

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
Кафедра «Технология функциональных и конструкционных материалов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ СПЛАВОВ  
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Направление подготовки  
Квалификация(степень) выпуска  
Форма обучения

22.04.02 – «Металлургия»  
магистр  
очная

Составитель:

В.Н.Шаршин

Владимир 2019

УДК 621.74

**Шаршин В.Н.**

Методические указания к практическим работам по дисциплине «Прогрессивные технологии плавки сплавов на основе железа» / Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; сост. В.Н.Шаршин. – Владимир, 2019. –55 с.

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Прогрессивные технологии плавки сплавов на основе железа» и рассчитаны на магистрантов, обучающихся по направлению 22.04.02 – «Металлургия». Служат руководством к проведению практических работ и направлены на формирование основных профессиональных компетенций, отвечающих требованиям ФГОС-3 по направлению подготовки 22.04.02 – «Металлургия» к результатам освоения ОПОП ВПО.

Табл. 13. Ил. 1.

Рассмотрены и одобрены на  
заседании УМК направления  
22.04.02 «Металлургия»  
Протокол № 9 от 7.06. 2019 г.  
Рукописный фонд кафедры  
ТФ и КМ ВлГУ

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
<b>Практическая работа №1</b>	
Плавка стали в мартеновских печах.....	5
<b>Практическая работа №2</b>	
Плавка стали в конвертерах.....	12
<b>Практическая работа №3</b>	
Плавка стали в дуговых печах.....	19
<b>Практическая работа №4</b>	
Плавка стали в индукционных печах.....	22
<b>Практическая работа №5</b>	
.Плавка стали в плазменных печах. Электрошлаковый переплав и литьё стали.....	26

## Введение

Цель освоения дисциплины (модуля) - формирование теоретических знаний и практических навыков в области профессиональной деятельности магистров, включающей процессы получения литых заготовок из металлов и сплавов требуемого качества. Изучение современных методов контроля качества литых изделий. Приобретение понимания проблем развития литейного производства в области повышения качества отливок и путей их решения с учетом современных достижений науки и техники.

В результате освоения данной дисциплины у студентов формируются основные общекультурные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции, отвечающие требованиям ФГОС ВО, к результатам освоения ОПОП ВО по направлению 22.04.02 «Металлургия»:

Обладать готовностью проявлять инициативу, брать на себя ответственность (ОК-5).

Обладать готовностью проводить экспертизу процессов, материалов, методов испытаний (ОПК-9).

Обладать способностью выбирать методы и проводить испытания для оценки физических, механических и эксплуатационных свойств материалов ПК-14.

Учебная дисциплина «Современные методы контроля качества литых изделий» относится к обязательным дисциплинам вариативной части блока 1 ОПОП ВО.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

- **знать:** организацию контроля качества отливок в литейных цехах; основные виды дефектов, имеющих место при производстве отливок из, существующие методы их выявления. (ОПК-9, ПК-14).

- **уметь:** организовать контроль на различных операциях производства отливок; устанавливать причины возникновения брака на литье; устанавливать виновника брака, обобщать и анализировать информацию о состоянии качества отливок в литейном цехе (ОК-5; ОПК-9, ПК-14).

- **владеть:** основными понятиями качества отливок, способностями к анализу причин образования дефектов, средствами контроля качества отливок (ОПК-9, ПК-14).

## Практическая работа №1.

### Плавка стали в мартеновских печах

Цель работы:

- изучить порядок и особенности технологического процесса плавки сплавов на основе железа в мартеновских печах;
- основные периоды плавки стали в печи с основной футеровкой;
- основные периоды плавки стали в печи с кислой футеровкой;
- особенности расчёта шихты.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Температура стали на выпуске из печи составляет примерно 1600 °С. Плотность стали при этой температуре около 7,2 кг/дм<sup>3</sup>, энтальпия 350 кДж/кг, удельное электрическое сопротивление 1,3·10<sup>6</sup> Ом·м.

#### Схема и принцип действия мартеновской печи

В литейных цехах машиностроительных заводов для производства крупных стальных отливок используются мартеновские печи емкостью 5...50 т.

Мартеновская печь (рис.1) является пламенной регенеративной печью периодического действия.

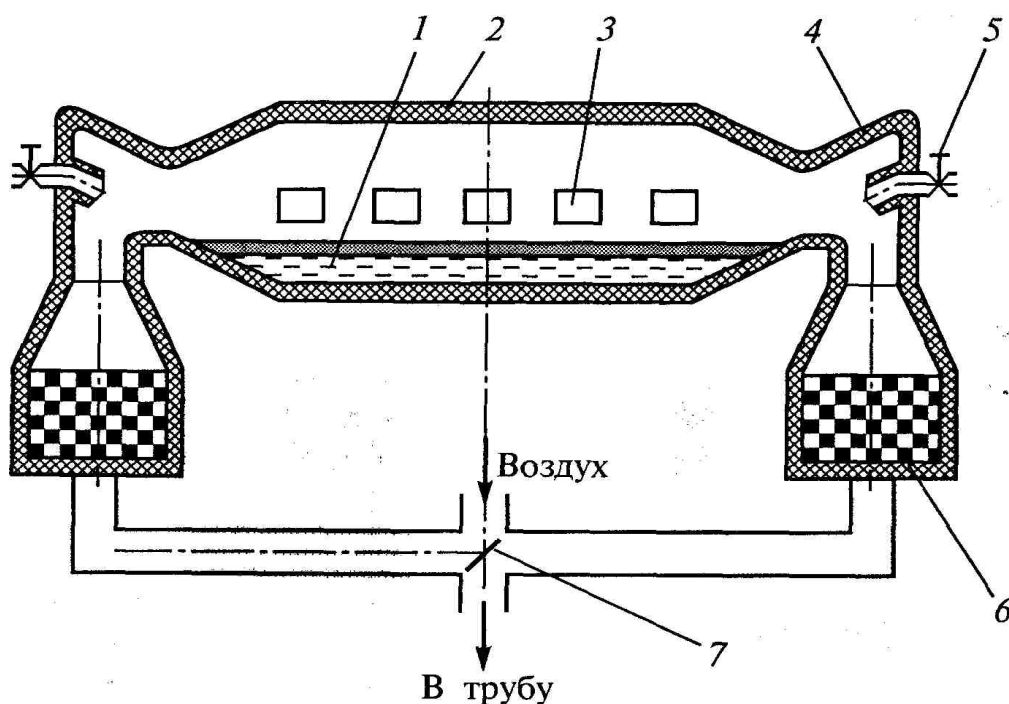


Рис.1. Схема мартеновской печи

В ванну печи 1, перекрытую сводом 2, через окна 3 загружается шихта,

состоящая, главным образом, из стального лома и чушкового чугуна. В торцах печи имеются головки 4, каждая из которых попеременно служит сначала для подачи в рабочее пространство печи топлива и воздуха, а затем для отвода продуктов горения.

На рис.1 отображен период работы печи, в котором левая головка служит для подачи топлива и воздуха, а правая — для отвода продуктов горения.

Выпуск стали при температуре около 1600 °С ведется через леточное отверстие, расположенное в нижней части ванны, напротив загрузочных окон 3. Чтобы достичь перегрева стали до 1600 °С через слой шлака, имеющего низкую теплопроводность, температура факела должна быть 1800... 1900 °С.

Жидкое и газообразное топливо, используемое в мартеновском процессе, обеспечивает такую температуру только при подогреве воздуха до 1000... 1300 °С.

Такой подогрев обеспечивают регенераторы 6, представляющие собой насадку из огнеупорного кирпича, по ячейкам которой поочередно пропускаются горячие газы и нагреваемый воздух. Когда температура воздуха на выходе из насадки снижается до минимальной, автоматически переключаются клапаны 5 и 7, и направление потока газов при этом меняется, воздух направляется в регенератор, разогретый в предыдущем периоде.

### **Плавка стали в мартеновской печи с основной футеровкой**

В настоящее время в литейных цехах плавку сталей (как и других литейных сплавов) приходится вести с использованием низкосортной шихты — стального лома неизвестного происхождения, содержание серы и фосфора в котором может быть повышенным. В этих случаях для получения качественной стали необходимо проведение комплекса металлургических операций, в числе которых:

- а) окисление С, Si, Mn и других легирующих элементов, которые могут содержаться в шихте в избыточных количествах;
- б) рафинирование металла от «неметаллической мути», образующейся при окислении этих элементов;
- в) удаление из металла газов, растворившихся в нем в период расплавления и окисления;
- г) удаление серы и фосфора;
- д) введение легирующих элементов;
- е) доводка металла до заданной температуры выпуска.

В курсе лекций показано, что перечисленные выше задачи можно решить в мартеновской печи только при наличии основной футеровки.

Футеровка печи выполняется из магнезитового кирпича. На под и откосы ванны поверх кирпича наносится слой магнезитового порошка.

Повреждения этого слоя перед каждой плавкой устраняются засыпкой свежего магнезита. Поврежденные места предварительно очищаются от металла и шлака.

Шихта. Минимальное количество передельного чугуна в шихте

определяется маркой выплавляемой стали, величиной угара углерода в период расплавления и избытком углерода, необходимым для нормального процесса кипения.

Процесс кипения, как известно, обеспечивает эффективное рафинирование металла от газов и неметаллических включений. Обычно величина избыточного углерода составляет около 0,5 %.

Поэтому при плавке, например, стали 35Л, содержание углерода в металле после расплавления должно быть  $0,35 + 0,5 = 0,85\%$ .

Величина угара углерода зависит от окисленности лома, продолжительности завалки и расплавления, содержания в шихте кремния, марганца, а также от других факторов, и составляет 30...40%. Поэтому с учетом угара 35% содержание углерода в шихте должно быть  $0,85 : 0,65 = 1,31$  %. Если в передельном чугуна содержится 4 % С, а в стальном ломе — 0,3 % С, то содержание чугуна в шихте  $x$  должно составить

$$4,0 \cdot x + 0,3(100 - x) = 1,31 \cdot 100; x = 27,3 \%$$

Расход известняка составляет 5... 10% от металлозавалки для образования первичного шлака с основностью 2,2.

Период загрузки и расплавления. Порядок загрузки устанавливается технологической инструкцией с учетом специфики данного производства. Однако общими являются следующие рекомендации:

- на подину следует загружать чистый лом в количестве 10... 25 % от общего количества стального лома в шихте;
- на лом загружать флюс — известняк;
- шихту прогреть в течение 10... 15 мин;
- на прогретый слой шихты заваливать остальную часть стального лома и после его прогрева в течение 20 мин загружать весь чугун.

Чугун плавится легче, чем сталь, и, стекая между кусками стальной шихты, передает им теплоту и науглероживает их, снижая тем самым температуру плавления.

Периоды загрузки шихты, ее нагрева и плавления составляют большую часть времени плавки. Поэтому период нагрева шихты частично совмещают с периодом ее загрузки. Расплавление ведут на полной тепловой мощности печи с применением кислорода для обогащения воздуха, специальных топливно-кислородных горелок или путем создания локальных зон, в которых теплота выделяется за счет окисления Si, Mn, Fe.

Окислительный период. Кремний как обладающий наибольшим сродством к кислороду из элементов шихты и образующий кислотный оксид окисляется почти полностью уже в период расплавления (см. курс лекций). Окисление кремния сопровождается выделением теплоты, что ускоряет процесс плавки.

*Марганец*, как и кремний, легко окисляется, взаимодействуя с кислородом газовой фазы и оксидами железа в шлаке. При окислении марганца также выделяется теплота. Однако при повышении температуры протекает

эндотермическая реакция восстановления марганца углеродом



*Фосфор* окисляется одновременно с кремнием и марганцем в начале плавки и также с выделением большого количества теплоты по реакциям и при условиях, рассмотренных в курсе лекций.

Фосфор стремятся удалить из металла в первой половине процесса кипения, когда металл еще сильно не разогрелся. Для создания окисленного шлака в него присаживают железную руду, окатыши или окалину.

При наличии основного шлака фосфор находится в нем в виде соединения  $(\text{CaO})_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ . Во избежание частичного перехода фосфора в шлак при повышении температуры и раскислении металла шлак скачивают на 50 %, после чего наводят новый шлак. При необходимости дальнейшего снижения содержания фосфора скачивание шлака проводят неоднократно.

Кипение стали. Это явление связано с окислением углерода в ванне металла по реакции



Эффект кипения создается в связи с выделением из расплава монооксида углерода CO. На первой стадии кипения, совпадающей с процессом дефосфорации, для увеличения концентрации (FeO) в шлаке в него добавляют, как отмечалось выше, железную руду, окатыши, окалину. Интенсивное перемешивание металла способствует выравниванию его температуры и химического состава, увеличению поверхности соприкосновения металла со шлаком и тем самым облегчает процесс удаления фосфора.

После проведения последнего скачивания фосфористого шлака и наведения нового шлака ванну переводят в режим чистого кипения. Оно происходит без ввода руды, за счет кислорода, накопленного в жидкой фазе. Чистое кипение сопровождается дегазацией металла и удалением из него твердых неметаллических включений (см. курс лекций).

По мере уменьшения концентрации монооксида железа в шлаке (около FeO) скорость окисления углерода уменьшается и в конце периода составляет около 0,1 %/ч. Это позволяет точно определить момент достижения заданного содержания углерода.

Раскисление стали. Для фиксации полученного содержания углерода проводят раскисление стали. Обычно используют глубинное (осаждающее) раскисление комплексным раскислителем — силикомарганцем (см. курс лекций). Раскислитель вводят из расчета получения в стали марганца и кремния в количествах, соответствующих нижнему пределу химического состава.

Удаление серы. После раскисления стали в печи создаются условия, необходимые для удаления серы (см. курс лекций): высокая основность шлака, высокая температура и низкая окисленность металла. Однако вследствие постоянного контакта шлака с окислительной атмосферой печи содержание в нем оксидов железа остается повышенным. Поэтому процесс десульфурации



приобретает ограниченное развитие. Коэффициент распределения серы между шлаком и металлом невелик и составляет 2... 10. Однако при обычной шихте получение стали с содержанием серы не более 0,04%, соответствующим требованиям ГОСТа для большинства марок, не представляет особых трудностей.

Легирование. Никель вводят вместе с шихтой. Корректирующие добавки никеля вводят до окончания чистого кипения, для того чтобы обеспечить выделение из расплава водорода, растворенного в никеле.

Феррохром и ферромарганец вводят после предварительного раскисления.

Молибден в виде ферромolibдена вводят заблаговременно в период дефосфорации, учитывая его тугоплавкость, чтобы обеспечить полное его растворение и равномерное распределение по ванне.

Окончательное раскисление проводят путем введения на желоб дробленого ферросилиция ФС75.

Кроме того, в ковш вводят алюминий из расчета 1 кг/т стали.

### **Особенности плавки в мартеновской печи с кислой футеровкой**

*Футеровка* выполняется из динасового кирпича, под печи наваривают чистым высококремнистым песком или молотым кварцитом. Состоянию пода уделяется особое внимание при заправке печи, так как в кислой печи под принимает активное участие в процессах, протекающих в ванне.

Для увеличения стойкости свода кислой печи его нередко выполняют из основного хромомагнезитового кирпича.

*Шихта* имеет свои особенности. В связи с невозможностью удаления серы и фосфора из металла в кислой печи их содержание в шихте не должно превышать допустимого в выплавляемой марке стали. Минимальное содержание передельного чугуна в шихте определяется так же, как при плавке в основной печи.

В связи с тем, что в кислом процессе в шихту не добавляют известняк, металл может оказаться покрытым недостаточным слоем шлака, в результате чего он интенсивно окисляется и насыщается газами. Для предотвращения этого на подину печи загружают конечный кислый шлак предыдущих плавов, кварцевый песок и шамотный бой в количестве 3...4%.

Окислительный период. Основные оксиды марганца и железа, образующиеся в период расплавления и в начале перегрева, вступают во взаимодействие с кремнеземом, образующимся при окислении кремния шихты. В результате появляются сравнительно легкоплавкие силикаты железа и марганца, однако этого количества  $\text{SiO}_2$  для ошлакования  $\text{FeO}$  и  $\text{MnO}$  обычно недостаточно.

Недостающее количество кремнезема переходит в шлак из пода и футеровки. Таким образом, кислая футеровка и под регулируют состав шлака после расплавления.

Практически, несмотря на существенные различия состава шихты, состав шлака после расплавления остается примерно одинаковым, %:  $\text{FeO}$  15...20,  $\text{MnO}$

20...30, SiO<sub>2</sub> 42...47. Находясь в контакте с футеровкой и подом, шлак кислого процесса непрерывно обогащается кремнеземом, и к концу плавки его содержание достигает 55...60 %.

Кипение стали, связанное с окислением углерода, приводит к дегазации расплава и удалению из него твердых неметаллических включений. По мере восстановления FeO углеродом интенсивность кипения уменьшается, и создаются условия для восстановления кремния из шлака и футеровки по тигельной реакции:



(см. курс лекций).

В дальнейшем возможны два варианта продолжения процесса плавки — активный и кремневосстановительный.

При *активном процессе* протекание тигельной реакции ограничивают вводом руды. Тогда углерод взаимодействует с кислородом руды, содержание его уменьшается, и, когда оно достигнет заданного, в металл вводят раскислители. Содержание кремния в металле не превосходит 0,12 %.

При *кремневосстановительном процессе* обеспечивают возможность протекания тигельной реакции, для этого не вводят железную руду. Количество кремния в металле, восстановившегося в результате тигельной реакции, доводят до 0,22 % и более.

Проба металла, взятая в этом случае из печи, затвердевает спокойно с утяжиной, что свидетельствует о раскисленности металла. В этом случае ограничиваются только *окончательным раскислением*.

*Преимущество кремневосстановительного процесса состоит в уменьшении вводимых в металл раскислителей, которые вносят соответственно меньшее количество газов и твердых неметаллических включений.*

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое мартеновская печь?
2. Перечислите основные элементы конструкции мартеновской печи.
3. Составьте описание технологического процесса плавки стали в мартеновской печи.
4. Поясните особенности процесса плавки стали в мартеновской печи с основной футеровкой.
5. Поясните особенности процесса плавки стали в мартеновской печи с кислой футеровкой.

## Практическая работа №2.

### Плавка стали в конвертерах

Цель работы:

- изучить порядок и особенности технологического процесса плавки стали в конвертерах;
- изучить схему, особенности устройства и принцип действия конвертера.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Жидкий чугун, необходимый для процесса, получают плавкой в вагранке. Для выплавки стали в литейных цехах используют воздушные конвертеры с боковым дутьем емкостью 1... 5 т (рис.2).

#### Схема и принцип действия конвертера

Принцип действия конвертера состоит в переделе жидкого чугуна в сталь путем продувки его воздухом. Источником тепла, необходимого для процесса, являются реакции окисления Si, Mn, C и частично Fe.

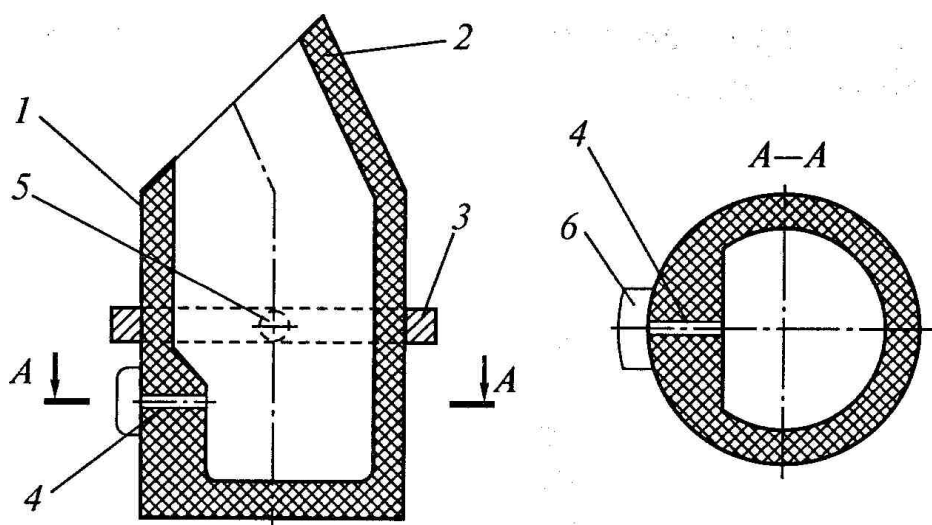


Рис.2. Схема конвертера с боковым дутьем

Стальной кожух 1 конвертера имеет двухслойную футеровку 2. Арматурный слой выкладывается шамотом, рабочий — динасовым кирпичом. Футеровка цилиндрической части конвертера имеет толщину 250 мм, а в области фурм — 350...450 мм.

Фурмы 4 диаметром 25... 40 мм располагают в один ряд, число фурм 5... 6.

Конвертер закреплен на опорном кольце 3 двумя цапфами 5. Одна из цапф полая, через нее подают воздух в распределительную коробку 6 фурм.

Горловина конвертера имеет уклон 30°, что позволяет заливать чугун при

горизонтальном положении конвертера.

## Технология плавки

Чугун, заливаемый в конвертер, должен содержать достаточное количество кремния (около 2 %) как главного источника теплоты процесса.

Температура заливаемого чугуна — 1300... 1400 °С.

При плавке этого чугуна в вагранке используют возврат собственного производства стальных отливок (около 50 %) и пердедельный низкофосфористый чугун.

Для снижения содержания серы в выплавленном ваграночном чугуне применяют ковшовую десульфурацию кальцинированной содой, карбидом кальция и др.

Перед заливкой металла конвертер разогревают до 1000... 1100 °С.

Залитый чугун продувают воздухом под давлением 0,12... 0,15 МПа.

Продувка делится на два периода.

В первом периоде (4... 6 мин) включают дутье и поворачивают конвертер так, чтобы фурмы были слегка погружены в металл. При этом кислородом воздуха окисляется в первую очередь железо (по закону действующих масс), затем кремний и марганец, которые окисляются не только кислородом воздуха, но и монооксидом железа, растворенным в шлаке и в металле.

Во втором периоде происходит окисление углерода. Конвертер наклоняют так, чтобы дутье поступало на поверхность металла. Это создает условия для догорания СО, образующегося в ванне металла, до СО<sub>2</sub> над ее поверхностью.

Появление бурого дыма над горловиной конвертера свидетельствует о том, что Si, Mn и С выгорели, и начался интенсивный угар железа.

Продувку прекращают, вводят недостающее количество углерода и марганца с углеродистым ферромарганцем. При этом одновременно происходит предварительное раскисление стали. Окончательное раскисление стали проводят во время выпуска ферросилицием и алюминием.

Применение в конвертерах воздуха, обогащенного кислородом, или технически чистого кислорода позволяет сократить продолжительность плавки, использовать в шихте стальной лом, уменьшить угар металла.

При чисто кислородном дутье достаточно одной фурмы, представляющей собой медную трубку, защищенную огнеупорной трубкой. Фурма устанавливается в боковой стенке конвертера под углом 30... 45° к поверхности ванны.

При продувке кислорода в конвертер перед заливкой чугуна загружают до 40 % стального лома. В начале продувки устье фурмы должно быть заглублено в металл на 50... 100 мм.

В отличие от вдувания воздуха при кислородном дутье с самого начала окисляются одновременно кремний, марганец и углерод. Окисление кремния и марганца заканчивается через 3...5 мин. После этого конвертер наклоняют так,

чтобы фурма располагалась над уровнем металла и дутье расходовалось на дожигание СО в полости конвертера.

Длительность продувки при давлении 0,5... 1,5 МПа составляет 10... 15 мин. Сталь, выплавленная на кислородном дутье, содержит в 2 — 3 раза меньше азота, чем при воздушном дутье.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте схему конвертера с указанием основных элементов и устройств.
2. Поясните: назначение и принцип действия конвертера.
3. Особенности рафинирования стали при её обработке в конвертере.
4. Когда и при каких условиях заканчивают продувку?
5. Сущность и назначение двух периодов продувки.
6. При какой температуре чугун заливают в конвертер.

## **Практическая работа №3.**

### **Плавка стали в дуговых печах**

Цель работы: изучить технологический процесс плавки стали в дуговых печах

#### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Для плавки стали используются дуговые печи, которые по принципу действия не отличаются от чугуноплавильных печей.

В литейных цехах основную массу стали выплавляют в дуговых печах емкостью 0,5... 12, реже 25 т.

Сталь в отличие от чугуна не допускает длительной выдержки в печах ожидания. Поэтому в крупносерийном производстве для согласования периодичности действия дуговых печей с непрерывно действующими формовочными линиями используются печи небольшой емкости.

Металлургические возможности и технология плавки стали в печах с кислой и с основной футеровкой существенно различаются.

#### **Плавка стали в основной дуговой печи с окислением примесей**

Этот метод плавки применяют при использовании стального лома с повышенным содержанием фосфора и серы, а также для выплавки малоуглеродистой стали.

Плавка состоит из шести периодов, в числе которых периоды заправки печи, загрузки шихты, плавления, окислительный период, восстановительный период и период выпуска готовой стали.

Шихта состоит из собственного возврата около 50%, чушкового чугуна до 10 % для создания избытка углерода, необходимого для кипения, и стального лома. Чтобы совместить удаление фосфора с расплавлением шихты, в завалку добавляют 2...3% извести и около 2 % руды.

Заправка проводится немедленно после выпуска предыдущей плавки. Подина, откосы и все углубления очищают от оставшихся металла и шлака, и на поврежденные места забрасывают магнезитовый порошок.

Загрузку ведут с помощью корзины (бадьи) с раскрывающимся дном, которую вводят в открытую печь сверху. При заполнении корзины на дно укладывают часть мелкой шихты, чтобы защитить подину от ударов крупных кусков лома. Затем в центре укладывают крупный лом, а по периферии сверху оставшийся мелкий лом и возврат.

Плавление ведут путем проплавления колодцев при максимальной мощности трансформатора.

В период плавления полностью окисляется кремний, 40...60% марганца, происходит частичное окисление фосфора, углерода и железа. Формируется шлак,

в составе которого содержится 0,5... 1,5 %  $P_2O_5$ .

В период окисления необходимо обеспечить следующие процессы:

- уменьшить содержание фосфора в металле до 0,01 ...0,015 %;
- довести содержание углерода до заданного;
- дегазировать расплав и обеспечить всплытие твердых неметаллических включений;
- перегреть металл до температуры, близкой к температуре выпуска.

Если необходимая скорость окисления не обеспечивается оксидами железа, содержащимися в шихте, и притоком кислорода в печь за счет газоотсоса, то в печь добавляют железную руду либо вводят газообразный кислород.

Окислительный период начинается со скачивания шлака, образовавшегося в период расплавления, для *удаления из печи фосфора*. Скачивание фосфористого шлака облегчено возможностью наклона печи в сторону рабочего окна на 10... 15°.

После наведения нового шлака добавкой свежесожженной извести и руды продолжается окисление фосфора и начинается интенсивное окисление углерода (кипение стали). Связанное с этим выделение пузырьков CO вспенивает шлак, в результате чего фосфористый шлак стекает через порог рабочего окна. Таким образом, содержание фосфора в металле удается снизить до 0,01 %.

Кипение стали сопровождается *удалением азота и водорода*, растворившихся в ней в предыдущих периодах плавки, а также флотацией «неметаллической мути».

Для успешного протекания этих процессов количество углерода, окисленного в процессе кипения, должно быть не менее 0,35 % при плавке углеродистых сталей и не менее 0,45 % при плавке легированных сталей.

Продолжительность окислительного периода составляет 35...50 мин. Применение кислорода в окислительном периоде уменьшает продолжительность этого периода и сокращает расход электроэнергии и руды.

Когда содержание углерода в стали достигнет заданного, окислительный период завершают. Для этого полностью скачивают шлак окислительного периода во избежание возврата остатков фосфора в металл.

Восстановительный период. Задачами этого периода являются:

- раскисление металла;
- удаление серы;
- доведение химического состава до заданного;
- перегрев металла до заданной температуры.

Эти задачи решаются практически параллельно под *белым шлаком*. Для его наведения вводят шлаковую смесь, состоящую из извести, плавикового шпата и шамотного боя. После расплавления смеси образуется жидкоподвижный шлак, с помощью которого успешно протекает *диффузионное раскисление* стали (см. курс лекций).

Для раскисления шлака в него вводят смесь размолотого ферросилиция и кокса при их расходе по 5 кг/т металла каждого. В соответствии с законом

распределения концентрация монооксида железа в металле уменьшается пропорционально ее концентрации в шлаке.

Преимуществом диффузионного раскисления является то, что реакции раскисления протекают в шлаке, поэтому продукты раскисления образуются и остаются в шлаке, и не «замутняют» металл.

О степени завершенности диффузионного раскисления судят по цвету затвердевшей пробы шлака. По мере уменьшения в нем содержания FeO застывшая проба шлака светлеет. Белый цвет рассыпающегося в порошок шлака свидетельствует об окончании процесса диффузионного раскисления.

*Десульфурация металла* в основных дуговых печах характеризуется максимальной эффективностью по сравнению с ранее рассмотренными процессами. Это объясняется максимально полной реализацией трех условий ее протекания (см. курс лекций):

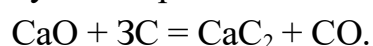
- высокая основность шлака;
- высокая температура шлака, нагреваемого электрической дугой, обеспечивающая хорошую активность, несмотря на высокую основность;
- низкая окисленность шлака и металла.

В результате коэффициент распределения серы между шлаком и металлом составляет 20...60 (для сравнения напомним, что в основной мартеновской печи его значения не превышают 10).

В конце восстановительного периода проводят легирование металла элементами, имеющими высокое сродство к кислороду.

В некоторых случаях восстановительный период проводят не под белым, а *под карбидным шлаком*.

Для этого после скачивания шлака окислительного периода в печь вводят шлаковую смесь, содержащую, кроме извести и плавикового шпата 6...8 кг молотого кокса на 1 т металла. Печь герметизируют, выключают газоотсос, при этом в зоне горения дуги образуется карбид кальция по реакции

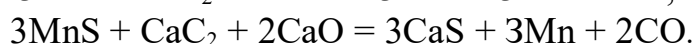
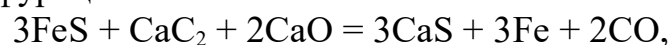


Образующийся карбид кальция обладает исключительно высокой раскислительной и десульфурующей способностью:

реакции раскисления



реакции десульфурации



Выдержка под карбидным шлаком, содержащим 1,5... 2 % CaC<sub>2</sub>, составляет 30...40 мин, тем не менее, при выпуске металла частицы карбидного шлака смешиваются с ним, образуя загрязнения металла. Поэтому за 20... 30 мин до выпуска карбидный шлак переводят в белый. Для этого открывают рабочее окно печи и включают газоотсос. Кислород воздуха окисляет карбид кальция до CaO и CO, превращая карбидный шлак в белый.



Обработка карбидным шлаком приводит к увеличению содержания в металле углерода, что делает процесс непригодным для выплавки низкоуглеродистых сталей. Наибольшее применение процесс получил для выплавки высокоуглеродистых и легированных инструментальных сталей.

Легирование. Порядок ввода легирующих определяется их сродством к кислороду. Чем выше сродство элемента к кислороду, тем позже следует его вводить в металл.

Никель, молибден, медь во время плавки не окисляются, поэтому их вводят в начальные периоды плавки.

Хром, марганец и вольфрам обладают большим сродством к кислороду, чем железо, поэтому легирование этими элементами проводят только после раскисления ванны. В связи с высокой температурой плавления ферровольфрама (около 2000 °С) он медленно растворяется в металле, поэтому его присаживают в ванну не позднее, чем за 30 мин до выпуска.

Кремний, ванадий, титан и алюминий особенно легко окисляются, поэтому феррованадий вводят за 15...35 мин до выпуска, ферросилиций — за 10... 20 и алюминий — за 2... 3 мин до выпуска. Ферротитан вводят в ковш, либо в печь за 5... 10 мин до выпуска металла.

### **Плавка стали в основной дуговой печи без окисления примесей**

Этот метод наиболее рационален при выплавке легированных сталей с использованием в шихте легированного лома и отходов.

Отсутствие окислительного периода позволяет в максимальной степени сохранить легирующие элементы, содержащиеся в шихте.

Для получения заданного состава требуются минимальные присадки легирующих добавок, компенсирующие угар при расплавлении. Ориентировочно величины угара при расплавлении составляют:

Элемент.....	Al	Ti	Si	V	Mn	Cr	W
Угар, %.....	100	80...90	40...100	15...20	15...25	10...15	5...15

После расплавления шлак, как правило, не скачивают, имея в виду возможность частичного восстановления оксидов легирующих элементов, содержащихся в нем.

Раскисление, десульфурацию и легирование проводят так же, как при плавке с окислением примесей.

### **Особенности кислого процесса**

Кислая футеровка обладает большей термостойкостью по сравнению основной, что является важным ее преимуществом в условиях литейных цехов, работающих с перерывами в одну или две смены. Кроме того, пониженная отражательная способность кислого шлака уменьшает тепловую нагрузку на футеровку.

По этим причинам стойкость футеровки кислых дуговых печей выше, чем основных. Стоимость кислых огнеупоров в 2 — 2,5 раза ниже, чем основных.

Теплопроводность кислых огнеупоров ниже, чем основных, что способствует уменьшению тепловых потерь. Влияние шлака на металл в кислых печах менее существенно, чем в основных. Поэтому глубина ванны в кислых печах больше, чем в основных при том же диаметре ванны. В результате этого тепловой КПД кислых печей выше, чем основных. Этим объясняется широкое использование кислых дуговых печей в сталелитейных цехах.

Шихта. Для плавки в кислых дуговых печах содержание серы и фосфора в шихте должно быть ниже допустимого предела в готовой стали, так как удалить их в процессе плавки не удастся.

Для эффективного рафинирования металла в процессе кипения содержание углерода в шихте должно быть большим, чем в готовом металле, на 0,15 ... 0,20 %. Для этого в шихту наряду с возвратом и отборным стальным ломом добавляют передельный чугунок, кокс или электродный бой. Порядок загрузки шихты в печь такой же, как при основном процессе.

Период расплавления сопровождается окислением кремния, марганца, железа и углерода. Доля образующегося при этом шлака невелика, поэтому для улучшения защиты расплавляемого металла от окисления и растворения газов объем шлака увеличивают добавкой сухого песка, шлака предыдущей плавки или формовочной смеси.

В конце периода расплавления шлак имеет следующий состав, %:  $\text{SiO}_2$  40...50;  $\text{FeO}$  15...30;  $\text{MnO}$  10...30;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2...6; прочие оксиды 5... 15.

Окислительный период имеет целью дегазацию металла в процессе кипения. Окисление углерода происходит оксидами железа и марганца, содержащимися в шлаке. При этом содержание  $\text{SiO}_2$  в шлаке растет, и к концу кипения оно достигает 60 %, способствуя процессу восстановления кремния.

При активном процессе восстановления кремния сдерживают присадкой руды и извести, кипение продолжают до достижения заданного содержания углерода. Раскисление проводят в два этапа — введением ферросилиция и ферромарганца в печь, а при выпуске металла — присадкой алюминия в ковш.

При кремневосстановительном процессе содержание восстановленного кремния доводят до 0,2 %. При этом требуется только раскисление в ковше алюминием.

### **Особенности плавки стали в дуговых печах постоянного тока**

Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока получили распространение с начала 1980-х гг., после того, как было освоено производство мощных, экономичных и надежных выпрямителей на базе тиристоров.

К 1993 г. в мире эксплуатировалось около 80 печей постоянного тока емкостью до 150 т.

Большая часть печей постоянного тока — это вновь создаваемые печи, но в

ряде случаев они представляют собой результат реконструкции печей, работавших на переменном токе.

Дуговые печи постоянного тока обычно имеют только один графитовый электрод, диаметр которого может достигать 700 мм. По сравнению с электродами печей переменного тока, в которых наблюдается поверхностный эффект, плотность постоянного тока равномерна по сечению электрода.

Важнейшее конструктивное отличие дуговой печи постоянного тока состоит в наличии подового электрода. Подовый электрод располагается не соосно с верхним электродом, а на расстоянии 500...600 мм от оси печи. Это обеспечивает интенсивное электромагнитное перемешивание металла в ванне.

Кроме того, к преимуществам таких печей относятся:

- уменьшение, примерно, в 5 —9 раз удельного расхода графитовых электродов;
- связанное с этим уменьшение вредных выбросов из печи;
- уменьшение шума и вибрации при работе печи;
- некоторое снижение расхода электроэнергии и угара металла при плавке.

В то же время следует отметить усложнение конструкции и эксплуатации пода печи в связи с расположением в нем подового электрода.

Технология плавки в дуговых печах постоянного тока может не иметь существенных отличий от плавки в печах переменного тока.

Но часто технологией предусматривается загрузка шихты на металл и шлак, частично оставленные в печи от предыдущей плавки. Используются также топливно-кислородные горелки в начале плавления и вдувание кислорода в ванну металла.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните особенности технологического процесса плавки стали в дуговой печи с основной футеровкой.
2. Поясните сущность технологического процесса плавки стали с окислением примесей.
3. Особенности кислого процесса плавки стали.
4. Особенности плавки стали в дуговых печах постоянного тока.

## Практическая работа №4.

### Плавка стали в индукционных тигельных печах

Цель работы: изучить особенности технологического процесса плавки стали в индукционных тигельных печах

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для плавки стали используются те же среднечастотные печи, что и для чугуна. Эти печи имеют емкость от 60 кг до 10 т.

Продолжительность плавки в таких печах обычно не превышает 1... 1,3 ч.

Высокая производительность и малая емкость индукционных тигельных печей позволяют эффективно их использовать при производстве некрupных отливок в конвейеризированном производстве. Так, например, в цехе точного литья по выплавляемым моделям КамАЗа использовалось 30 индукционных тигельных печей емкостью по 400 кг. Готовый металл из каждой печи выдавался в два разливочных ковша, что обеспечивало минимальную продолжительность выдержки стали перед разливкой в формы, а следовательно, и минимальные изменения состава стали за время выдержки.

Наиболее важной металлургической особенностью плавки в индукционной тигельной печи является низкая температура шлака. Это объясняется тем, что шлак, образующийся в тигельной печи, практически неэлектропроводен. Поэтому вихревые токи, а следовательно, и теплота генерируются только в металле, который разогревает шлаковый покров снизу. Поверхность шлака «захлаживается» атмосферой печи.

Таким образом, в отличие от шлака мартеновских и дуговых печей, шлак индукционных печей всегда «холоднее» металла. Низкая температура шлака делает нерезультативными процессы рафинирования металла от вредных примесей — фосфора и серы. Поэтому при плавке стали в индукционной тигельной печи используют шихтовые материалы, чистые по фосфору и сере.

Не обеспечивая возможности рафинирования металла, «холодный» шлак индукционных печей в то же время хорошо защищает металл от окисления, образуя на его поверхности плотный слой, препятствующий контакту металла с кислородом воздуха.

Это свойство шлака особенно важно при плавке легированных сталей, так как обеспечивает минимальный угар дорогостоящих легирующих элементов. Поэтому задачей плавки стали в индукционной тигельной печи является простой переплав шихты, средний состав которой соответствует заданному, с минимальными потерями на угар.

## Выбор футеровки печи

Стойкость кислой футеровки тиглей в два раза выше, чем основной, а стоимость ее ниже. В этой связи основную футеровку печи следует применять для выплавки сталей с высоким содержанием хрома, марганца, титана, циркония, алюминия, которые в кислых печах интенсивно угорают и разрушают футеровку. В остальных случаях предпочтительнее кислая футеровка.

### Плавка в печи с кислой футеровкой

Известно, что при нагреве мелкой шихты выше температуры в точке Кюри не удается «забрать» от источника питания его номинальную мощность, поэтому продолжительность периода расплавления и угар металла увеличиваются.

Исходя из этого, для *первичной садки* отбирают куски оптимального размера для данной частоты тока (см. курс лекций) и загружают их ближе к стенкам тигля в среднюю по высоте его часть, где напряженность магнитного поля имеет максимальное значение. В эту часть тигля следует загружать чушковый чугун и чугунный лом, если они входят в состав шихты. Чугунные компоненты шихты, более легкоплавкие, чем сталь, быстрее образуют на дне тигля жидкую ванну металла, в которой куски стали не только расплавляются, но и растворяются. Это позволяет сократить продолжительность периода расплавления.

Важно отметить, что только после образования жидкой ванны проявляется защитное действие шлака на ее поверхности. Мелкую шихту — стружку, высежку и т. п. — загружают на дно тигля в зону ослабленного магнитного поля.

Период расплавления. Верхнюю часть тигля не следует загружать плотно, так как это затруднит осаживание шихты вниз по мере расплавления кусков, расположенных в средней части тигля.

Несоблюдение этой рекомендации приводит к образованию сводов, что вызывает увеличение продолжительности плавки и угара металла, а также вызывает ускоренный износ футеровки.

Свод образуется вследствие того, что раскаленные куски стальной шихты свариваются между собой и висят в верхней части тигля, суживающегося книзу. Основная часть энергии выделяется в этот период в жидком металле, в то время как мощность, выделяющаяся в своде, в значительной мере теряется в атмосферу. Поэтому свод расплавляется медленно, а жидкий металл чрезмерно перегревается и интенсивно разрушает футеровку. Попытки осадить свод сильными ударами лома приводят к механическому разрушению тигля.

Для печей малой емкости (до 160 кг) целесообразно при загрузке шихты оставлять свободное пространство в верхней части тигля у стенки. В случае образования свода через это пространство сталкивают в жидкую ванну подогретые куски шихты. Это позволяет снять опасный перегрев ванны и постепенно повысить уровень жидкого металла до уровня свода.

Шлак во время плавления шихты наводят добавками боя стекла, шамота и

известии.

Раскисление проводят присадкой в печь ферросилиция и в ковш алюминия.

Ввод легирующих добавок проводят с учетом закономерностей их угара и усвоения, рассмотренных выше.

### **Особенности плавки в индукционных тигельных печах с основной футеровкой**

Футеровка печи выполняется из магнезитовых и хромомагнезитовых порошков, зерновой состав которых зависит от емкости печи.

Для наведения шлака используется смесь извести, плавленого шпата и магнезита. При необходимости снизить содержание фосфора в металле, шлак, образовавшийся после расплавления, снимают и наводят новый с использованием той же шлакообразующей смеси.

### **Плавка стали в вакуумных индукционных печах**

В современном машиностроении многие отливки нельзя получить, не используя вакуумной плавки или внепечной вакуумной обработки. Принцип действия индукционных тигельных печей позволяет наиболее просто и полно реализовать преимущества плавки и заливки под вакуумом.

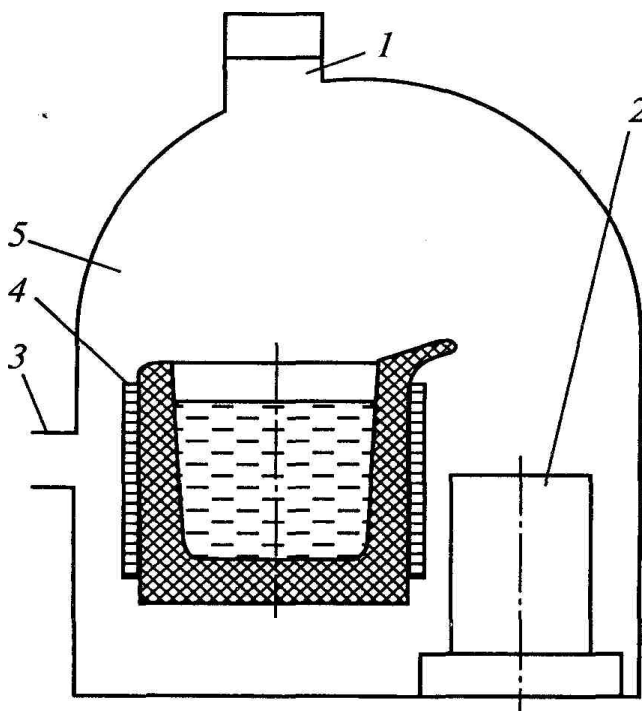


Рис. 14. 3 Схема индукционной печи

- 1 – дозатор; 2 – литейная форма; 3 – патрубок к вакуумному насосу;  
4 – индукционная печь; 5 – вакуумная камера

Эти преимущества состоят в том, что в индукционной вакуумной печи:

- можно выплавлять стали, легированные практически любыми элементами, за исключением летучих металлов;
- сталь в процессе плавки подвергается глубокой дегазации;
- снижается необходимое количество раскислителей;
- особенно эффективным становится раскисление углеродистых сталей углеродом, так как оно не сопровождается образованием твердых продуктов раскисления, загрязняющих расплав.

Для плавки в индукционной вакуумной печи используют шихтовые материалы, чистые от масел, окалины и ржавчины.

Плавление ведут при непрерывной откачке газов из рабочего пространства.

За время плавления из металла удаляется большая часть газов, содержащихся в шихте. После расплавления делают выдержку, в течение которой завершается рафинирование металла, и вводят раскислители и легирующие элементы через шлюзовой дозатор.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём заключаются особенности приготовления «первичной садки»?
2. Что такое «свод»? Причина образования свода.
3. Почему в индукционной печи образуется «холодный шлак»?
4. Преимущества и недостатки «холодного шлака»?
5. Особенности конструкции индукционной вакуумной печи.

### Практическая работа №5.

## Плавка стали в плазменных печах. Электрошлаковый переплав и литьё стали

Цель работы:

- изучить особенности технологического процесса плавки стали в плазменных печах;
- изучить особенности электрошлакового переплава и литья стали

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

#### Плавка стали в плазменных печах

Для плавки стали используют плазменные печи с огнеупорной футеровкой 1 (рис.4).

В плазматроне 2 под действием электрической дуги и электромагнитного поля образуется поток ионизированного газа (плазма), температура которого достигает 20000 °С.

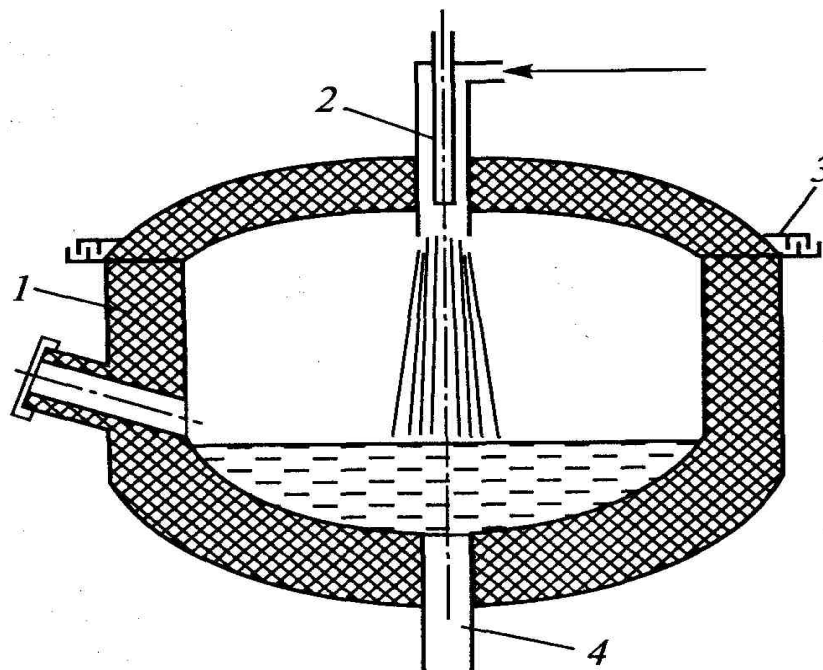


Рис.4. Схема плазменной печи

1 - футеровка; 2 - плазматрон; 3 - уплотнение; 4 – анод

Плазменная дуга горит между плазматроном и расплавляемым металлом.

При работе на постоянном токе ванна металла контактирует с водоохлаждаемым медным анодом 4. В трехфазных печах ее подсоединяют к нулевой точке источника питания.



Источником полезной теплоты являются излучательная энергия дуги, направленная на расплавляемый металл, и энергия, выделяющаяся в анодном пятне.

Шихту загружают при снятом своде, для чего печи оборудуются поворотным сводом или выкатной ванной. Свод устанавливается на корпус печи, на плазматрон подается напряжение, в результате чего загорается стартовая дуга между электродами соплом плазматрона. После этого плазматрон приближают к шихте на расстояние, при котором дуга начинает гореть между плазматроном и шихтой. Затем, отводя плазматрон, устанавливают рабочую длину плазменной дуги.

Благодаря наличию уплотнения 3 между корпусом и сводом печи в атмосфере печи содержится значительное количество аргона. В результате этого угар элементов при плавке минимальный - 60...80 %. Кроме того, из расплава в газовую фазу переходят кислород, водород и азот.

Важным преимуществом плазменных печей является отсутствие необходимости использования графитовых электродов, т. е. исключение связанных с этим пылегазовыделений в окружающую среду.

Однако стоимость стали, выплавленной в плазменных печах, выше в связи с большим удельным расходом электроэнергии на плавку и высокой стоимостью аргона.

При плавке высоколегированных сталей уменьшение расхода дорогостоящих легирующих элементов имеет решающее значение, поэтому применение плазменных печей для плавки таких сталей экономически целесообразно.

### **Электрошлаковый переплав стали**

Схема электрошлакового переплава с расходуемым электродом показана на рис.5.

Расходуемый электрод 1 представляет собой пруток, сформированный в процессе непрерывной разливки стали, выплавленной в дуговой печи. Электрический ток проходит от расходуемого электрода, погруженного в шлаковую ванну 2, к поддону 3 кристаллизатора 4.

Шлаковую ванну в кристаллизаторе образуют путем заливки в него жидкого шлака из шлакоплавильной печи либо расплавлением шлаковой смеси непосредственно в кристаллизаторе. Расплавленный шлак электропроводен, но обладает высоким электрическим сопротивлением.

Теплота, выделяющаяся при прохождении тока через шлак, разогревает его до 1700... 2000 °С, при этом торец электрода оплавляется и по каплям стекает вниз, проходя через шлак.

Постепенно под шлаком образуется металлическая ванна. В ванне жидкого металла развивается процесс кристаллизации, образуется слиток, который опускается вниз вместе с поддоном. Направленная кристаллизация слитка и непрерывное поступление жидкого металла в зону кристаллизации обеспечивают

получение плотного слитка без усадочных раковин и рыхлот.

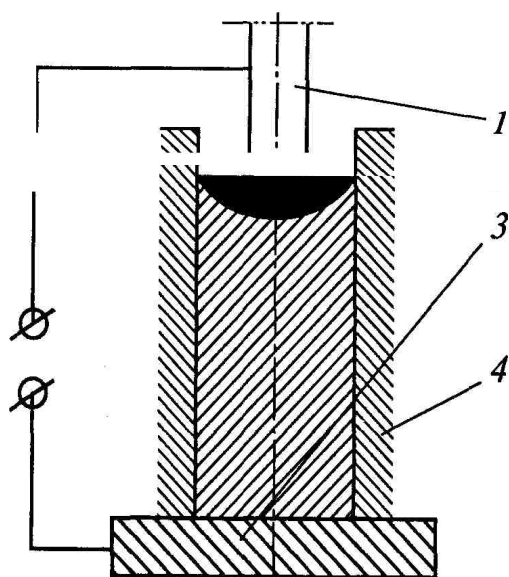


Рис.5. Схема электрошлакового переплава:  
1 – электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – поддон; 4 – кристаллизатор

Составы шлаков при электрошлаковом переплаве различны, чаще всего используют шлак на основе  $\text{CaF}_2$  с добавками  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Проходя через такой шлак, капли металла очищаются от серы и неметаллических включений. Высокая эффективность воздействия шлака на металл объясняется большой поверхностью контакта, высокими основностью и температурой шлака.

В литейном производстве затвердевание металла, полученного электрошлаковым переплавом, происходит в кристаллизаторе, полость которого соответствует наружным очертаниям отливки (рис.6).

Отличительной особенностью этого метода, получившего название электрошлакового литья (ЭШЛ), является одновременность процессов приготовления жидкого металла и формообразования отливки.

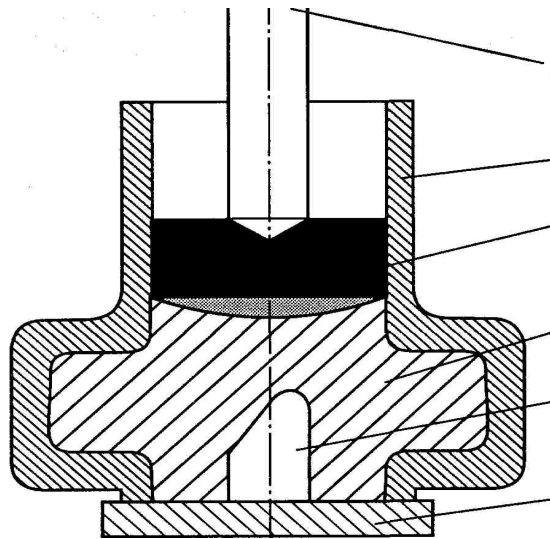


Рис.6. Схема электрошлакового литья:  
 1 — расходуемый электрод; 2 — кристаллизатор-форма; 3 — шлак;  
 4 — затвердевший металл; 5 — стержень; 6 — поддон

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните особенности процесса плавки стали в плазменных печах.
2. Расскажите сущность процесса электрошлакового переплава стали.
3. Особенности процесса электрошлакового литья стали.
4. Нарисуйте схему конструкции плазмотрона.
5. Нарисуйте схему процесса электрошлакового переплава стали.