генерирование тепловой энергии непосредственно в нагреваемом материале, что значительно снижает потери энергии;
- высокая производительностью вследствие высокой удельной мощности;
- металл из тигля сливается полностью;
- возможность создания в плавильной тигельной печи окислительной, нейтральной и восстановительной атмосферы независимо от давления.
- достижение температуры расплава лимитируется только стойкостью огнеупорной футеровки печи;
- незначительный угар легирующих элементов;
- пониженное содержание газов в расплаве (незначителен процесс их поглощения).

Основным технологическим недостатком ИТП всех типов является:

- низкая температура шлака и, соответственно, малая его активность, т.е. шлак не обладает эффективным рафинирующим свойством;
- малая стойкость футеровки, особенно основной.

3.2 Камерная печь с неподвижным подом СНОЛ-12/16

Среди садочных печей камерные печи нашли в промышленности наибольшее применение благодаря удобству в эксплуатации. Они изготавливаются с широким диапазоном уровня рабочей температуры и находят применение для самых различных видов термообработки как мелких деталей в поддонах, так и единичных, крупных изделий. Нагревательные элементы в этих печах устанавливаются в зависимости от рабочей температуры на стенках, поду рабочей камеры, реже на своде, а в крупных печах – и на внутренней поверхности футеровки дверцы. При этом достигается большая равномерность нагрева камеры печи. В зависимости от вида термообработки камерные печи могут работать с защитной (серия СНЗ) или окислительной воздушной атмосферой (серия СНО).

Эти печи благодаря своей универсальности и простоты конструкции используются как во вспомогательном, так и в основном производстве крупных предприятий, в ремонтных мастерских, в исследовательских лабораториях.

По температурному уровню, создаваемому в рабочем пространстве, выделяют следующие группы печей: низкотемпературные (с температурой нагрева до 700 °С), среднетемпературные (700-1200 °С и высокотемпературные (с рабочей температурой выше 1200-1250 °С.).

Металлургическая лаборатория НФ оснащена камерной печью сопротивления с неподвижным подом и окислительной атмосферой марки СНОЛ 12/16 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Камерная лабораторная печь сопротивления СНОЛ 12/16

Электропечи серии СНОЛ (печи сопротивления с неподвижным подом, окислительной атмосферой, лабораторные) широко применяются в материаловедческих исследовательских лабораториях. Они компактны, имеют большую производительность, небольшой расход электроэнергии.

Технические характеристики электропечи СНОЛ 12/16:

- полезный объем рабочего пространства – 12 литров;
- максимальная температура нагрева 1650 °С;
- мощность 8,0 кВт;
- напряжение 220 В;
- размеры рабочей камеры: ширина × длина × высота – 200×300×200 мм;
- вес 80 кг.

Камерные лабораторные электропечи с полезным объемом 12 литров на рабочую температуру до 1650°С обеспечивают возможность продолжительной работы при высоких температурах в воздушной среде и проведение сверхбыстрого нагрева, за 30-40 минут, до номинальной температуры. Такие уникальные качества достигнуты благодаря использованию термостойких нагревателей нового поколения из хромита лантана, а также высококачественной теплоизоляции из керамоволокнистого материала.

Камерная электропечь типа СНОЛ состоит из корпуса, футеровки, нагревателей и дверцы. Корпус электропечи сборный из штампованных стальных элементов. Футеровка выполнена из высокоглиноземистого пористого огнеупорного материала и теплоизоляционных материалов. Нагреватели выполнены из сплава высокого электрического сопротивления – хромита лантана. Дверца штампованная, футерованная.

Нагрев загруженных в печь материалов осуществляется за счёт излучения тепла от раскаленных электродов. В печи вертикально установлено десять электродов на боковых стенках. Размещение нагревателей на стенках обеспечивает простоту и надежности конструкции, а также равномерный нагрев в соответствии с требованиями общепромышленных технологий. Контроль температуры осуществляется с помощью термопары.

Электропечи имеют ряд преимуществ перед топливными печами:

- отсутствие дымовых газов;
- не требуется дымососной системы;
- хорошая теплоизоляция;
- легкость регулирования температуры.

Недостаток этих электропечей:

- наличие окислительной атмосферы в рабочем пространстве.
- низкая стойкость нагревательных элементов и, связанные с этим, высокие эксплуатационные расходы;
- длительный нагрев изделий, так как передача тепла осуществляется излучением;
- необходимость заземления печей по технике безопасности, большие затраты при эксплуатации.

3.3 Печь сопротивления (Таммана)

Печь Таммана является печью сопротивления косвенного нагрева, так как элементом сопротивления в такой печи служит специальный цилиндрический полый графитовый нагреватель.

Принцип работы печей Таммана основан на том, что при прохождении тока по проводнику в нем выделяется тепло. В соответствии с законом Джоуля – Ленца, количество выделившегося в проводнике тепла (Q) пропорционально квадрату силы тока (I), электрическому сопротивлению (R) проводника и времени прохождения тока (τ):

$$Q = I^2 R \tau.$$

Подбирая определенные материалы с известным сопротивлением и соответствующий источник электрического тока можно получить достаточную мощность для расплавления металлов.

Нагревательный элемент печи Таммана (рисунок 3.5) выполнен в виде трубы.

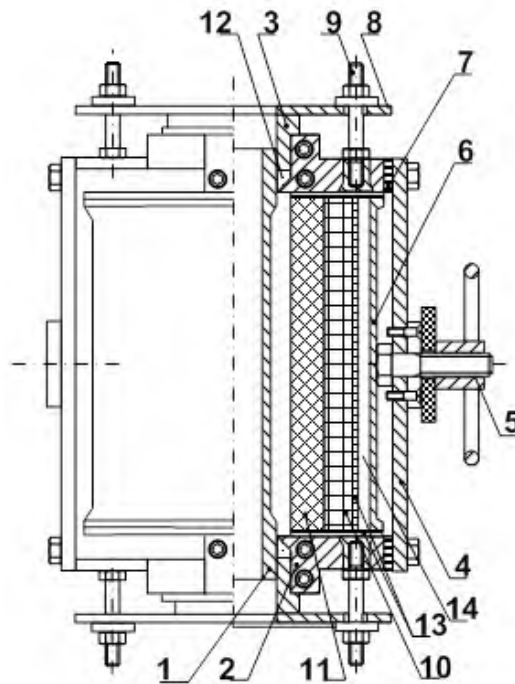
Электрический ток напряжением 12 В и силой до 3,2 кА подводится через шины, токоведущие щеки, верхнее и нижнее уплотнительные кольца к концам трубчатого нагревательного элемента. Раскаленный элемент отдает тепло лучеиспусканием тиглю с загруженным в него материалом, подлежащим плавлению. Лабораторная печь Таммана представлена на рисунке 3.6.

Достоинства печи Таммана следующие:

- возможность нагрева до 2400 °С;
- высокая скорость нагрева.

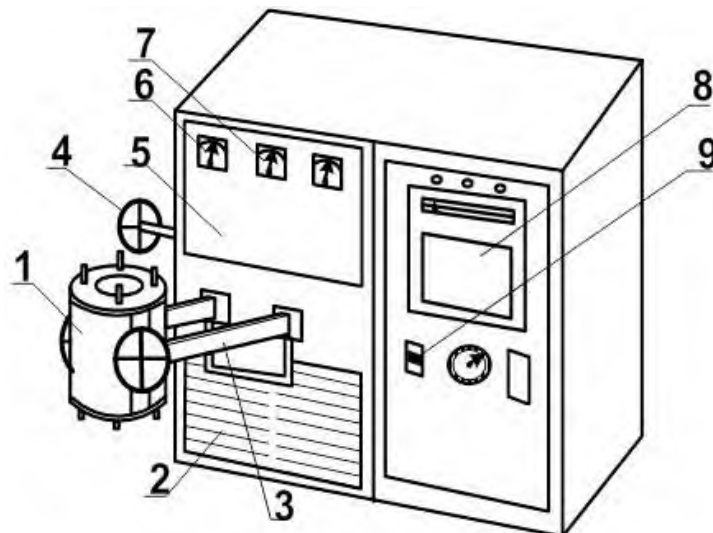
К недостаткам плавильной печи Таммана можно отнести:

- непригодность для эксплуатации при низких температурах;
- невозможность точной регулировки скорости нагрева и охлаждения;
- восприимчивость к атмосфере печного пространства;
- пониженная стойкость графитового нагревателя;
- сложность эксплуатации.



1 – графитовый нагреватель; 2 – медный водоохлаждаемый фланец;
 3 – уплотнительное контактное кольцо; 4 – токоподводящая шина;
 5 – гайка со штурвалом для зажима шин; 6 – кожух; 7 – прокладка
 изолирующая; 8 – накладка; 9 – винт; 10 – пеношамот; 11 – набивка из
 магнезита; 12 – засыпка из мелкого криптола; 13 – картон асбестовый;
 14 – полость для циркуляции воды

Рисунок 3.5 – Устройство печи сопротивления Таммана



1 – печь сопротивления; 2 – корпус, внутри которого находятся трансформатор
 силовой и магнитный усилитель; 3 – токоведущие шины; 4 – регулятор
 напряжения; 5 – шкаф управления; 6 – вольтметр выходного напряжения;
 7 – амперметр первичной цепи трансформатора; 8 – электронный
 потенциометр; 9 – управляющий прибор включения и выключения

Рисунок 3.6 – Лабораторная плавильная печь Таммана

3.4 Составление отчёта

Отчет по работе составляется непосредственно в процессе выполнения работы. При этом необходимо строго придерживаться правил оформления отчетов по научно-исследовательской работе и общепринятых правил представления графического материала.

Отчет должен включать в себя следующую информацию:

- название и цель работы;
- ход выполнения работы, где кратко описывается методика выполнения работы, переводятся эскизы, сделанные в процессе её выполнения, с необходимыми подрисуночным текстом, описание принципа действия и конструктивных особенностей печей;
- выводы, в которых указывается возможная цель использования печи каждого типа.

4 Контрольные вопросы

- 1 Принцип нагрева металла в индукционной тигельной печи.
- 2 Перечислите достоинства и недостатки индукционных тигельных печей.
- 3 От чего зависит эффективность работы индукционной тигельной печи?
- 4 Как изменяется к.п.д. индукционной печи в зависимости от частоты подводимого тока?
- 5 С какой целью схема электроснабжения индукционных печей включает конденсаторную батарею?
- 6 Какие тигли целесообразнее всего использовать в индукционной печи при исследованиях, проводимых с металлом (сталь, чугун) и шлаком?
- 7 Расскажите принцип нагрева материалов в камерной электропечи сопротивления?
- 8 Каким путем происходит передача тепла от нагревательных элементов расплавленному материалу в печах сопротивления?
- 9 Как классифицируются камерные электрические печи сопротивления в зависимости от рабочей температуры?
- 10 Что является нагревательным элементом в печи Таммана?

Лабораторная работа № 4. Имитационное моделирование обработки электростали на агрегате доводки стали (АДС)

1 Цель работы

- изучение основ теории обработки электростали на АДС;
- приобретение навыков расчета расхода раскислителей, легирующих, шлакообразующих и инертного газа, корректировки температуры;
- изучение принципов имитационного моделирования обработки электростали на АДС.

2 Теоретическое введение

2.1 Основы внепечной обработки металла на АДС

Ограниченные возможности регулирования физических и физико-химических условий протекания процессов плавки стали в сталеплавильных агрегатах (мартеновских и дуговых печах, конвертерах), а также повышение требований к качеству стали, привели к необходимости включения в технологическую цепочку выплавки стали нового процесса – внепечной обработки стали (другие названия: внепечная металлургия, ковшовая металлургия, внеагрегатная обработка, ковшовое рафинирование). Обеспечивая получение не только высокого, а в ряде случаев нового качества, но и повышение производительности сталеплавильных агрегатов, внепечная обработка стали начала особенно быстро развиваться в 60-70-х годах и стала неотъемлемой частью сталеплавильного производства.

Быстрое и широкое распространение внепечной обработки объясняется многими положительными моментами, главными из которых являются:

- упрощение технологии электродуговой плавки, так как появляется возможность доведения металла по химическому составу и температуре вне печи;
- замена двухшлаковой технологии электроплавки на одношлаковую без скачивания шлака (уменьшаются продолжительность плавки, расход электроэнергии, трудовые затраты и т.д.);
- обеспечение надежной, высокопроизводительной и ритмичной работы машин непрерывной разливки стали;
- расширение возможностей получения особо чистой стали с ничтожным содержанием нежелательных примесей;
- изменение структуры и типа потребляемых ферросплавов и раскислителей в сторону снижения требований к составу и соответствующее их удешевление (использование более дешевых марок феррохрома, ферроникеля и т. п.).

В настоящей работе приводятся основы теории обработки стали на агрегате доводки стали, сочетающем в себе основные методы внепечной обработки стали: продувка металла инертными газами; коррекция химического состава

стали и ее микролегирование присадками кусковых материалов; охлаждение металла.

В силу специфики электросталеплавильного производства, студенты-металлурги совершенно лишены возможности руководить процессом доводки стали в промышленных условиях и имеют очень ограниченную возможность проводить эти операции в лабораторных опытах. Первые навыки управления процессом доводки стали он может получить при имитационном моделировании процесса обработки стали на агрегате доводки стали (АДС) на ЭВМ.

При проведении процесса обработки стали на АДС должны быть решены следующие задачи:

- выбор технологии коррекции химического состава металла с получением стали в соответствии с заданной маркой;
- определение расхода корректирующих добавок;
- усреднение состава и температуры металла;
- охлаждение металла с целью обеспечения заданной температуры.

2.2 Технология обработки стали на АДС

На АДС осуществляются следующие технологические операции:

- продувка металла аргоном;
- коррекция химического состава стали и ее микролегирование присадками кусковых материалов;
- охлаждение металла;
- продувка металла порошками;
- введение в металл алюминиевой проволоки;
- засыпка поверхности металла теплоизолирующими материалами;
- замер температуры и отбор проб металла.

Обработка стали на АДС является заключительной частью технологии плавки стали, целью которой является доведение до требуемого химического состава готовой стали и ее температуры, а также обеспечения однородности металла по указанным параметрам. Процесс раскисления и легирования металла связан с определенными трудностями, так как отсутствует информация о содержании кислорода в металле, а также его изменения по ходу технологической цепочки производства стали в цехе.

В производственных условиях содержание кислорода в стали после раскисления не контролируются. О правильности раскисления стали судят по содержанию элементов - раскислителей в готовой стали, которое задается стандартами для каждой марки стали.

Раскисление кипящей стали проводится самым слабым раскислителем – марганцем, который обычно вводят в металл в виде ферромарганца в количестве, обеспечивающем получение требуемого содержания марганца в металле.

Раскисление полуспокойной стали проводят двумя элементами – марганцем и кремнием, причем оптимальная степень раскисленности металла, при которой слиток имеет наилучшую структуру, обеспечивается при содержании в

металле 0,07-0,12% Si. Для раскисления в полуспокойную сталь при выпуске вводят ферромарганец и ферросилиций, а также силикомарганец.

Раскисление спокойной стали проводят наиболее полно, что достигается введением в металл трех элементов – марганца, кремния и алюминия. Расход марганца и кремния выбирается так, чтобы остаточное содержание этих элементов в металле после раскисления находилось в пределах, установленных для выплавляемой стали.

Перед поступлением на АДС металл может подвергаться предварительному раскислению в ковше на выпуске плавки.

Обработка стали на АДС начинается с продувки аргоном с целью усреднения химического состава и температуры металла в объеме ковша. Эта операция производится на всех плавках, независимо от марки стали. Расход инертного газа при продувке обычно составляет 0,3-2,0 м³/т стали. Газ в металл обычно подают через погружаемую фурму, через пористую огнеупорную пробку в днище ковша или через пористые швы в днище ковша.

Усреднительную продувку необходимо проводить не менее трех минут при расходе аргона в пределах 50-80 м³/ч, а для хромосодержащих сталей – в пределах 70-90 м³/ч. По истечении усреднительной продувки (обычно 3-6 минут) производится измерение температуры и отбор пробы металла для химического анализа без прекращения продувки.

По результатам экспресс-анализа пробы металла определяется масса корректирующих добавок соответствующих ферросплавов из расчета получения массовой доли вводимых элементов на 0,05 % выше нижнего предела в готовой стали и с учетом их усвоения.

Расход корректирующих добавок определяется по формуле:

$$G_p = \frac{100 \cdot G_M \cdot ([E]_C - [E]_M)}{[E]_d \cdot (100 - U_e)}, \quad (4.1)$$

где G_p – расход ферросплава, кг;

$[E]_C$ – среднее содержание элемента в заданной марке стали, %;

$[E]_M$ – содержание элемента в металле перед обработкой, %;

$[E]_d$ – содержание элемента в добавке, %;

U_e – угар элемента при введении добавки в металл, % (таблица 4.1).

Рекомендации по выбору угара ведущего элемента легирующей добавки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Угар ведущего элемента при раскислении-легировании стали

Ведущий элемент ферросплава	Угар элемента ферросплава при содержании углерода в металле в конце продувки, %		
	менее 0,10	0,10-0,25	более 0,25
Марганец	25-35	20-30	15-20
Кремний	30-40	25-35	20-25
Хром*	15-20	10-15	8-10
Ванадий*	20-25	15-20	10-15
Фосфор, сера*	20-35		
Углерод кокса*	30-50		
Углерод графита*	90-95		
Никель, медь*	0		
Алюминий*	100 / 10-20**		
* угар легирующего элемента после предварительного раскисления марганцем и кремнием;			
** в числителе – при раскислении, в знаменателе – легировании.			

При использовании данных таблицы 4.1 следует иметь в виду, что угар легирующих увеличивается с уменьшением содержания углерода в металле, с повышением содержания оксидов железа в шлаке и увеличением основности шлака. При легировании стали необходимо учитывать увеличение массы металла при введении корректирующих добавок.

Раскисляющие и легирующие добавки присаживают отдельными порциями массой не более 0,5% (от массы металла) с интервалом 0,5-2,0 мин. При этом следует учитывать, что 200 кг металлического марганца и ферромарганца, 250 кг силикомарганца и силикохрома снижают температуру металла на 1 °С.

После присадки последней порции марганец – и кремнийсодержащих ферросплавов металл продувается аргоном не менее пяти минут, а после присадки хромосодержащих ферросплавов - не менее шести минут.

По результатам измерения температуры определяется необходимость введения охладителя для достижения заданной температуры металла с учетом следующих положений:

- продувка металла аргоном снижает его температуру на 1,0-2,0 °С за минуту;
- погружение сляба на глубину 2,0-2,5 м снижает температуру на 3,0-4,0 °С за минуту;
- присадка 200 кг металлической сечки снижает температуру на 1,0 °С;
- присадка металлической сечки осуществляется через систему подачи кусковых ферросплавов порциями по 200-400 кг с интервалом 0,5-1,0 мин без прекращения продувки аргоном.

После извлечения сляба металл продувают аргоном не менее двух минут. После присадки последней порции металлической сечки металл продувают аргоном не менее четырех минут. По окончании продувки металла аргоном отбирается его проба и измеряется температура. Температура и состав стали

должны соответствовать требуемым значениям. При необходимости осуществляется коррекция химического состава и температуры металла.

Общая продолжительность продувки аргоном должна быть не менее шести минут для углеродистых сталей, восьми минут – для хромсодержащих сталей и не менее 10 мин – для остальных легированных и низколегированных сталей.

Микролегирующие элементы (титан, ниобий, ванадий, РЗМ, бор и другие) вводятся в ковш после трех-четырех минутной предварительной продувки металла аргоном и измерения температуры.

В случае перегрева металла микролегирующие элементы вводятся только после его предварительного охлаждения. После введения последней навески микролегирующих элементов металл продувается аргоном не менее пяти минут.

Перед отправкой ковша на разливку поверхность металла засыпается гранулированным доменным шлаком с расходом 1,2-2,5 т на плавку.

3 Методика выполнения работы

Лабораторная работа по моделированию процесса обработки стали на АДС проводится в компьютерном классе на тренажере «Агрегат доводки стали».

Работа проводится в два этапа. На первом этапе, перед началом занятия, студенты самостоятельно изучают теоретическое описание лабораторной работы. На втором этапе студенты работают с тренажером АДС, проводя операции по доводки стали в соответствии с заданием, сгенерированным программой. Программа предусматривает работу в двух режимах – обучение и экзамен (рисунок 4.1). Работу следует начинать в режиме обучения.



Рисунок 4.1 – Выбор режима работы с тренажером

Для начала работы с программой необходимо сгенерировать задание, нажав кнопку "Получить задание" в верхней левой части панели (рисунок 4.2).

В задании на имитационное моделирование обработки стали на АДС указываются следующие данные:

- Количество обрабатываемого металла.
- Марка выплавляемой стали.
- Регламентированный химический состав стали.
- Требуемая температура металла.
- Регламентированное время обработки.

После появления сообщения "Задание сгенерировано" необходимо составить плана проведения доводки стали в соответствии с теоретическим материалом. План проведения доводки должен содержать:

- последовательность операций;
- выбор вида и расчет расхода корректирующих добавок в соответствии с маркой выплавляемой стали и химическим составом металла при поступлении его на АДС. Добавки, которые можно использовать при моделировании, указаны в таблице 4.2;
- выбор способа и параметров охлаждения металла.

После составления предварительного плана доводки, необходимо начать процесс доводки, для чего в верхней левой части панели следует нажать кнопку «Начать доводку» (рисунок 4.3).

В правой части экрана (рисунок 4.3) появится задание на проведение доводки стали. С этого момента начинается отсчет времени доводки.

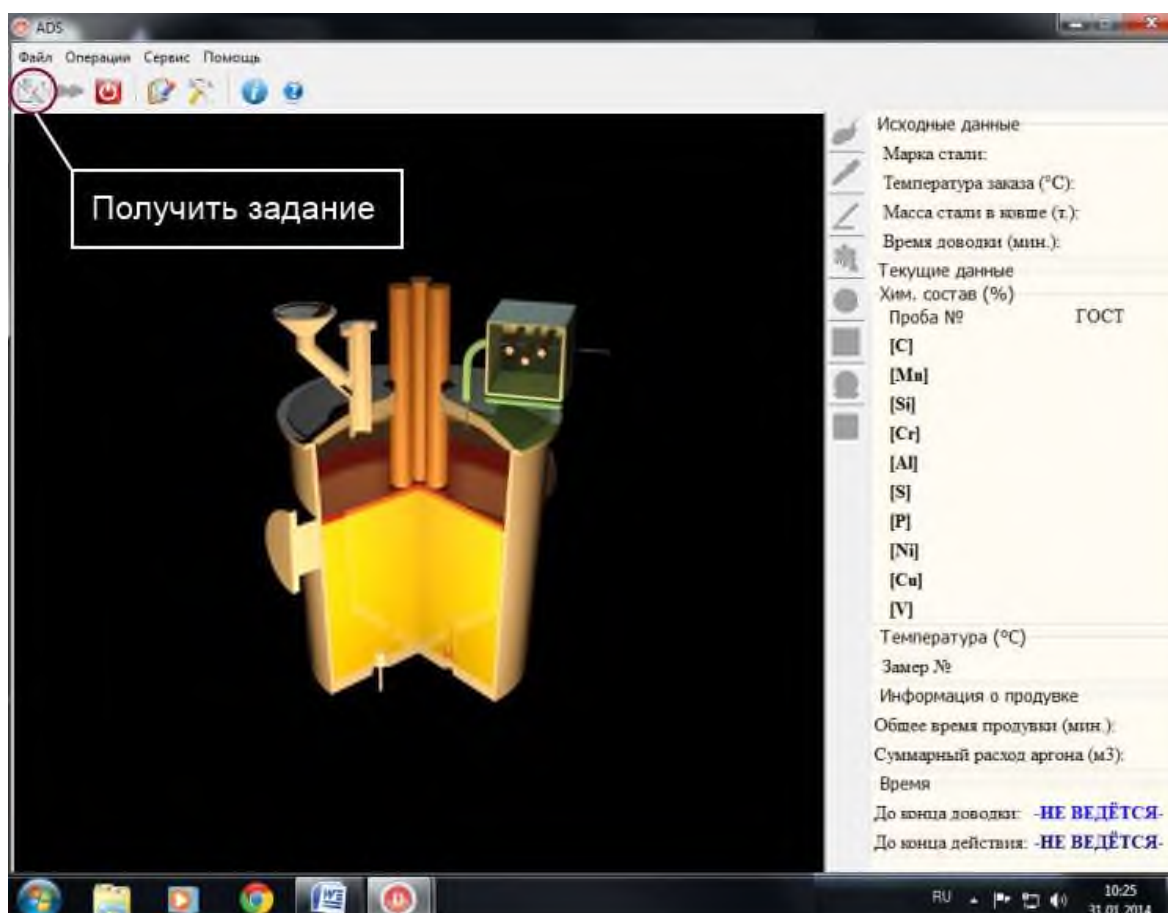


Рисунок 4.2 – Рабочее окно тренажера до начала моделирования

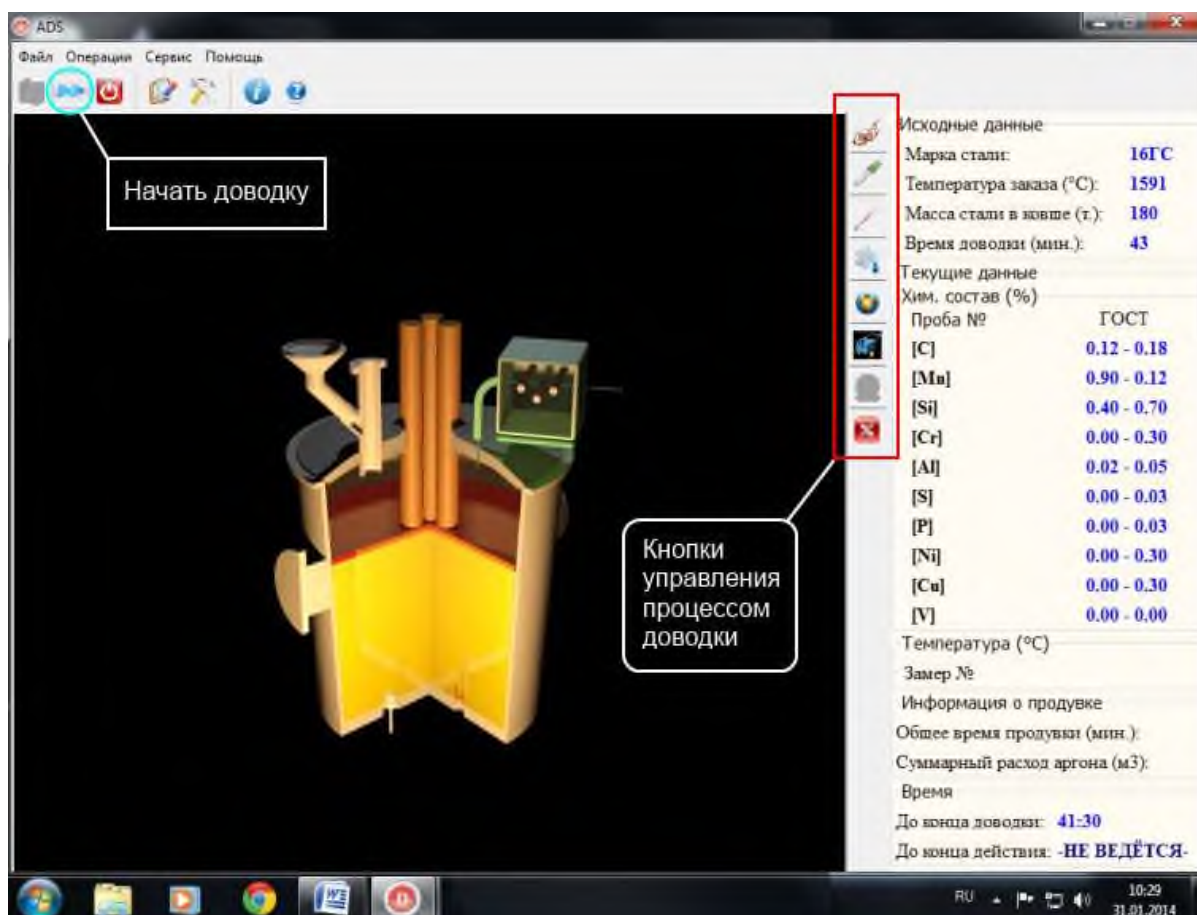


Рисунок 4.3 – Рабочее окно тренажера после выдачи задания


Таблица 4.2 – Химический состав раскислителей и легирующих


Ферросплав	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Al, %	S, %	P, %	Ni, %	Cu, %	V, %
Кокс	87	0	0	0	0	0,5	0,02	0	0	0
Графит	96	0	0	0	0	0,4	0,02	0	0	0
Лом меди	0	1	1	0	0	0	0	1	90	0
НЗ	0,1	0	0	0	0	0,03	0	98	0,6	0
Н4	0,15	0	0	0	0	0,04	0	98	1	0
ФН4	0,15	0	0	0	0	0,03	0	6	1	0
ФН3	0,16	0	0	0	0	0,03	0	15	1	0
ФН2	0,17	0	0	0	0	0,03	0	20	1	0
ФН1	0,18	0	0	0	0	0,03	0	25	1	0
ФСХ18	4,5	0	30	40	0	0,02	0,03	0	0	0
ФСХ30	0,9	0	30	40	0	0,02	0,03	0	0	0
ФСХ40	0,2	0	41	35	0	0,02	0,03	0	0	0
ВД1	0,75	2	2	0	1	0,1	0,1	0	0	38
ВД2	0,75	2	3	0	1,5	0,1	0,2	0	0	38
ВД3	1	2	3,5	0	2	0,15	0,25	0	0	38
ФВД75	0,1	2,7	0,8	2	0	0,1	0,1	0	0	75
ФВД50	0,3	5	2	1	0	0,1	0,1	0	0	50
ФВД35	0,75	2	3	1	0	0,1	0,1	0	0	35
A5	0	0,03	0,3	0,03	99,5	0	0	0,03	0,02	0
A6	0	0,03	0,4	0,03	99,6	0	0	0,03	0,01	0
AB86	0	0,03	5	0	86	0	0	0,03	4	0
AB88	0	0,03	4	0	88	0	0	0,03	4	0

Ферросплав	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Al, %	S, %	P, %	Ni, %	Cu, %	V, %
AB92	0	0,03	1	0	92	0	0	0,03	3	0
AB97	0	0,03	1	0	97	0	0	0,03	0,1	0
ФХ650	6,5	0	2	65	0	0,06	0,04	0	0	0
ФХ800	8,0	0	2	65	0	0,06	0,04	0	0	0
ФХ100	1	0	2	65	0	0,04	0,04	0	0	0
ФХ200	2	0	2	65	0	0,04	0,04	0	0	0
ФХ010	0,10	0	1,5	65	0	0,03	0,03	0	0	0
ФХ015	0,15	0	1,5	65	0	0,03	0,03	0	0	0
ФХ025	0,25	0	2,0	65	0	0,03	0,03	0	0	0
СМн14	2,5	65	15,5	0	0	0,03	0,2	0	0	0
СМн17	1,7	65	18,5	0	0	0,03	0,1	0	0	0
СМн26	1,0	65	26,0	0	0	0,03	0,1	0	0	0
ФС25	0,8	0,9	25,0	0,6	1	0,03	0,06	0	0	0
ФС45	0,2	0,6	45,0	0,5	2	0,03	0,05	0	0	0
ФС65	0,10	0,4	65,5	0,4	2,5	0,03	0,05	0	0	0
ФС75	0,05	0,3	75,0	0,4	2,5	0,03	0,05	0	0	0
ФС90	0	0,2	90,0	0,3	3,0	0,02	0,03	0	0	0
МР1	0,08	97	0,7	0	0	0	0,05	0	0	0
МР2	0,18	96	1,7	0	0	0	0,05	0	0	0
МН7	7	70	0,9	0	0	0,03	0,35	0	0	0
МН6	7	72,5	1,8	0	0	0,03	0,35	0	0	0
МН5	7	75,5	1,8	0	0	0,03	0,35	0	0	0
ФМн0,5	0,5	90	2	0	0	0,03	0,3	0	0	0
ФМн1	1	90	2	0	0	0,03	0,3	0	0	0
ФМн1,5	1,5	90	2,5	0	0	0,03	0,3	0	0	0
ФМн75	7	75	2	0	0	0,03	0,45	0	0	0
ФМн75К	7	76	1	0	0	0,03	0,45	0	0	0
ФМн78К	7	80	1	0	0	0,03	0,35	0	0	0


Программа моделирования не рассчитана на работу с добавками, которые не содержащимися в таблице 4.2.


В процессе доводки программой предусмотрено выполнение следующих технологических операций (с помощью кнопок, расположенных в правой части окна программы – рисунок 4.3):

- продувка аргоном (клавиша ) , при выборе которой, в появляющемся окне необходимо указать удельный расход аргона и продолжительность продувки;

- взятие пробы на химический анализ (клавиша ) , после завершения которой в правом поле окна программы появляется текущий химический состав металла;


- замер температуры (клавиша ) , после завершения которой в правом поле окна программы появляется значение текущей температуры металла;

- охлаждение металла (клавиша ) , при выборе которой необходимо указать вид охладителя и параметры охлаждения (количество охладителя, интенсивность и продолжительность продувки);


- ввод добавок (клавиша ) , при выборе которой необходимо указать вид материала, разовую порцию и интенсивность продувки аргоном. Перечень до-

бавок, предусмотренных программой для коррекции химического состава представлен в таблице 4.2;

– засыпка гранулированного шлака (клавиша ).

Выполняя соответствующие технологические операции в правильной последовательности студент за отведенное время должен добиться получения требуемого состава и температуры металла. Время каждой операции и оставшееся для доводки время фиксируется на правой части окна программы. Для ускорения работы системой предусмотрена возможность ускорения выбранной операции, для чего необходимо нажать кнопку "Закончить операцию" (кнопка ).

Параметры металла в процессе доводки (температура и химический состав), а также время доводки, отображаются в правом поле окна программы.

После завершения доводки, то есть получения требуемого состава и температуры металла, необходимо нажать кнопку "Завершить доводку" (кнопка ) и дождаться формирования отчета, который в режиме обучения формируется в виде файла MS Word, а в режиме экзамен – сохраняется на сервере.

Работа начинается студентами в режиме обучения, в котором необходимо отработать навыки проведения доводки стали. За 20 минут до окончания лабораторного занятия проводится выполнение доводки в режиме экзамен, результат которой является допуском к защите лабораторной работы.

В отчете должны быть следующие разделы:

- 1 Цель работы.
- 2 Теоретическое введение.
- 3 Методика расчета расхода легирующих, охладителей и инертного газа.
- 4 Задание на моделирование.
- 5 План проведения доводки (легирующих, охладителей, инертного газа, расчет их расхода, график их введения).
- 6 Хронометраж процесса доводки, представляемый по форме таблицы 4.3 (приводится по одной из плавов, выполненной на занятии в режиме обучения).

Таблица 4.3 – Форма представления хронометража процесса доводки

Время от начала доводки, мин	Масса металла, т	Ввод добавки или газа	
		вид	количество

7 Химический состав и температура металла после доводки.

8 Оценка соответствия химического состава металла и температуры заданным значениям.

4 Контрольные вопросы

- 1 Что такое раскисление стали и с какой целью оно проводится?
- 2 Что такое легирование стали и с какой целью оно проводится?
- 3 Какие раскислители используются при раскислении кипящей, полуспокойной и спокойной стали?
- 4 Какие факторы влияют на угар элементов при раскислении?
- 5 Какие задачи решаются при обработке металла на агрегате доводки?
- 6 Назначение и технология продувки металла инертными газами?
- 7 Назначение и технология обработки металла порошкообразными реагентами?
- 8 Способы корректировки температуры металла на АДС и их эффективность?
- 9 Технологические особенности обработки металла на АДС?

Лабораторная работа № 5. Изучение различных видов ферросплавов

1 Цель работы

- ознакомление с сортаментом и отличительными признаками важнейших ферросплавов, применяемых при раскислении и легировании сталей;
- изучения влияния легирующих на свойства сталей.

2 Теоретическое введение

Целесообразность раскисления и легирования стали и сплавов ферросплавами, а не технически чистыми металлами, объясняется тем, что производство чистого марганца, кремния, хрома и др. сопряжено с большими затратами и трудностями. Кроме того, в этом случае достигается уменьшение угара ведущего элемента, облегчается его введение в жидкую сталь, а стоимость ведущего элемента в ферросплавах и лигатурах обычно значительно ниже, чем в технически чистых металлах. Технически чистый марганец, хром и др. применяют для раскисления и легирования специальных сталей.

Ферросплавами называют сплавы железа с кремнием, марганцем, хромом, ванадием и другими элементами, а иногда сплавы других элементов, например, сплав кальция и кремния – силикокальций, применяющиеся при выплавке стали для улучшения ее свойств в процессе раскисления и легирования. Основой сплава обычно служит железо. Помимо основного элемента имеются один или несколько ведущих элементов, из-за которых сплав выплавляют. В ферросплаве имеется также нежелательные примеси, количество которых невелико и строго ограничивается, и вредные примеси, содержание которых ограничивается тысячными и сотыми долями процента. Например, в безуглеродистом феррохроме хром – ведущий элемент, железо – основной, кремний – нежелательная примесь, а фосфор, сера и углерод – вредные примеси.

Так называемые комплексные ферросплавы содержат несколько ведущих элементов, например, в ферросиликохроме – кремний и хром.

Ферросплавы на железной основе, применяемые только для легирования, часто называют лигатурами, например, лигатура с бором, селеном, кремний-магниева лигатура и др. К лигатурам также относятся все сплавы на нежелезной основе, например, никелевой, хромовой и др.

Ферросплавы получают восстановлением оксидов соответствующих металлов. В настоящее время агрегатом, в котором получают самые разнообразные сплавы элементов с железом (ферросплавы), является дуговая электропечь, так как только в ней можно создать в области электрических дуг высокие температуры, необходимые для восстановления оксидов, расплавления тугоплавких металлов и отделения металлов от тугоплавких шлаков.

3 Методика выполнения работы

В лаборатории представлены две коллекции образцов ферросплавов. Одна коллекция имеет таблички с наименованием и маркой каждого ферросплава, другая – таких табличек не имеет. По первой коллекции, на которой указано где какой ферросплав, студенты изучают их характерные внешние признаки.

Умение различать ферросплавы проверяется преподавателем по второй коллекции образцов.

Отчет по работе не пишется, зачет по ней сдается сразу же после изучения первой коллекции.

3.1 Ферромарганец

Ферромарганец применяется для раскисления всех марок сталей (кипящих, спокойных и полуспокойных) и легирования отдельных марок спокойных сталей. Марганец в стали повышает ее прокаливаемость, твердость, предел прочности, предел текучести, но несколько снижает вязкость.

Температура плавления ферромарганца 1250-1280°C. По содержанию углерода ферромарганец делится на малоуглеродистый (С не более 0,5%), среднеуглеродистый (С не более 1,5%) и углеродистый (С более 1,5%). Сортамент выплавляемого ферромарганца приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Сортамент ферромарганца по ГОСТ 4755-70

Марка	Содержание, %				
	Mn не менее	C	Si	P	S
		Не более			
ФМн 05	85	0,5	2,0	0,3	0,03
ФМн 1,0А	85	1,0	1,5	0,1	
ФМн 1,0			2,0	0,3	
ФМн 1,5		1,5	2,5		
ФМн 78А		78	7,0	2,0	
ФМн 78К	1,0			0,35	
ФМн 78	2,0				
ФМн 75К	1,0			0,45	
ФМн 75	2,0				

Излом кусков ферромарганца имеет тусклый серебристый цвет с фиолетовыми пятнами. Фиолетовые пятна имеются также и на темной поверхности кусков. Чем меньше содержание марганца в сплаве, тем ярче фиолетовая окраска кусков. Плотность ферромарганца составляет 7,0-7,3 т/м³. Внешний вид кускового ферромарганца представлен на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Кусковый ферромарганец

Металлический марганец (таблица 5.2) применяют при выплавке кислотоупорной стали с низким содержанием углерода и при выплавке сплавов с низким содержанием железа.

Таблица 5.2 - Сортамент металлического марганца по ГОСТ 6008-75

Марка	Содержание, %								
	Mn не менее	C	Si	Ni	Cu	Fe	P	S	Al+Ca+Mg
Мр 00	99,85	0,04	-	-	-	-	0,01	0,03	-
Мр 0	99,70	0,10	-	-	-	-	0,01	0,10	-
Мр 1	96,50	0,10	0,8	0,02	0,03	2,3	0,05	0,10	0,7
Мр 2	95,00	0,20	1,8	0,02	0,03	2,8	0,07	0,10	0,7
Мр 1С	93,50	0,15	3,0	0,02	0,03	2,8	0,07	0,10	0,7

Свежий излом кусков металлического марганца имеет серебристый цвет. На темной окислившейся поверхности имеются слабые фиолетовые пятна. Внешний вид металлического марганца представлен на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Марганец металлический Мр 0

3.2 Ферросилиций

Ферросилиций применяют для раскисления и легирования спокойных марок сталей. Температура плавления стандартных сортов ферросилиция не превышает 1330°C.

Наличие кремния в стали повышает ее твердость, предел текучести, пределы прочности и упругости, понижает вязкость и увеличивает сопротивление окислению. Кремнистая сталь широко применяется для рессор и пружин. Химический состав ферросилиция, приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Сортамент ферросилиция по ГОСТ 1415-70

Марка	Содержание, %								
	Si	C	S	P	Al	Mn	Cr	Ti	Ca
		Не более							
ФС 90	85-95	-	0,02	0,03	3,0	0,2	0,2	0,2	1,0
ФС 75	74-80	0,1	0,02	0,03	1,3	0,3	0,2	0,2	1,0
ФС 75	74-80	-	0,03	0,05	2,5	0,4	0,4	-	-
ФС 65	63-68	-	0,03	0,05	2,0	0,4	0,4	-	-
ФС 45	41-47	-	0,03	0,05	2,0	0,6	0,5	-	-
ФС 25	23-29	0,6	0,03	0,06	1,0	0,9	0,6	-	-
ФС 18	17-22	1,0	0,04	0,10	1,0	1,0	0,8	-	-

По требованию потребителя ферросилиций может поставляться с меньшим содержанием отдельных примесей.

В коллекции имеется ферросилиций марок ФС75, ФС65 и ФС45. С повышением содержания кремния в сплаве объемный вес его уменьшается. Поэтому ФС75 самый легкий из представленных в коллекции образцов ферросилиция. Верхняя и нижняя поверхности слитка сплава ФС75 ровная, плотная, покрытая темной окисной пленкой. Излом темно-стального (серого) цвета, блестящий, с длинными, тонкими кристаллами кремния. В изломе и на поверхности кусков ФС75 нет раковин (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Ферросилиций ФС 75 (Si=75-76%)

На поверхности и в изломе кусков сплава ФС65 и ФС45 имеются раковины овальной формы. Раковин тем больше, чем меньше содержание кремния в ферросплаве (рисунок 5.4). Излом кусков ФС65 примерно такого же цвета, что и ФС75, только без длинных кристаллов кремния. Излом кусков ФС45 немного светлее, блестящий и имеет характер стального излома с раковинами.



Рисунок 5.4 – Ферросилиций ФС 65

3.3 Силикомарганец

Силикомарганец применяют при производстве спокойных марок сталей в качестве комплексного раскислителя. Он является исходным сырьем для получения средне- и малоуглеродистого ферромарганца и при производстве металлического марганца. Химический состав силикомарганца приведен в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Сортамент силикомарганца по ГОСТ 4756-70

Марка	Содержание, %					S, не более
	Si	Mn не менее	C	P		
				группа А	группа Б	
не более						
СМн 26	> 26	60,0	0,2	0,05	0,05	0,03
СМн 20	20-25,9	60,0	1,2	0,1	0,25	
СМн 17	17-19,9	65,0	1,7	0,1	0,35	
СМн 14	14-16,9	65,0	2,5	0,2	0,35	
СМн 10	10-13,9	65,0	3,5	0,2	0,35	

На поверхности кусков силикомарганца имеются небольшие раковины. Излом стального цвета, мелкокристаллический, в отдельных случаях с небольшими фиолетовыми прожилками и пятнами золотистого цвета (рисунок 5.5).

Плотность несколько ниже, чем у ферромарганца и чуть больше, чем у ферросилиция.



Рисунок 5.5 – Силикомарганец СМн 17

3.4 Феррохром

Хром входит как легирующий элемент в очень многие стали и сплавы. Добавка хрома способствует самозакаливанию стали и углублению закалки. Хром повышает твердость стали и прочность, уменьшая пластичность. В сочетании с кремнием хром придает стали жаростойкость. При низком содержании углерода высокохромистые стали (более 12% Cr) обладают устойчивостью против ржавления. При высоком содержании углерода хром повышает сопротивление износу и истиранию.

Химический состав феррохрома с разным содержанием углерода приведен в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Сортамент феррохрома по ГОСТ 4757-67

Группа феррохрома	Марка	Содержание, %						
		Cr, не менее	C	Si	S	P		N, не менее
			Не более			Класс А	Класс Б	
Безуглеродистый	ФХ 001	68	0,01	0,8	0,02	0,02	0,03	-
	ФХ 002		0,02					
	ФХ 003		0,03	1,0				
	ФХ 004		0,04					
	ФХ 005	65	0,05	1,5	0,03	0,03	0,06	
	ФХ 006		0,06					
Низко-	ФХ 010	65	0,10	1,5	0,03	0,03	0,06	-

Группа феррохрома	Марка	Содержание, %						
		Cr, не менее	C	Si	S	P		N, не менее
			Не более			Класс А	Класс Б	
углеродистый	ФХ 015		0,15	1,5				
	ФХ 025		0,25	2,0				
	ФХ 050		0,50	2,0				
Среднеуглеродистый	ФХ 100	65	1,0	2,0	0,04	0,04	0,06	-
	ФХ 200		2,0					
Углеродистый	ФХ 650	65	6,5	1,5	0,06	0,04	0,06	-
	ФХ 800		8,0	2,0				
Азотированный	ФХ 100Н	70	0,05	1,0	0,03	0,02	0,03	0,9
	ФХ 400Н	65	0,06		0,04	0,03	0,04	4,0
	ФХ 600Н	60	0,03		0,04	0,03	0,04	6,0

Окисленная поверхность кусков феррохрома имеет зеленоватый оттенок. В изломе и на поверхности безуглеродистого, малоуглеродистого и среднеуглеродистого феррохрома имеются раковины различной формы. Углеродистый и азотированный феррохром раковин практически не имеет. Излом кусков феррохрома зернистый, светло- и темносерого цвета (рисунок 5.6).



а)



б)

Рисунок 5.6 – Феррохром низкоуглеродистый ФХ025 (а) и углеродистый марки ФХ 800 (б)

Для выплавки жаропрочных сплавов, в которых содержание железа ограничено, применяют металлический хром (таблица 5.6).

Таблица 5.6 - Сортамент металлического хрома по ГОСТ 5905-67

Марка	Содержание, %								
	Cr, не менее	Al	Si	Fe	C	P	S	Cu	N
		Не более							
X00	99,0	0,5	0,3	0,6	0,03	0,02	0,02	0,01	0,05
X0	98,5	0,5	0,4	0,6	0,03	0,02	0,02	0,02	-
X1	98,0	0,7	0,5	0,8	0,04	0,03	0,03	0,06	-
X2	97,0	1,5	0,5	1,2	0,05	0,03	0,04	0,10	-
X3	97,0	1,0	1,0	1,2	0,06	0,03	0,03	0,06	-

Излом кусков металлического хрома крупнозернистый, блестящий, светлый (рисунок 5.7). Плотность металлического хрома $7,2 \text{ т/м}^3$, температура плавления $1850-1900^\circ\text{C}$. В составе отдельных марок металлического хрома оговорено содержание некоторых других элементов, кроме указанных в таблице 5.6, в частности, содержание Pb, Sn, As, Bi, Zn, Sb, Cd.



Рисунок 5.7 – Хром металлический марки X1

3.5 Ферромолибден

Ферромолибден вводят в металл как легирующую добавку, главным образом при производстве хромистых и хромоникелевых конструкционных и некоторых клапанных сталей. Молибден придает стали самозакаливаемость на воздухе, делает ее устойчивой в отношении роста зерна при нагреве, способствует устранению хрупкости при отпуске, повышает прочность, вязкость, сопротивление ползучести и красностойкость при высоких температурах.

Химический состав ферромolibдена приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Сортамент ферромolibдена по ГОСТ 4759-69

Марка	Содержание, %								
	Mo, не менее	W	Si	C	P	S	Cu	As	Sb, Sn
		Не более							
ФМ 1	58,0	0,6	0,8	0,05	0,05	0,10	0,5	0,03	0,02
ФМ 2	55,0	1,0	1,5	0,10	0,10	0,15	1,5	0,05	0,05
ФМ 3	55,0	1,0	2,0	0,20	0,20	0,20	2,5	0,10	0,10

Плотность ферромolibдена около 9 т/м^3 , температура плавления 1600-1800 °С. Излом кусков мелкозернистый, светло-стального цвета. Окисленная поверхность имеет грязно-бурый цвет (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Ферромolibден марки ФМ 1

3.6 Ферровольфрам

Вольфрам входит как легирующая добавка в быстрорежущие, магнитные, клапанные, жаропрочные и некоторые конструкционные стали. На механические свойства стали вольфрам действует подобно хрому, но меньше снижает вязкость. Он придает стали высокую твердость и обеспечивает прочность при повышенных температурах.

Химический состав ферровольфрама приведен в таблице 5.8.

Таблица 5.8- Сортамент ферровольфрама по ГОСТ 17293-71

Марка	Содержание, %								
	W, не менее	Mo	Mn	Si	C	P	S	Cu	Al
B1	72,0	1,5	0,4	0,5	0,3	0,04	0,08	0,15	-
B2	71,0	2,0	0,5	0,8	0,5	0,06	0,10	0,20	-
B3	65,0	6,0	0,6	1,2	0,7	0,10	0,15	0,30	-
B1a	80,0	6,0	0,2	0,8	0,1	0,03	0,02	0,10	4,0
B2a	77,0	7,0	0,2	1,1	0,15	0,04	0,04	0,20	5,0
B3a	70,0	7,0	0,3	2,0	0,3	0,06	0,06	0,30	6,0

В составе ферровольфрама, кроме указанных в таблице 6.8 элементов, оговаривается содержание Pb, Bi, As и Sn.

Температура плавления ферровольфрама составляет 2350-3000°C и зависит от содержания вольфрама в сплаве. Плотность также высокая и колеблется в пределах 15-16т/м³.

Куски ферровольфрама очень тяжелые и имеют темно-серую окраску с металлическим блеском (отливом).

3.7 Феррованадий

Ванадий входит в состав быстрорежущей стали, ее заменителей, малолегированных инструментальных, жаропрочных, магнитных и некоторых конструкционных нестареющих сталей. Ванадий создает мелкозернистость стали, задерживает рост зерна при нагреве, повышает ударную вязкость и устойчивость против знакопеременных нагрузок, повышает прокаливаемость и стойкость против отпуска.

Поверхность кусков феррованадия темная, излом крупный, светло-серый, неровный, в отдельных местах с пятнами бледно-желтого цвета (рисунок 5.9).



Рисунок 5.9 – Феррованадий марки Вв 1

Вредным элементом в феррованадии, затрудняющим производство сталей с повышенным содержанием ванадия, является фосфор.

Химический состав феррованадия приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Сортамент феррованадия по ГОСТ 4760-58

Марка	Содержание, %						
	V, не менее	C	Si	P	Al	S	As
		Не более					
Ва 1	35	0,78	2,0	0,10	1,0	0,10	0,05
Ва 2	35	0,75	3,0	0,20	1,5	0,10	0,05
Ва 3	35	1,0	3,5	0,25	2,0	0,15	0,05

Температура плавления феррованадия с 38% V около 1450°C, плотность 6-7 т/м³.

3.8 Ферротитан

Ферротитан применяют при выплавке ответственных конструкционных сталей для конечного раскисления. Введение небольших (0,1%) количеств титана измельчает литую структуру некоторых высокохромистых сталей и предотвращает образование карбидов хрома в кислотоупорных нержавеющей сталях. Широкое применение находит металлический титан при производстве жаропрочных сплавов и как самостоятельный конструкционный материал более легкий, чем сталь.

Химический состав ферротитана приведен в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Химический состав ферротитана (ГОСТ 4761-80)

Марка	Содержание элементов, %										
	Ti, не менее	Al	Si	C	P	S	C	V	Mo	Zn	Sn
		не более									
Ти 68	68	5	0,5	0,2	0,05	0,05	0,2	0,6	0,6	0,0	0,1
Ти 65	65	5	1	0,4	0,05	0,05	0,4	3	2,5	2	0,15
Ти 40А	40	9	5	0,1	0,05	0,05	0,2	0,5	0,5	0,3	0,05
Ти 40Б	40	9	6	0,15	0,08	0,1	3	-	-	-	-
Ти 35	35	8	5	0,1	0,07	0,05	0,1	0,8	0,5	0,2	0,05
Ти 30А	30	8	5	0,15	0,04	0,04	2	0,4	0,4	0,2	0,04
Ти 25А	25	8	5	0,1	0,05	0,05	0,1	-	-	-	-
Ти 30Б	30	9	6	0,15	0,08	0,05	2	0,8	0,5	0,2	0,05
Ти 30	30	14	8	0,2	0,07	0,07	3	1	1	0,7	0,08
Ти 25Б	25	9	7	0,2	0,08	0,08	3	-	-	-	-
Ти 20	20	8	6	0,2	0,15	0,08	3	-	-	-	-

Плотность ферротитана 5,6-6,4 т/м³, температура плавления 1280-1400°C.

Структура кускового ферротитана пористая (рисунок 5.10) стального цвета.



Рисунок 5.10 – Ферротитан Тi 35

Излом кусков сплава с содержанием титана до 35% мелкокристаллический, светлый, неровный со значительным количеством пятен золотистого цвета. При содержании титана в сплаве 60% и более излом кусков стального цвета, гладкий, мелкокристаллический без всяких пятен.

4 Контрольные вопросы

- 1 Что называют ферросплавами, для чего их применяют и как получают?
- 2 Что такое основной и ведущий элемент в ферросплаве и какие другие элементы в нем содержатся?
- 3 Что называют комплексным ферросплавом?
- 4 Что такое лигатура?
- 5 Какой из сплавов является ферромарганцем, ферросилицием (45%-ным, 65%-ным, 75%-ным), силикомарганцем, ферромолибденом, феррохромом, металлическим хромом, металлическим марганцем, ферромолибденом, ферровольфрамом, феррованадием, ферротитаном?
- 6 Какие свойства придает стали Mn, Si, Cr, Mo, W, V, Ti?

Библиографический список

1. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. М.: "Мир", ООО "Издательство АСТ", 2003. 528 с.
2. Еднерал Ф.П. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – М.: Metallurgia, 1977. 488 с.
3. Рысс М.А. Производство ферросплавов. / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1985. 334 с.
4. Гутман М.Б. Электрические печи сопротивления и дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
5. Грачев В.А. Печи литейных цехов: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МГОУ, 1994. 634 с.
6. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Metallurgia стали. Теория и технология плавки стали. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 534 с.
7. Metallurgia стали. / В.И. Явойский, Ю.В. Кряковский, В.П. Григорьев и др. М.: Metallurgia, 1983. 584 с.
8. Сталеплавильное производство. / Справочник, т.1. Под ред. А.М. Самарина. М.: Metallurgia, 1964. 476 с.
9. Емлин Б.И., Гасик М.И. Справочник по электрометаллургическим процессам. М.: Metallurgia, 1978. 288 с.
10. Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарев А.Ф. Внепечная обработка стали. М.: МИСиС, 1995. 255 с.

БРАТКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ
ШАПОВАЛОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

Электрометаллургия стали и ферросплавов

Лабораторный практикум
по дисциплинам «Электрометаллургия стали и ферросплавов»,
«Современные методы получения высококачественных сталей и сплавов»

Направление подготовки: 22.03.02 «Металлургия»
Профиль 1 «Металлургия черных металлов»
Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр
Форма обучения: очная, заочная

Подписано в печать 20.11.2019 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 122	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 4,19

ФГАОУ ВО
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Новотроицкий филиал
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.
E-mail: nfmisis@yandex.ru
Контактный тел. 8 (3537) 679729.