

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

А. В. Ткаченко, О. Л. Юшкина

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАВКИ

КУРС ЛЕКЦИЙ

по одноименной дисциплине

для студентов специальности 1-36 02 01

«Машины и технология литейного производства»

дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2009

УДК 621.745.5(075.8)
ББК 34.61я73
Т48

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 24.09.2008 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Инженерная графика» ГГТУ им. П. О. Сухого
А. М. Селютин

Т48 **Ткаченко, А. В.**

Теория и технология плавки : курс лекций по одной дисциплине для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» днев. и заоч. форм обучения / А. В. Ткаченко, О. Л. Юшкина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 67 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-873-2.

Рассмотрена общая характеристика процесса плавки металлов. Отражены вопросы теории и технологии плавки черных и цветных металлов. Приведены физико-химические характеристики процессов плавки.

Для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.745.5(075.8)
ББК 34.61я73

ISBN 978-985-420-873-2

© Ткаченко А. В., Юшкина О. Л., 2009
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных технологических операций и главным признаком литейного производства является плавка литейных сплавов, т. к. при любом виде литейной технологии обязательными этапами являются приготовление сплава в жидком состоянии, а затем кристаллизация его в виде отливки.

Получение отливок с заданным уровнем механических и эксплуатационных свойств – одна из важнейших задач, реализуемых в ходе трех основных этапов: плавки сплава, его внепечной обработки, т. е. обработки различными методами в жидком состоянии, и термической обработки.

Развитие современных отраслей машиностроения потребовало совершенствования технологии получения отливок с заданными свойствами. В результате расширилась номенклатура используемого для плавки оборудования, появились новые методы плавки, шире стала применяться внепечная обработка литейных сплавов различными методами внешнего воздействия.

Развитие энергетической основы плавки литейных сплавов, длительное время базировавшейся на сжигании топлива, в настоящее время связано с использованием электроэнергии и применением новых методов плавки, например, плазменной, электронно-лучевой и др., а также с широким развитием в последнее время известных, но мало использовавшихся методов, например, индукционной плавки.

Формирование свойств сплава происходит в результате различного рода физико-химических процессов, протекающих во время плавки и внепечной обработки расплава.

Теория процессов плавки литейных сплавов, охватывающая общие принципы плавки в литейном производстве, изучение особенностей строения и свойств исходных веществ, анализ термодинамики механизма и кинетики процессов, лежит в основе выбора исходных материалов для плавки и ее технологии, т. е. совокупности операций, обеспечивающих протекание требуемых процессов в плавильном агрегате и получение качественных отливок с заданными свойствами. Эта теория базируется на физико-химических основах литейного производства и теории металлургических процессов.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ПЛАВКИ

1.1. Основные понятия и определения

Плавкой называется процесс переработки материалов, главным образом металлов, в плавильных печах с получением конечного продукта в жидком виде.

Плавкой называют также отдельный разовый цикл процесса плавки, или полученный в результате этого продукт (проведена плавка, выпущена плавка и т. п.).

В литейном производстве термином плавка обозначают весь комплекс физических и химических процессов, связанных с приготовлением сплава, имеющего определенный химический состав и температуру и приемлемые литейные свойства, обеспечивающие получение отливки требуемого качества.

Совокупность физических и химических закономерностей, лежащих в основе процессов, обеспечивающих получение жидкого сплава требуемого качества, определяет метод плавки, связанный с применением определенного вида плавильных печей.

Например, использование для плавки чугуна индукционного нагрева лежит в основе метода индукционной плавки. Ее осуществляют в индукционных печах. Способ плавки при этом может состоять в загрузке шихты в пустой тигель или в остаток жидкого металла, соблюдении определенного режима нагрева, последовательности проведения определенных операций и т. д.

Главной особенностью плавки литейных сплавов является то, что требуемые свойства должны быть получены в отливке сразу, без последующего металлургического передела. Например, сталь, выплавляемая на металлургических заводах, разливается в слитки, которые затем подвергаются обработке давлением (третий металлургический передел), а сталь, выплавляемая в литейном производстве, используется непосредственно для получения литой детали с требуемыми свойствами, которые могут быть улучшены термической обработкой, но без металлургического передела.

Плавку литейных сплавов иногда называют вторичной в отличие от первичной плавки, т. е. металлургического процесса получения металлов и сплавов. Для чугуна, например, первичной является доменная плавка, вторичной – плавка в вагранках или электропечах. Исходными материалами для вторичной плавки служат не руды, как в металлургии, а металлы и сплавы, которые являются либо продук-

том первичной плавки, либо вторичными металлами. Чистые металлы применяют для изготовления отливок очень редко, поэтому термином металл часто обозначают литейный сплав (жидкий металл, вторичные металлы и т. п.). Вторичными металлами называют металлический лом, но иногда этим же термином обозначают цветные сплавы в чушках, полученные на специализированных предприятиях «Вторцветмета» путем переплава лома цветных металлов.

В плавильный агрегат загружают твердые материалы, а получают жидкий металл или сплав, а также шлак, являющийся побочным продуктом плавки.

Смесь твердых материалов, загружаемых в плавильный агрегат, называют *шихтой*. Состав шихты, естественно, определяется требуемым составом готового металла или сплава, основой ее являются металлические материалы. Для создания определенных условий формирования сплава в плавильный агрегат загружают также флюсы. *Флюсами* называют материалы, применяемые в металлургических процессах с целью образования шлака или регулирования его состава.

При плавке многих литейных сплавов в виде отдельной фазы присутствует углерод, который является топливом в вагранке, карбюризатором (науглероживателем) в электропечах, а также футеровкой в некоторых видах плавильных агрегатов.

Во всех процессах плавки участвует газовая фаза, которая формируется из подаваемых газов (например, для горения топлива), продуктов сгорания топлива и взаимодействия других фаз, а также окружающей атмосферы, если плавильная печь не герметизирована. В отдельных случаях плавка проводится в вакууме.

Внутреннее пространство плавильных печей, в котором протекает процесс плавки, ограничено огнеупорной футеровкой, способной выдерживать температуры ~1500–1800 °С. Футеровка во время плавки может частично оплавляться, а также вступать в химическое взаимодействие с другими фазами.

При рассмотрении процесса плавки целесообразно применить системный анализ, который представляет собой методологическую основу комплексного подхода при представлении исследуемых объектов как систем и при решении сложных проблем.

При плавке литейных сплавов (рис. 1.1) входом служит шихта (рабочий вход), а также плавильная печь и энергия, являющиеся процессором. Все элементы входа оказывают влияние на протекание самого процесса и на выход.

Процесс, преобразующий вход и выход, состоит из ряда операций (рис. 1.1): загрузки шихты в печь, нагрева, плавления, перегрева и доводки, т. е. доведения расплава до заданной температуры; очистки расплава от вредных примесей, называемой рафинированием; доведения содержания составляющих элементов до требуемого количества; накопления определенной массы готового сплава, необходимой для заливки его в литейную форму, и выпуска расплава в разливочный ковш. На выходе основной продукт – жидкий металл или сплав, побочные – жидкий шлак и отходящий газ.

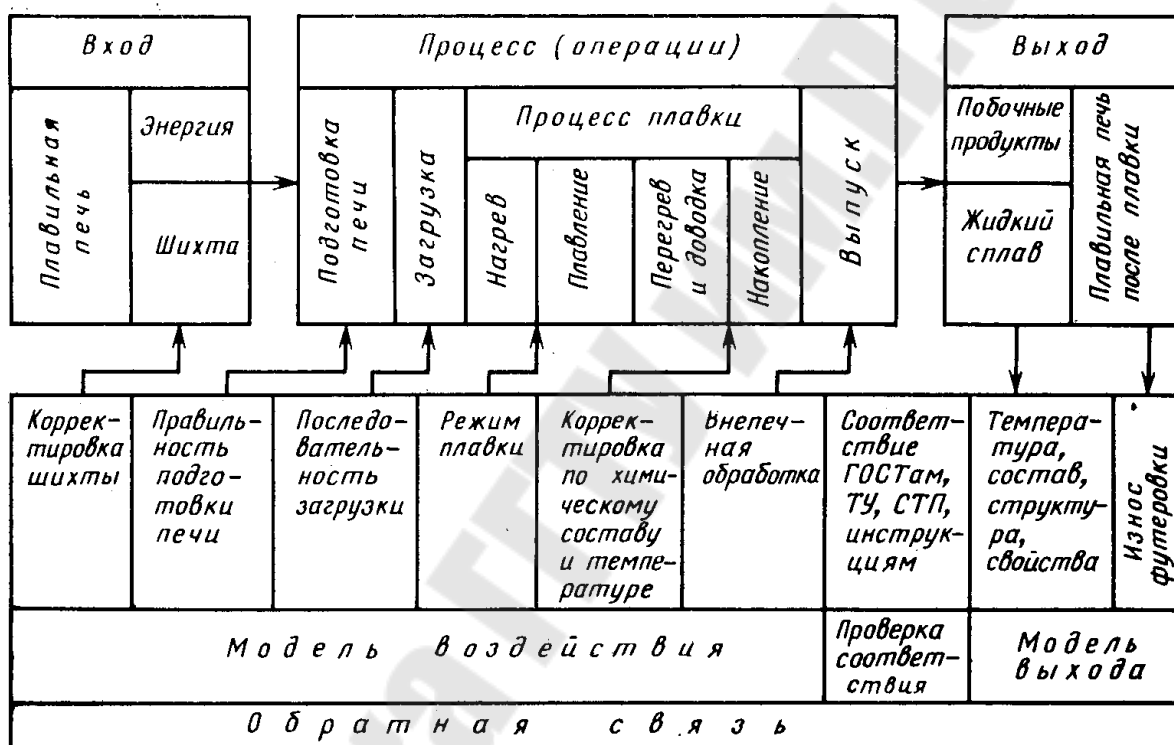


Рис. 1.1. Схема системного анализа плавки литейных сплавов

Моделью выхода являются состав, структура и свойства сплава, обеспечиваемые рассматриваемым процессом; поэтому проверка соответствия производится путем сравнения этих параметров с нормативными критериями, обусловленными ГОСТами, техническими условиями (ТУ), стандартами предприятия (СТП) и инструкциями. Например, чугун СЧ 20 должен иметь $\sigma_B > 196$ МПа и в зависимости от толщины стенок и других условий охлаждения определенный химический состав и т. д.

1.2. Классификация процессов плавки и методы их осуществления

В зависимости от стадийности все существующие процессы подразделяют на монопроцессы и полипроцессы (рис. 1.2). При *монопроцессе* все операции производятся в одном плавильном агрегате, при *полипроцессе* плавка осуществляется последовательно в двух или нескольких плавильных агрегатах. Особую группу составляют *переплавные* процессы, состоящие в переплаве исходного слитка (а не шихты, как обычно) в отливку, которая благодаря определенным условиям при переплаве приобретает более высокое качество. При этом возможен переплав непосредственно в отливку, т. е. формирование отливки в процессе плавки (непрерывный процесс), или переплав с заливкой в форму, в процессе которой продолжается формирование сплава в тех же специальных условиях, например в вакууме.

Полипроцессы подразделяют на дуплекс-процессы и триплекс-процессы. При дуплекс-процессе используют две печи: одну для расплавления и частичного перегрева, другую (печь ожидания или раздаточная печь) для окончательной доводки и выдачи на заливку. При триплекс-процессе, кроме того, применяют печь, являющуюся специальным разливочным устройством.

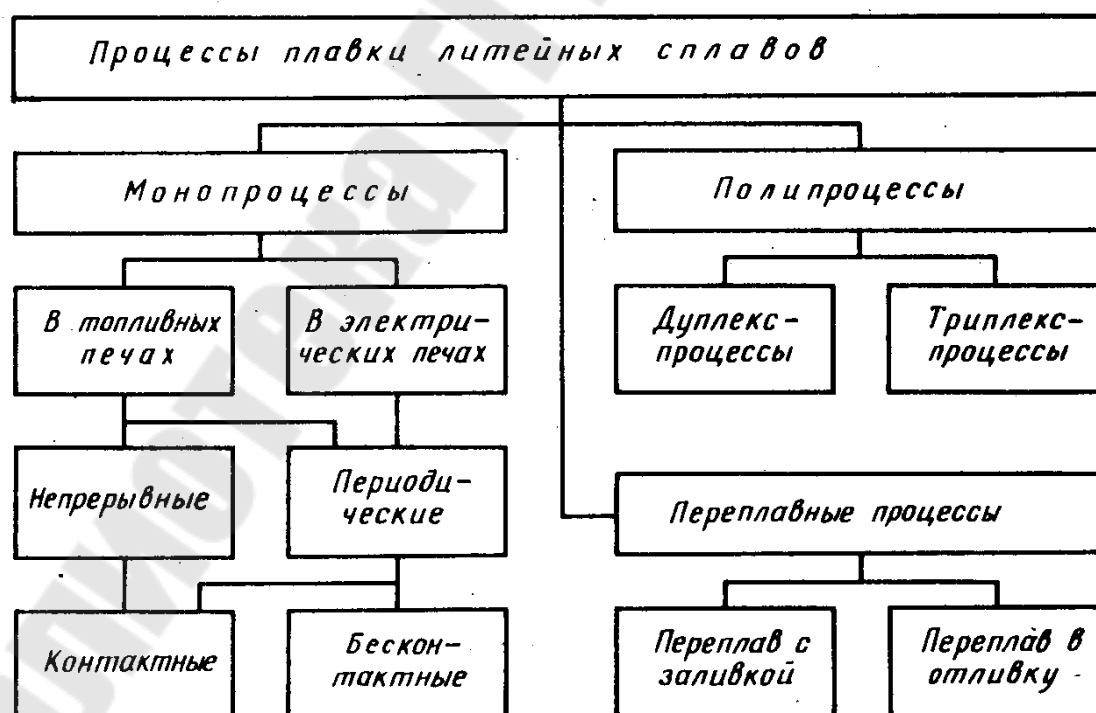


Рис. 1.2. Классификация процессов плавки литейных сплавов

Наибольшее распространение в литейном производстве получили монопроцессы. Физическая сущность плавки сплавов в литейном производстве состоит в превращении исходных материалов из кристаллического состояния в жидкое, происходящем с поглощением теплоты.

По способу генерации теплоты, необходимой для протекания процесса, различают процессы плавки в топливных и в электрических печах.

Процессы могут быть непрерывными, при которых операции загрузки и выпуска (рис. 1.1) происходят одновременно, и периодическими, при которых одновременное проведение этих операций невозможно.

Источник генерации теплоты может находиться в контакте с реагирующими при плавке фазами или быть изолированным от них, в связи с этим различают контактные и бесконтактные методы плавки (рис. 1.2). Характерной особенностью бесконтактных методов плавки является наличие холодных шлаков, которые не нагреваются от источника генерации теплоты. Возможно применение в одном плавильном агрегате двух источников генерации теплоты. Эти методы плавки относятся к комбинированным.

Для осуществления метода плавки необходимо два основных элемента, образующих процесс: рабочее пространство и источник генерации тепловой энергии. При непрерывных процессах используется шахтная форма рабочего пространства Ш (рис. 1.3, а), при периодических контактных способах – ванная форма пространства ВП (рис. 1.3, б), а при бесконтактных – тигельная Т (рис. 1.3, в). При переплавных процессах форма рабочего пространства может быть ванной или тигельной, если в нем производят только плавку с последующей заливкой сплава в форму, и представляет собой литейную форму (обычно водоохлаждаемую), если переплав осуществляется в отливку.

Источниками генерации тепловой энергии могут быть (рис. 1.3): К – сжигание твердого топлива (обычно кокса), Г – сжигание газового или жидкого топлива, Д – дуговой разряд, П – плазменно-дуговой разряд, С – сопротивление спирали (из нихрома и т. п.), И – индуктор вокруг тигля, ИК – индуктор канального типа, СШ – сопротивление слоя шлака, ЭП – электронная пушка.

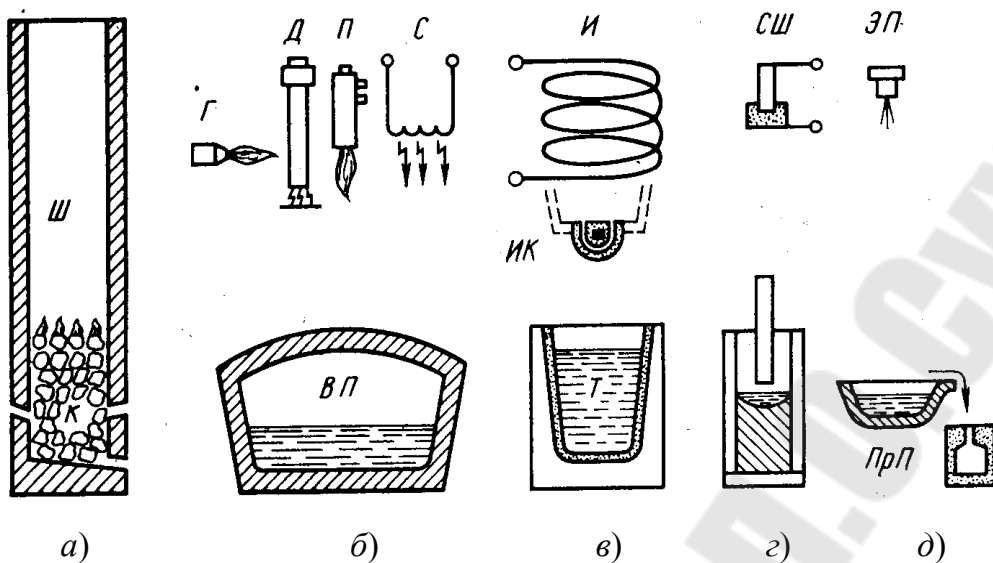


Рис. 1.3. Технологические схемы основных типов рабочего пространства плавильных печей и источников генерации теплоты

Варианты объединения (U) типа рабочего пространства и устройства для генерации теплоты позволяют получить следующие основные плавильные агрегаты:

1) топливные: Ш U К = В – вагранка, Ш U Г = ГВ – газовая вагранка, ВП U Г = Пл – пламенные печи (их далее можно разделить на стационарные ПлС, поворотные ПлП и вращающиеся ПлВ), Т U Г = ТП – тигельная топливная (газовая) печь;

2) электрические: ВП U Д = ДП – дуговая печь (различают дуговые печи с зависимой дугой – ДЗ, когда дуга горит между электродом и металлом, и с независимой дугой – ДН, когда дуга горит между двумя электродами); ВП U П = ПП – плазменная печь; ВП U С = ПСВ – ванная электропечь сопротивления; Т U И = ИТП – индукционная тигельная печь; Т U ИК = ИКП – индукционная канальная печь; Т U С = ПСТ – тигельная электропечь сопротивления. (Символом U условно обозначается здесь и далее объединение рабочего пространства печи и устройства для генерации теплоты.)

При объединении двух источников теплоты с одной формой рабочего пространства или двух форм рабочего пространства получим комбинированные плавильные печи. Например, Т U И U П = ИПП – индукционно-плазменная печь, Ш U ВП U Г = ШП – шахтно-пламенная печь и т. д.

Объединение различных типов печей реализуется в виде полипроцессов (рис. 1.4). Особое место занимают дуплекс-процессы получения стали в конвертере (К на рис. 1.4). Выплавленный в вагранке

чугун заливают в конвертер, где его продувают воздухом или кислородом, в результате чего получают сталь. Это единственный бестопливный агрегат.

Комбинирование устройств для генерации теплоты с переплавными формами рабочего пространства (ПрП на рис. 1.3, з, д) реализуется в виде переплавных процессов: $\text{ПрП} \cup \text{СШ} = \text{ЭШП}$ – электрошлаковый переплав, $\text{ПрП} \cup \text{П} = \text{ПДП}$ – плазменно-дуговой переплав. В литейном производстве применяется лишь электрошлаковое литье – ЭШЛ, т. е. ЭШП в форму (водоохлаждаемый кристаллизатор). Другие виды переплавов предполагают наличие вакуума (В): $\text{ПрП} \cup \text{Д} \cup \text{В} = \text{ВДП}$ – вакуумно-дуговой переплав, $\text{ПрП} \cup \text{ЭП} \cup \text{В} = \text{ЭЛП}$ – электронно-лучевой переплав. К переплавным процессам можно отнести также индукционную плавку в вакууме ($\text{ИП} \cup \text{В} = \text{ИВП}$).

В соответствии с приведенной классификацией процессов, для каждой группы сплавов существует ряд методов плавки. Например, для плавки чугуна применяют методы ваграночной, индукционной, дуговой плавки; различные методы плавки дуплекс-процессами; методы плавки с применением комбинированных источников генерации теплоты (например, метод индукционно-плазменной плавки).

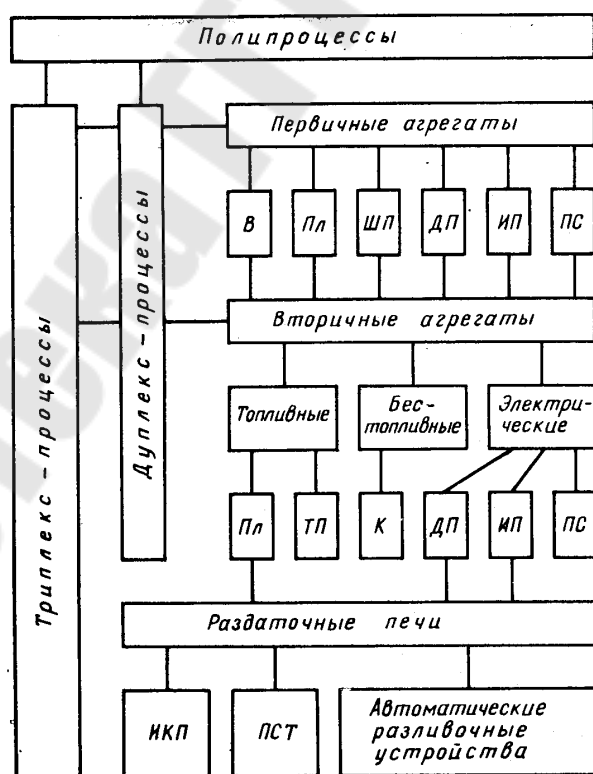


Рис. 1.4. Классификация полипроцессов плавки литейных сплавов

1.3. Параметры процесса плавки

Интенсивными параметрами процесса плавки являются температура и давление. Они зависят от вида сплава и типа плавильного агрегата. Для плавки одного и того же сплава могут использоваться различные плавильные агрегаты, при этом некоторые параметры будут различны. В большинстве случаев давление газовой фазы при плавке равно атмосферному или несколько превышает его. Температуры газовой фазы, жидкого сплава, шлака играют очень важную роль в процессе плавки и определяются требуемой температурой жидкого сплава: для чугуна – 1400–1450 °С, для стали – 1500–1650 °С, для медных сплавов – 1000–1250 °С, для алюминиевых – 700–750 °С, для магниевых – 650–700 °С, для цинковых – 420–480 °С, для никелевых – 1400–1650 °С и для титановых – 1650–1800 °С. Температуры газовой фазы и шлака зависят от типа печи. В топливных печах они выше, чем температура сплава, в электропечах – могут быть как выше, так и ниже: в дуговых печах шлаки имеют более высокую температуру, чем в индукционных.

Основными технологическими параметрами процесса плавки являются удельная вводимая мощность и удельная производительность. Например, для вагранки это соответственно расход кокса по отношению к металлозавалке и производительность на 1 м² площади сечения вагранки; для электропечи – удельная электрическая мощность на 1 т номинальной массы садки печи и производительность в тоннах в час по отношению к массе садки. Параметры процесса плавки оказывают влияние на взаимодействие фаз друг с другом, в результате которого формируется сплав определенного состава.

2. ПРОМЫШЛЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Металлы, используемые в промышленности, принято делить на черные и цветные.

Черные металлы – промышленное название железа и его сплавов. *Цветные металлы* – промышленное название всех без исключения металлов и их сплавов, кроме железа и его сплавов.

Промышленная классификация металлов в отличие от химической сложилась исторически и не имеет строгой научной основы.

Из большой группы металлов, называемых цветными, принято выделять тяжелые и легкие. К тяжелым, например, относят медь, никель, олово, цинк. К легким – алюминий, магний, кальций, калий, натрий.

Это деление также условно и является следствием деления цветных металлов на две группы по способу получения, из которых одна (тяжелая) получается, главным образом, в результате металлургических процессов, а вторая (легкие) – путем электролиза расплавленных солей.

Обособленные группы в числе цветных металлов занимают так называемые благородные и редкоземельные металлы.

В промышленности также различают первичные и вторичные металлы. Первичными называют те, которые получены из руд, а вторичными – полученные в результате переплава и переработки первичных металлов, также лома и отходов.

3. ПЛАВКА В ВАГРАНКАХ

3.1. Общая характеристика процесса плавки в вагранке

Для анализа любого металлургического процесса необходимо изучить все фазы, участвующие в процессе, температурные условия их существования, характер, состав, структуру и границы раздела, т. е. изучить условия процесса и проанализировать его с термодинамической и кинематической сторон.

В вагранке находятся две самостоятельные группы материалов, движущихся навстречу друг другу. Первая группа – шихтовые составляющие, опускающиеся сверху вниз и нагревающиеся противотоком за счет теплоты второй группы – поднимающихся снизу вверх ваграночных газов, которые при этом охлаждаются.

Материалы первой группы (металл, топливо, флюсы) находятся вначале в твердом состоянии в виде самостоятельных твердых фаз. Затем металл переходит в жидкое состояние, образуя самостоятельную жидкую фазу – чугун. Топливо, сгорая, переходит в газообразное состояние; флюсы еще в твердом виде диссоциируют, образуя газообразный продукт диссоциации CO_2 , а окисел кальция шлакуется и вместе с окислами из футеровки, пригара песка и угара металла переходит в жидкое состояние, образуя самостоятельную жидкую фазу – шлак.

Газовая фаза начинает свой путь (при работе с закрытым копильником или без копильника) снизу вверх от уровня фурм в виде воздуха с обычной или повышенной концентрацией кислорода, вступает в холостой колоше вагранки во взаимодействие с топливом, в результате чего преобразуется в газообразные продукты горения –

ваграночные газы, нагретые до той или иной температуры в зависимости от условий горения. Ваграночные газы, движущиеся вверх в шахте вагранки, отдают свою теплоту материалам первой группы и нагревают их от температуры загрузки до температуры плавления, снабжая эти материалы необходимой теплотой для расплавления (в зоне плавления). Теплота главным образом твердого горящего топлива перегревает расплавившиеся материалы выше их температуры плавления (в холостой колоше вагранки).

Между газовой фазой, движущейся снизу вверх, и материалами, движущимися сверху вниз, помимо процессов теплопередачи осуществляются многочисленные химические процессы. Характер последних (скорость и направление) зависит от температуры и состава газовой фазы, а также от температуры и состава металла и шлака. Таким образом, здесь будут иметь место различные гетерогенные процессы между твердыми и жидкими материалами, с одной стороны, и газами, с другой.

В результате взаимодействия жидкого чугуна и шлака с твердым топливом имеют место гетерогенные процессы между жидкими и твердыми веществами. В результате этого в вагранке осуществляются гетерогенные процессы различных типов между твердыми, жидкими и газообразными веществами.

Кроме того, будут происходить гомогенные процессы в газовой фазе (например, диссоциация водяных паров) и в жидкой фазе (процессы в металле и шлаке).

Таким образом, для характеристики ваграночного процесса необходимо рассмотреть процессы, протекающие между всеми тремя фазами. Прежде всего, большой самостоятельной группой процессов являются процессы горения, происходящие между воздухом и топливом в холостой колоше вагранки. Именно в результате горения топлива создается вся газовая фаза в вагранке. От условий горения топлива зависят химический состав газовой фазы и ее температура. Все остальные химические процессы зависят от состава и температуры этой фазы. От температуры этой фазы зависят и все процессы теплопередачи, определяющие температуру чугуна, выпускаемого из вагранки.

3.2. Схема ваграночного процесса

Общая схема ваграночного процесса при работе с закрытым копильником или без копильника представлена на рис. 3.1.

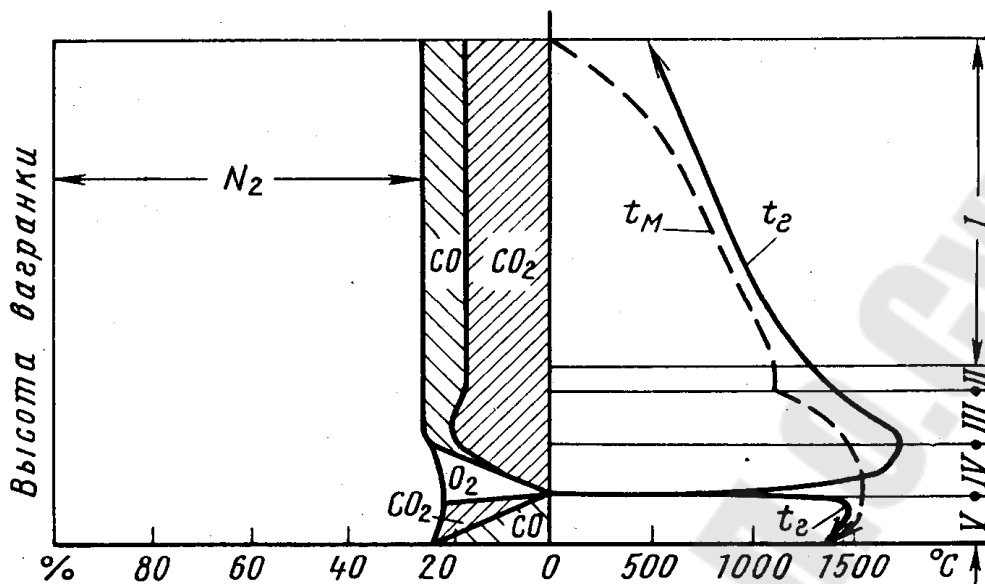


Рис. 3.1. Общая схема ваграночного процесса (при работе с закрытым копильником)

На левой половине диаграммы показано изменение состава газовой фазы, на правой – изменение температуры нагревающегося металла t_M и охлаждающихся газов t_G .

Как видно из схемы, высоту вагранки можно разделить на пять зон: I – шахта вагранки; II – зона плавления; III – редуционная зона холостой колоши; IV – кислородная зона холостой колоши и V – горн вагранки. Изменение состава газовой фазы показано на основании приведенного анализа горения топлива в вагранке.

При питании вагранки холодным воздухом с обычным содержанием кислорода газовая фаза на уровне фурм (граница между зонами IV и V) содержит кислорода 21 % и азота 79 %, среднегодовая температура ее будет примерно равна нулю.

Двигаясь вверх по кислородной зоне IV холостой колоши, газовая фаза теряет кислород, в конце этой зоны его содержание снизится практически до нуля. Вместо кислорода в газовой фазе появится сначала CO₂, а в конце зоны немного CO. Температура газовой фазы в конце зоны достигнет максимума, зависящего от соотношения количества газов CO и CO₂.

Проходя вверх редуционную зону III, газ немного охлаждается вследствие протекания эндотермической реакции между CO₂ и углеродом кокса ($CO_2 + C = 2CO + \Delta H$). При этом, чем выше реакционная способность ваграночного топлива, чем меньше размер его кусков, чем больше относительный расход топлива и чем меньше питание ва-

гранки воздухом, тем большая доля CO_2 превратится в CO , и тем сильнее понизится температура газов за время прохождения зоны III. Однако, несмотря на снижение температуры газов в конце этой зоны, их температура все же превышает температуру плавления чугуна.

В зоне II газы омывают плавящийся металл, передавая ему необходимую для плавления теплоту. Температура газов продолжает снижаться.

В зоне I газы движутся навстречу твердым шихтовым материалам, нагревая их. Состав газов в этой зоне при применении качественного малореакционного топлива почти не изменяется, так как реакция $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ при температурах этой зоны малоэффективна. Эта реакция начинается при 725–750 °С, но лишь при температуре выше 1000 °С развивается достаточно интенсивно.

Когда в вагранках применяли древесный уголь, эта реакция энергично развивалась и в зоне I, что отрицательно влияло на весь ход ваграночного процесса. При применении качественного кокса эта реакция в зоне I развивается очень слабо. Состав газов в этой зоне незначительно изменяется за счет выделения углекислого газа при диссоциации известняка. Температура газов в конце зоны I снижается до 600–400 °С.

В зоне IV вагранки сера кокса сгорает в основном в SO_2 . Приблизительное содержание SO_2 в ваграночных газах можно рассчитать по содержанию серы в коксе: 1 % серы в коксе дает 0,1 % SO_2 в ваграночных газах.

В зоне V, расположенной ниже фурм (горн вагранки), при работе с закрытым копильником или без него состав газов различен на разной высоте этой зоны. Немного ниже фурм, куда поступает вдуваемый воздух, в газовой фазе кроме азота находится кислород и CO_2 . Чем ниже рассматриваемое сечение вагранки от уровня фурм, тем меньше в него проникает свежего воздуха и меньше содержание кислорода. В связи с этим CO_2 начнет восстанавливаться до CO . У самой подины вагранки (если вагранка с закрытым копильником или без него, но из горна выпущены металл и шлак) кислород отсутствует, количество CO_2 незначительно и кроме азота в основном содержится CO . Никакого движения газов нет. Температурные кривые газовой фазы в этой зоне характеризуются сначала некоторым подъемом на небольшом расстоянии ниже фурм, а затем снижением, как и в зоне III, вследствие эндотермической реакции восстановления CO_2 .

3.3. Образование ваграночного шлака и его влияние на свойства чугуна и стойкость футеровки

3.3.1. Образование ваграночного шлака

Как и во всяком металлургическом процессе, состав и свойства ваграночного шлака оказывают большое влияние на характер плавки и свойства получаемого металла.

Количество и состав ваграночного шлака зависят от режима плавки, качества исходных шихтовых материалов и флюсов, от конструкции вагранок.

Источниками образования шлака в процессе плавки в вагранке являются:

- угар элементов: приблизительно 10–35 % Si, 15–50 % Mn, и 0,25–1,5 % Fe. При этом образуется 1–2 % шлака от веса металла;
- оплавление футеровки: 0,4–4,0 % веса металла (обычно считают 1–2 %);
- песок, приставший к чушкам штыкового чугуна (при немеханизированной разливке), в количестве 0,3–2 %, а также окислы, покрывающие поверхность лома, стружки и штыкового чугуна (0,25–0,75 %). При применении в шихте неочищенных литников и бракованных отливок пригоревшая к ним песчаная смесь образует дополнительное количество шлака – до 2 % веса металла;
- зола топлива, переходящая в шлак в количестве 1–2 % веса металла (в коксовых и коксогазовых вагранках);
- флюсы, добавляемые для понижения вязкости шлака, в количестве 3–4 % веса металла.

Следовательно, всего образуется 6–8 % шлака от веса металла.

Приведенные данные можно использовать с учетом особенностей каждой конкретной плавки. При этом расчетный состав конечного шлака, полученный с учетом принятых исходных данных, довольно точно совпадает с фактическим его составом. Конечный ваграночный шлак состоит главным образом из кремнезема SiO_2 , извести CaO , глинозема Al_2O_3 , магнезии MgO , закиси железа FeO , закиси марганца MnO , щелочей K_2O и Na_2O и некоторых других составляющих (сернистых и фосфористых соединений).

Кремнезем SiO_2 , являющийся главной составной частью кислого ваграночного шлака (40–55 % его веса), образуется из золы кокса, песка, огнеупорной футеровки и выгорающей части кремния шихты.

Источником получения второй основной части шлака – окиси кальция CaO , составляющей 20–30 % веса кислого шлака, является

известняк. Единственная практическая возможность влиять на конечный состав шлака во время плавки – добавить то или иное количество флюсов. Глинозем Al_2O_3 поступает в шлак в количестве 5–15 % (так же как и 0,5–5 % магнезии) главным образом из золы топлива, флюса и оплавленной футеровки.

Таким образом, три химические составляющие (кремнезем, окись кальция и глинозем) образуют в сумме 80–90 % всей массы шлака.

Окислы железа и марганца поступают в шлак в результате выгорания этих элементов в процессе плавки металла, а также из окислов, находящихся на поверхности стружки, лома и чушкового чугуна. Они находятся в шлаке в следующем количестве: 2–10 % MnO , 3–15 % FeO . Конечное содержание FeO в шлаке характеризует не только величину угара железа, но и таких элементов, как марганец и кремний.

О работе вагранки можно судить по составу и свойствам шлаков. Изменяя состав шлаков, можно регулировать ход ваграночной плавки. Например, при получении холодного чугуна, когда образуются черные сильно железистые шлаки, увеличивают коксовую колошу. Качественные шлаки должны иметь оливково-зеленую окраску. При хорошо поставленном контроле за составом шлака можно вовремя заметить появление железистых шлаков и принять меры к исправлению хода плавки в вагранке.

Щелочи K_2O и Na_2O поступают в шлак в небольшом количестве (0,2–0,5 %) главным образом из золы топлива.

Ваграночные шлаки содержат также некоторое количество механически запутавшихся более или менее крупных корольков чугуна и его микроскопических включений. Это легко проверить при растирании шлака в порошок и извлечении из него магнитом железа. Потери в шлаке чугуна составляют 0,2–0,3 %. Эти потери тем больше, чем больше вязкость шлаков.

Даже присутствие сравнительно небольшого количества окислов железа и марганца в ваграночном шлаке сильно сказывается на его внешнем виде, придавая ему темный, почти черный цвет. Кислый характер шлака из-за наличия в нем кремнезема является причиной его стекловидного состояния.

3.3.2. Физические свойства ваграночного шлака

Шлак должен обладать хорошей жидкотекучестью (малой вязкостью). Высокая жидкотекучесть шлака обеспечивает легкое его отделение от чугуна, стекание по стенкам шахты и горна без образова-

ния настывлей, поглощение некоторого количества сернистых соединений и быстрое вытекание через шлаковую летку. Чтобы удовлетворить всем перечисленным требованиям, шлак должен иметь такой химический состав, при котором он обладал бы высокой жидкотекучестью. При этом, чем меньше число вязкости шлака, тем он более жидкотекуч. Вязкость шлака уменьшается с ростом температуры.

Отметим, что вязкость не связана с температурой затвердевания шлака. Часто бывает, что шлаки с низкой температурой затвердевания отличаются большой вязкостью. Поэтому, чтобы отделить такие шлаки от металла, их нужно сильно перегреть.

Получение в вагранке шлака с очень низкой температурой плавления может привести к тому, что шлак, расплавившись при такой температуре, не успеет достаточно перегреться, а попав в горн вагранки, снизит его температуру, что приведет к получению холодного чугуна.

Шлаки вязкостью менее $0,9 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ относятся к очень жидкотекучим, шлаки вязкостью $0,9\text{--}1,1 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ – к жидкотекучим, шлаки вязкостью $1,5\text{--}1,8 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ – к недостаточно жидкотекучим и, наконец, вязкостью более $1,8 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ – к практически не текучим.

На жидкотекучесть шлака наибольшее влияние оказывают его химический состав и температура. Замена в составе шлаков 15–25 % окиси кальция окисью магния заметно снижает вязкость шлаков.

Для получения шлаков с наибольшей жидкотекучестью рекомендуется подбирать такой их состав, чтобы отношения $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} = 6\text{--}8$

и $\frac{\text{CaO}}{\text{MgO}} = 2$.

Большой жидкотекучестью обладают шлаки, содержащие 40–50 % SiO_2 , 4,5–6,5 % Al_2O_3 , 20–27 % CaO , 12–15 % MgO , 3–5 % MnO и 6–8 % FeO .

Обычные ваграночные шлаки состоят из большого количества компонентов. Поэтому, принимая сумму SiO_2 , CaO и Al_2O_3 за 100 %, определяют вязкость шлаков. Влияние остальных компонентов на вязкость определяют с той или иной степенью приближения.

3.3.3. Влияние состава ваграночного шлака на качество чугуна и стойкость футеровки

Более высокие механические свойства чугуна получают при применении в качестве флюсов мартеновского шлака с доломитом и известняка с доломитом; при этом чугун содержит сравнительно мелкий графит.

Более низкие механические свойства у чугуна, при выплавке которого в качестве флюса используют известняк и марганцевую руду без добавок доломита. Графитовые включения в чугуне становятся грубыми. С увеличением в шлаках содержания MgO до определенного максимума заметно повышается предел прочности чугуна на изгиб.

Механические свойства чугуна, выплавленного с использованием в качестве флюса мартеновского шлака, немного снижаются. При этом структура чугуна характеризуется достаточно грубым графитом.

Наиболее грубое строение графита и наиболее низкие механические свойства у чугунов, при выплавке которых в качестве флюса используют известняк. Установлено, что чугун с наиболее грубыми графитовыми включениями и наиболее низкими механическими свойствами получают при применении шлака с наименьшей текучестью.

Изучение влияния ваграночных шлаков различного химического состава на качество металла позволило сделать следующие выводы. При увеличении содержания в шлаках кремнезема SiO_2 за счет уменьшения концентрации CaO снижается угар кремния и увеличивается угар марганца. При этом появляется склонность чугуна к графитизации. Графит выделяется в виде сравнительно коротких, слегка завихренных пластинок в перлитно-ферритной основе.

С ростом процента содержания SiO_2 в шлаке увеличивается количество феррита в чугуне. При этом механические свойства чугуна незначительно снижаются. При замещении SiO_2 известью наблюдается обратная картина: угар Si увеличивается, а угар Mn уменьшается. Графит выделяется в виде грубых прямых пластин в перлитно-ферритной основе.

Добавка Al_2O_3 в шлак немного увеличивает угар Si и уменьшает угар Mn . При повышении содержания Al_2O_3 в шлаке графит выделяется в виде грубых, коротких пластин; при этом в основной металлической массе увеличивается количество феррита. Перлит измельчается, становится сорбитообразным. Механические свойства чугуна немного снижаются.

Наличие окислов железа в шлаке увеличивает угар составных частей чугуна, структура последнего становится грубее, в нем появляются поры и раковины. Механические свойства чугуна ухудшаются. Наличие MgO в шлаке увеличивает угар Si и уменьшает угар Mn . При этом в чугуне уменьшается количество крупного графита, количество и структура перлита не изменяются. Прочностная характеристика чугуна немного повышается.

При искусственном увеличении в шлаках содержания MnO увеличивается угар Si и снижается угар Mn (наблюдается даже пригар Mn). Выделение графита уменьшается, в основной металлической массе исчезает феррит, образуется мелкий сорбитообразный перлит. Возрастают механические свойства чугуна. При обработке чугуна марганцовистыми шлаками достигается наибольшая его прочность.

Наиболее сильно разрушаются шамотные огнеупоры под влиянием повышенного содержания окислов марганца и железа в шлаках. Слабее воздействие увеличенного содержания MgO , CaO и Al_2O_3 . Двоокись кремния препятствует разъеданию шамота шлаками.

Добавки Fe_2O_3 в шлак по-разному влияют на растворение SiO_2 и Al_2O_3 шамота. С увеличением содержания Fe_2O_3 повышается растворимость SiO_2 , в то время как растворимость Al_2O_3 не увеличивается, а даже немного снижается.

Чтобы повысить стойкость футеровки, надо использовать шлаки, которые слабо растворяют главные ее составляющие. Во всех случаях нежелательно увеличивать концентрацию окислов марганца и железа в шлаках.

Другой способ повышения стойкости футеровки – снижение пористости огнеупоров.

4. ПЛАВКА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

4.1. Классификация и назначение индукционных плавильных печей

Индукционной плавильной установкой называют индукционную установку, в которой нагреваемый металл или сплав доводится до плавления, т. е. меняет свое агрегатное состояние в процессе нагрева.

На рис. 4.1 представлено назначение индукционных печей. На рис. 4.2 – классификация плавильных индукционных печей.

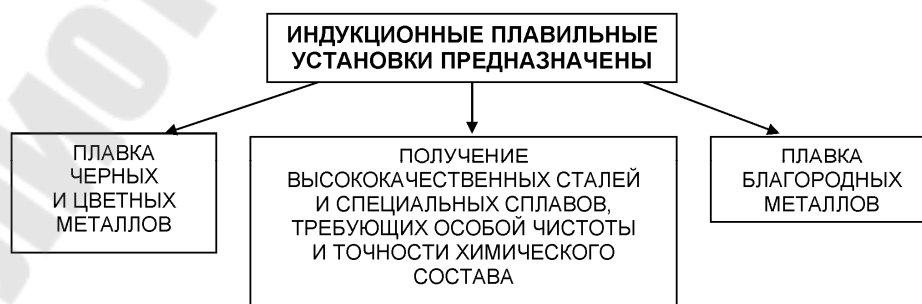


Рис. 4.1. Назначение индукционных печей

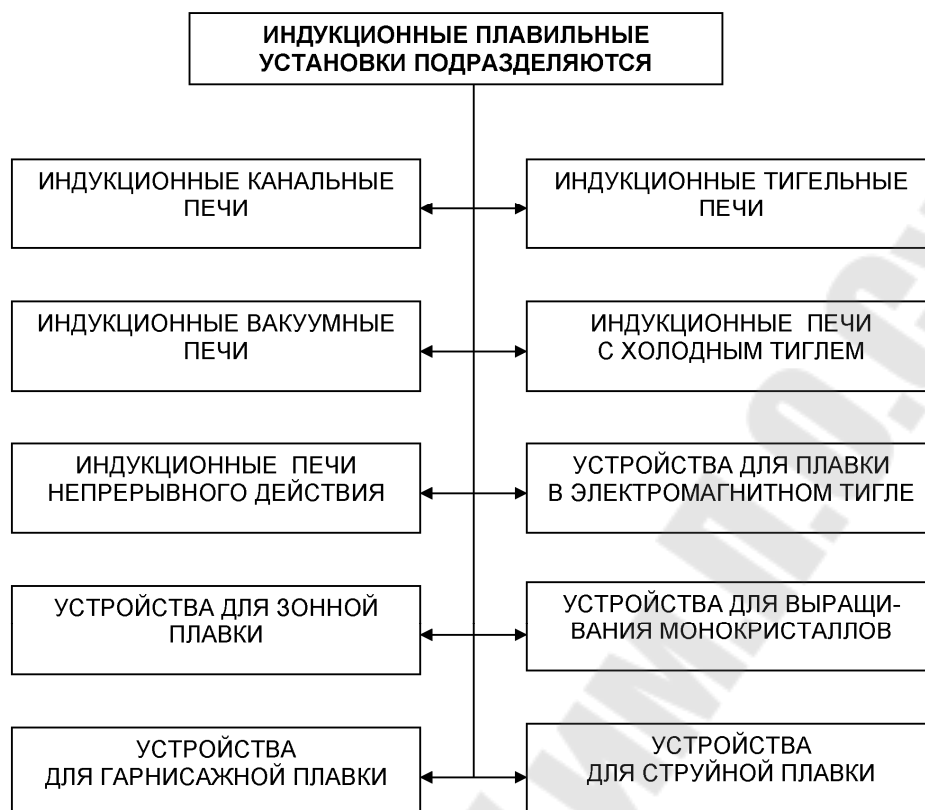


Рис. 4.2. Классификация плавильных индукционных печей

4.2. История развития индукционных тигельных печей

В 1831 г. английским ученым Майклом Фарадеем был открыт закон электромагнитной индукции, Ленц и Джоуль установили, что прохождение тока по проводнику сопровождается выделением тепла; Леон Фуко подробно исследует частный случай этого явления, а именно, наведение тока в сплошных металлических средах. В середине XIX в. англичанин Джеймс Максвелл получил основополагающие уравнения электромагнитного поля, носящие его имя, и построил систему современной электродинамики. В 80-х годах У. Томсон открыл и исследовал поверхностный эффект, заключающийся в том, что переменный ток вытесняется к поверхности проводника.

Промышленное использование электрической энергии для плавки и нагрева металлов и сплавов началось лишь спустя много лет, так как для этого необходимо было соответствующее развитие электротехники, а также энергетического хозяйства.

Выдающуюся роль в развитии этих областей науки сыграли русские ученые и практики: П. Н. Яблочков (1876), И. Ф. Усагин (1882)

и М. О. Доливо-Добровольский исследованиями в области трансформаторов, а также работы М. О. Доливо-Добровольского, впервые осуществившего передачу электроэнергии на расстояние.

Первые попытки плавки металлов в индукционных тигельных печах токами высокой частоты относятся к началу XX в.

Русский изобретатель А. Н. Лодыгин за период 1905–1907 гг. предложил ряд конструкций индукционных нагревателей и в 1908 г. опубликовал в журнале «Электричество» статью о принципе работы и конструкции индукционной печи без сердечника.

Первые опыты по плавке токами высокой частоты следует отнести к 1912–1913 гг., когда акционерное общество «Лоренц» построило печь без сердечника с питанием от дугового генератора, создающего высокочастотные колебания; сам же колебательный контур представлял собой систему индукционных катушек и конденсаторов. Плавку осуществляли в тигле, помещенном внутри печной катушки, которая была связана с колебательным контуром. В печи плавил цинк, который загружали в количестве всего лишь 20 г. Плавка продолжалась ~2 мин.

Опыты были прекращены во время Первой мировой войны, и лишь спустя два года, т. е. в 1916 г., американец Нортруп предложил свою схему, в которой для получения токов высокой частоты был применен искровой разрядник. В период Первой мировой войны индукционный нагрев получил практическое применение в электровакуумной промышленности для прогрева деталей радиоламп во время откачки. После окончания Первой мировой войны печи без сердечника стали внедрять в промышленность все шире.

4.3. Индукционные тигельные печи

4.3.1. Назначение индукционных тигельных печей

Индукционные тигельные печи (ИТП) широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов как на воздухе, так и в вакууме и в защитных атмосферах. В настоящее время используются такие печи емкостью от десятков грамм до десятков тонн. Тигельные индукционные печи применяют главным образом для плавки высококачественных сталей и других специальных сплавов, требующих особой чистоты, однородности и точности химического состава, что недостижимо при плавке в пламенных и дуговых печах.

В качестве примера на рис. 4.3 приведена схема индукционной тигельной печи.

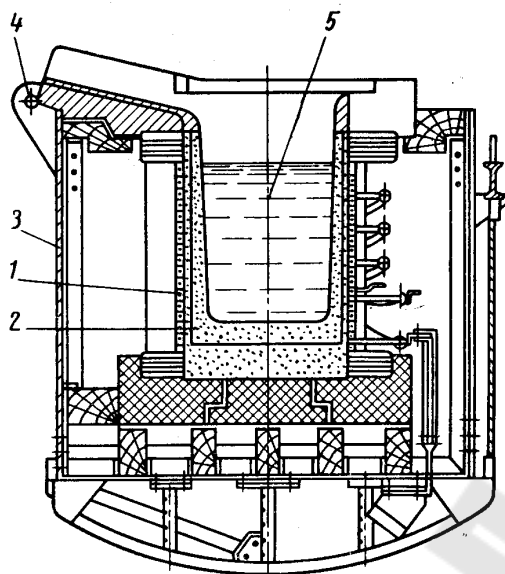


Рис. 4.3. Схема индукционной тигельной печи:
 1 – индукто; 2 – тигель; 3 – каркас; 4 – поворотная ось;
 5 – плавящийся металл

Плавка обычных сортов стали в печах без сердечника менее экономична, чем в дуговых, так же как и обычных цветных металлов и сплавов, по сравнению с индукционными канальными печами. Однако в настоящее время тигельные индукционные печи повышенной и промышленной частоты широко применяют за рубежом и в России для плавки обычных тяжелых и легких цветных металлов и их сплавов в производствах с периодическим режимом работы и широким ассортиментом выплавляемых сплавов, а также для плавки сильно загрязненной шихты с большим содержанием стружки или сплавов, требующих модифицирования, поскольку в канальных печах наличие каналов затрудняет перевод печей с плавки одного сплава на другой, и в то же время флюсы и модифицирующие соли, а также грязная мелкая шихта способствуют зарастанию каналов.

Таким образом, тигельные индукционные печи, хотя и отличаются более низкими КПД и $\cos\phi$, а также представляют собой более дорогое и сложное электротехническое устройство по сравнению с индукционными канальными печами, все же в указанных случаях более приемлемы и удобны в эксплуатации. Следует отметить попытку совмещения некоторых достоинств и преимуществ индукционных канальных печей (высокий электрический КПД) и индукционных тигельных печей (относительная простота ее футеровки) в промежуточном конструктивном решении между этими типами печей – создание индукционной тигельной печи с кольцевой камерой.

При таком решении могут частично проявиться преимущества обоих основных типов печей. Из-за наличия канала, открытого сверху, который к тому же еще и много шире, чем в канальной печи, металл в печи можно замораживать и вновь запускать печь, используя кольцо замерзшего металла или заливая жидкий металл.

Интенсивное движение расплава, имеющее место в печи с кольцевой камерой, ограничивает мощность печи. Поэтому такая печь используется преимущественно для поддержания металла в расплавленном состоянии. При этом она имеет то преимущество, что на наружной поверхности кожуха могут устанавливаться любые элементы конструкции для загрузки или отбора жидкого материала. Для работы печи металл канала постоянно должен образовывать замкнутое кольцо так же, как в индукционной канальной печи. При наклоне нагрев прекращается в том случае, если кольцо разрывается вследствие очень большого угла наклона. Индукционные тигельные печи как плавильные устройства обладают большими достоинствами, важнейшие из которых – возможность получения весьма чистых металлов и сплавов точно заданного состава, стабильность свойств получаемого металла, малый угар металла и легирующих элементов, высокая производительность, возможность полной автоматизации, хорошие условия труда обслуживающего персонала, малая степень загрязнения окружающей среды.

Достоинства тигельных плавильных печей:

- выделение энергии непосредственно в загрузке, без промежуточных нагревательных элементов;
- интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в тигле, обеспечивающая быстрое плавление мелкой шихты и отходов, быстрое выравнивание температуры по объему ванны и отсутствие местных перегревов и гарантирующая получение многокомпонентных сплавов, однородных по химическому составу;
- принципиальная возможность создания в печи любой атмосферы (окислительной, восстановительной, нейтральной) при любом давлении (вакуумные или компрессионные печи);
- высокая производительность, достигаемая благодаря высоким значениям удельной мощности (особенно на средних частотах);
- возможность полного слива металла из тигля и относительно малая масса футеровки печи, что создает условия для снижения тепловой инерции печи благодаря уменьшению тепла, аккумулированного футеровкой. Печи этого типа весьма удобны для периодической

работы с перерывами между плавками и обеспечивают возможность для быстрого перехода с одной марки сплава на другую;

- простота и удобство обслуживания печи, управления и регулирования процесса плавки, широкие возможности для механизации и автоматизации процесса;

- высокая гигиеничность процесса плавки и малое загрязнение воздушного бассейна.

Необходимо отметить следующие недостатки тигельных печей:

- относительно низкая температура шлаков, наводимых на зеркало расплава с целью его технологической обработки. Относительно холодные шлаки затрудняют протекание реакций между металлом и шлаком и, следовательно, затрудняют процессы рафинирования. Шлак в ИТП, индифферентный к электрическому току, нагревается только от расплавляемого металла, поэтому его температура всегда ниже;

- сравнительно низкая стойкость футеровки при высоких рабочих температурах расплава и при наличии теплосмен (резких колебаний температуры футеровки при полном сливе металла);

- высокая стоимость электрооборудования, особенно при частотах выше 50 Гц;

- более низкий КПД всей установки вследствие необходимости иметь в ней источник получения высокой или повышенной частоты, а также конденсаторов, а также при плавке материалов с малым удельным сопротивлением.

Сочетанием таких качеств (высокая стоимость электрооборудования и низкий КПД) определяется область применения индукционных тигельных печей: плавка легированных сталей и синтетического чугуна, цветных тяжелых и легких сплавов, редких и благородных металлов. Поскольку область применения этих печей ограничивается не техническими, а экономическими факторами, то по мере увеличения производства электроэнергии она непрерывно расширяется, захватывая все более дешевые металлы и сплавы.

К сказанному необходимо добавить, что тигельные индукционные печи широко применяют для плавки и выдержки чугуна.

Основной тенденцией в развитии индукционных тигельных печей является рост как единичной емкости, так и суммарной емкости количества печей, связанный прежде всего с потребностью в больших количествах высококачественного металла. Кроме того, при увеличении емкости повышается КПД печи и снижаются удельные расходы на ее изготовление и эксплуатацию.

По сравнению с топливными печами производительность тигельных индукционных печей выше; кроме того, плавка в тигельных индукционных печах дает металл более высокого качества и потери выплавляемых сплавов меньше.

Тигельные печи все чаще стали использовать в комплексе с другими плавильными агрегатами (вагранками, дуговыми печами). В этих случаях металл, предварительно расплавленный в указанных печах, поступает в индукционную электропечь для рафинирования и доведения до заданного химического состава.

4.3.2. Принцип действия индукционной тигельной печи

В основе работы тигельной печи лежит трансформаторный принцип передачи энергии индукцией от первичной цепи ко вторичной. Подводимая к первичной цепи электрическая энергия переменного тока превращается в электромагнитную, которая во вторичной цепи переходит снова в электрическую, а затем в тепловую.

Индукционные тигельные печи также называют индукционными печами без сердечника. Печь представляет собой плавильный тигель, как правило, цилиндрической формы, выполненный из огнеупорного материала и помещенный в полость индуктора, подключенного к источнику переменного тока (рис. 4.4). Металлическая шихта (материал, подлежащий плавлению) загружается в тигель и, поглощая электрическую энергию, плавится. В тигельной печи (рис. 4.4) первичной обмоткой служит индуктор, обтекаемый переменным током, а вторичной обмоткой и одновременно нагрузкой – сам расплавляемый металл, загруженный в тигель и помещенный внутрь индуктора.

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

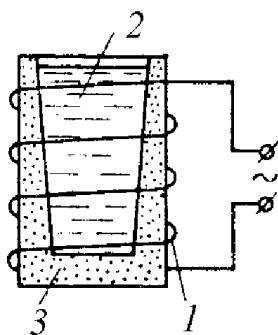


Рис. 4.4. Индукционная плавка металлов в тигельной печи:
1 – индуктор; 2 – расплав; 3 – огнеупорный тигель

4.4. Физико-химические особенности процесса

Характер физико-химических процессов индукционной плавки стали обуславливается прежде всего особенностями теплоподвода. При индукционном нагреве различают следующие разновидности нагрева: H , при котором энергия в нагреваемое тело передается магнитной составляющей (вектором H) быстропеременного магнитного поля, и E , когда энергия передается электрической составляющей (вектором E). При всех разновидностях индукционного нагрева теплота выделяется токами, фаза которых совпадает с вектором электрического напряжения (вектором E), действующим в нагреваемом объекте. При H -нагреве токи в нагреваемом объекте образуют замкнутые контуры (вихревые токи). При E -нагреве токи проводимости в нагреваемом объекте не замкнуты, а продолжаются вне объекта токами смещения. Индуктор представляет собой H -нагреватель. Распределение теплоты в объекте при H -нагреве зависит от структуры магнитного поля, определяемой формами проводника и объекта нагрева и их взаимным расположением.

Когда габаритные размеры нагреваемого объекта больше длины электромагнитной волны (в свободном пространстве), индукционный нагрев производят одновременно электрической и магнитной составляющей.

Шихта, нагреваемая, а затем плавящаяся в тигле печи, все время находится в переменном электромагнитном поле индуктора.

Отсутствие при индукционной плавке газообразного теплоносителя позволяет вести процесс в любой желаемой и практически доступной атмосфере (воздухе, вакууме или специально наводимой и контролируемой атмосфере).

Период расплавления шихты в индукционной плавке непродолжительный. Большая скорость плавления в сочетании с благоприятной атмосферой позволяет свести к минимуму потери компонентов сплава на угар.

В отличие от плавки в электродуговых печах при индукционной плавке отсутствуют графитовые электроды, электрические дуги, в которых присутствуют молекулы углерода, активного азота и других газов. Благодаря этому исчезает опасность науглероживания стали и насыщения ее газами.

Большое влияние на характер физико-химических процессов, особенно при выплавке качественных сталей, оказывает интенсивное перемешивание жидкого металла, происходящее за счет электродинамических сил, которые возникают под воздействием электромаг-

нитного поля индуктора. Такое перемешивание позволяет быстро и эффективно выравнивать химический состав жидкого металла в объеме тигля, кроме того, облегчает дегазацию и всплывание неметаллических включений.

На поверхности расплава плотность тока максимальна и снижается от краев к середине.

Такое явление неравномерного распределения переменного электрического тока по сечению проводника называют «поверхностным эффектом» (от англ. skin-effect). Причина поверхностного эффекта состоит в том, что внутренние части проводника окружены наибольшим количеством магнитных линий и обладают значительной индуктивностью и большим реактивным сопротивлением. Поэтому через участки сечения ближе к центру проходит ток, величина которого меньше тока, проходящего через поверхностные слои. Поверхностный эффект зависит от частоты переменного тока. Он тем больше, чем выше частота.

Следствием поверхностного эффекта в условиях тигельной индукционной плавки является более высокая температура у стенок тигля и меньшая в центре. Электродинамическое перемешивание обеспечивает выравнивание температуры металла в объеме тигля.

Особенностью индукционной тигельной плавки, связанной с тем, что ток в индукторе и расплавленном металле течет в разных направлениях, является образование заметного выпуклого мениска, так называемого гребешка. Если по условиям плавки гребешок должен быть изолирован от внешней среды, приходится увеличивать толщину шлакового покрова.

Непрерывное перемешивание расплава в печи является существенным физико-химическим преимуществом процесса, ускоряющим протекание всех диффузионных процессов.

Температура шлака при индукционной плавке обычно ниже температуры металла, поэтому шлак вследствие самой природы процесса в отличие от других сталеплавильных процессов играет здесь относительно пассивную роль. Здесь обменные металлургические реакции между шлаком и металлом также имеют ограниченное значение. При индукционной плавке характер процесса обуславливается только особенностями контакта и взаимодействия расплава с футеровкой и атмосферой печи.

Интересной особенностью процесса в отличие от мартеновской плавки и плавки в электродуговых печах является также и то, что температура металла достигает максимальных значений не у поверх-

ности, а в нижней части тигля. Поэтому расплавление тугоплавких и тяжелых легирующих элементов здесь происходит быстрее и с меньшими потерями, а в стали они распределяются равномернее за относительно более короткий промежуток времени. Этому в значительной степени способствует и электродинамическое перемешивание. Индукционная плавка с точки зрения возможности регулирования температуры металла является наиболее управляемой.

Относительная легкость управления температурным режимом плавки способствует протеканию многих физико-химических процессов в желаемом направлении, что особенно важно при выплавке специальных сталей и сплавов для сложных и тонкостенных отливок.

Процесс плавки в индукционных печах обычно протекает в условиях, характеризующихся недостатком кислорода. Это, с одной стороны, обуславливает малый угар, а с другой, ограничивает проведение окислительных процессов. Поэтому при выборе шихты следует исходить из того, чтобы процесс плавки сводился только к переплаву шихты.

Наиболее экономичной является плавка, при которой происходит сплавление компонентов шихты. Расчет ее производят исходя из того, чтобы после ее расплавления (если нужно и легирования) получить заданный химический состав сплава.

Индукционные печи могут иметь кислую и основную футеровки. Плавка в печах с основной футеровкой позволяет получить сталь с меньшим количеством оксидных неметаллических включений. При плавке в печах с кислой футеровкой труднее получить низкокремнистую сталь.

Высоколегированные стали, содержащие повышенную концентрацию таких элементов, как марганец, титан и алюминий, целесообразнее выплавлять в печах с основной футеровкой.

Особенности изготовления футеровки печей и интенсивный контакт ее с металлом обуславливают большую, чем в других процессах, возможность обменных реакций между металлическим расплавом и компонентами огнеупоров. Тщательный контроль такого процесса особенно необходим при вакуумной плавке.

4.5. Плавка в индукционной тигельной печи

В начале плавки (в течение первых 5–10 мин) до прекращения толчков тока генератор работает на пониженной мощности, затем подводимую мощность доводят до максимальной.

В любых условиях плавку должны вести при закрытом тигле. Во время плавления шихту нужно периодически осаживать. Одновременно с этим добавляют оставшуюся часть шихты. Когда последние куски шихты расплавятся, в печь вводят шлаковую смесь. Шлак защищает металл от окисления, снижает угар легирующих элементов, уменьшает тепловые потери и благоприятствует протеканию необходимых физико-химических процессов.

При кислом процессе шлаковая смесь может быть составлена из боя шамота и стекла, свежееобожженной молотой извести и молотого плавикового шпата и т. д. Для основного процесса шлаковая смесь состоит из 70 % обожженной извести, 20 % плавикового шпата и 10 % магнезитового порошка; во время доводки к такой смеси могут быть добавлены молотый кокс, ферросилиций и порошок алюминия.

В табл. 4.1 приведен примерный химический состав кислого и основного шлаков (по основным составляющим).

Таблица 4.1

Примерный химический состав кислого и основного шлаков, %

Шлак	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃
Кислый	40	7	6
Основной (при выплавке без десульфурации)	25	40	35

Количество образующегося шлака зависит от емкости печи и продолжительности доводки. Для печи емкостью 250 кг это количество составляет приблизительно 3 % веса металла.

Плавку в индукционных печах можно вести с окислением и без него. Безокислительный процесс (переплав) характеризуется небольшой продолжительностью и низким угаром. В большинстве случаев плавку без окисления проводят, применяя кислый процесс.

Плавку с окислением ведут в тиглях из основных огнеупорных материалов. Окисление углерода, удаление фосфора и серы можно проводить с большой скоростью, что при глубокой ванне и относительно малой поверхности соприкосновения металла и шлака связано с интенсивной циркуляцией жидкого металла. Часто для ускорения окисления примесей поверхность расплава обдувают воздухом или добавляют в шлак железную руду и окалину. Эти окислители могут быть внесены в тигель вместе с шихтой.

Как было отмечено, тугоплавкие и неокисляющиеся легирующие добавки (ферромолибден, никель, медь и другие) целесообразно

вводить в печь вместе с шихтой или во время плавления. Другие легирующие вводят в жидкий металл в следующем порядке: феррохром, ферросилиций, феррованадий, ферротитан. При выплавке стали с высоким содержанием хрома большую часть феррохрома можно вводить в конце расплавления.

При выплавке стали, содержащей большое количество вольфрама, ферровольфрам вводят в тигель при наличии в нем полукислого магнезиально-кремнеземистого или кислого шлака. Это объясняется тем, что окисел вольфрама WO_3 является кислотным, и при основном шлаке в последний перейдет значительное количество дорогостоящего вольфрама.

Для предупреждения потерь такого легкоокисляющегося элемента, как титан, на поверхности наводится шлак из окиси кальция и кремнезема при соотношении $CaO : SiO_2 = 3-4$.

Раскисление стали производят вводом в печь ферромарганца и ферросилиция, а в ковш алюминия. Особенности индукционной плавки позволяют значительно сократить расход алюминия. При заливке в кокиль, изложницы и сухие формы в сталь вводят около 200 г алюминия на 1 т металла. При заливке обычных сырых литейных форм, чтобы избежать образования пористости в отливках, расход алюминия увеличивается до 0,8–1,0 кг на 1 т металла.

4.6. Применение и технико-экономические показатели

Индукционные печи относятся к числу относительно несложных в условиях эксплуатации плавильных агрегатов. Они могут быть использованы для выплавки малых и больших порций металла (от нескольких граммов до нескольких десятков тонн). В индукционных печах возможна выплавка любых марок стали на холодной и жидкой завалке. Вследствие особенностей процесса индукционной плавки его целесообразно применять для выплавки низкоуглеродистых нержавеющих, сложнолегированных, жаропрочных, быстрорежущих сталей и прецизионных сплавов. Целесообразно использовать индукционные печи в литейном производстве в дуплекс-процессе для легирования и рафинирования чугуна и стали, выплавленных в другом плавильном агрегате. С успехом они могут быть использованы в качестве раздаточных печей.

Отсутствие практически окисления металла в печи, возможность точного регулирования температуры обеспечивают продолжительную

выдержку расплава при минимальном угаре и его стабильные физико-химические свойства. Наблюдается тенденция изготовления и использования в литейном производстве печей большой емкости промышленной и средней частоты. В некоторых цехах стало обычным выплавлять сталь в печах промышленной частоты емкостью до 30 т и мощностью до 6250 кВт (производительность на твердой завалке около 8 т/ч). Для производства крупного стального литья разработаны конструкции печей промышленной частоты емкостью 50, 80 и 100 т. Среднечасовая производительность печей промышленной частоты мощностью 200–2100 кВт и с тиглями емкостью 0,5–15 кг составляет 0,35–4,6 т.

Емкость действующих печей средней частоты составляет 8–12 т.

Следует отметить, что в тиглях печей промышленной частоты жидкий металл поднимается выше, чем в высоко- и среднечастотных. Поэтому высота тиглей в печах промышленной частоты примерно в 1,5 раза больше.

Расход мощности и часовая производительность при той же емкости тигля больше у печи средней частоты. С понижением частоты тока можно уменьшить подводимую мощность электроэнергии.

Расход электроэнергии в печах промышленной частоты за исключением печей емкостью меньше 1,0 т ниже, чем в высокочастотных печах. Решающее влияние на удельный расход электроэнергии оказывают характер процесса, качество и габаритные размеры кусков шихты, марка стали и условия загрузки. Выход годной жидкой стали при индукционной плавке составляет около 95 %. Электротермический КПД составляет 60–75 % и зависит от многих факторов, среди которых основными являются частота тока и габаритные размеры шихты.

Электротермический КПД печей небольшой емкости будет увеличиваться по мере увеличения частоты, поэтому такие печи должны работать с использованием тока большей частоты (по сравнению с печами большой емкости).

Минимальный размер плавящейся шихты должен в 2–3 раза превышать глубину проникновения тока. Последняя обратно пропорциональна корню квадратному из частоты. Следовательно, по мере повышения частоты можно достаточно эффективно переплавлять более мелкие куски шихты. Так, при частоте 50 Гц минимальный диаметр шихты для получения оптимального КПД равен 25 см, а при частоте 1000 Гц – всего 5 см. Приведенные данные относятся только к периоду расплавления.

Тип плавильной установки и характер процесса должны выбираться в каждом конкретном случае в зависимости от всего комплекса технических и технико-экономических факторов.

5. ПЛАВКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

5.1. История развития дуговых электрических печей

В электрических печах плавку стали производят за счет теплоты, получаемой в результате преобразования электрической энергии в тепловую. Применение электрического тока для нагрева впервые было предложено в 1803 г. В. В. Петровым после открытия им в 1802 г. явления электрической дуги.

В электроплавильных печах успешно выплавляют многочисленные марки легированных сталей самого ответственного назначения. На долю литейного производства приходится около 50 % изготовления такой стали. Вначале плавка в электрических печах предназначалась только для получения легированных и высококачественных сталей. В последние годы все большее распространение электроплавильные печи получают для выплавки сталей массового потребления. В настоящее время в литейных цехах наибольшее количество стали выплавляют в электродуговых печах.

Первая дуговая печь, работающая на трехфазном токе с вертикальными электродами, была построена французским инженером П. Эру в 1899 г. В печи П. Эру жидкая металлическая ванна была защищена от науглероживающего действия электродов слоем жидкого шлака.

Современные дуговые электросталеплавильные печи состоят из сложного комплекса механического и электрического оборудования.

В металлургии стали используют электродуговые печи емкостью до 180 т и более, мощностью питающих их трансформаторов до 36000 кВа и более.

В обычных дуговых сталеплавильных печах электрическая энергия преобразуется в тепловую в трех электрических дугах (рис. 5.1). При таком способе нагрева представляется возможным сосредоточить в относительно небольшом объеме большую мощность, достигающую до 16000 кВт на одну дугу, и достигнуть внутри дуги температуры примерно 10000 °С (в среднем 4000–6000 °С).

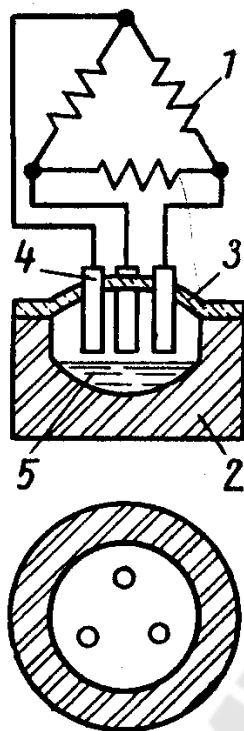


Рис. 5.1. Схема современной трехфазной дуговой электрической печи прямого нагрева с зависимой дугой:

1 – вторичные обмотки печного трансформатора; 2 – футеровка пода и стен печи, заключенных в стальной кожух; 3 – свод; 4 – электроды; 5 – ванна металла

Дуговые электрические печи питаются электроэнергией через понижающий трансформатор, входящий в обязательный комплект электрооборудования установки. Правильное соотношение между размерами печи и мощностью трансформатора – важнейший фактор, определяющий основные показатели работы дуговых электрических печей: производительность, удельный расход электрической энергии и качество выплавляемого металла. Из электродуговых печей в литейном производстве наибольшее применение находят печи емкостью 3–5 т.

В зависимости от места расположения электрической дуги по отношению к нагреваемому телу различают электродуговые печи трех типов:

- с *независимой дугой*, которая горит между электродами, не касаясь плавящейся шихты; в таких печах электрический ток не проходит через металл, их широко применяют для выплавки цветных сплавов;
- с *зависимой дугой* (печи так называемого прямого нагрева). В этом случае дуговой разряд протекает между электродами и нагре-

ваемым или плавящимся материалом. Печи такого типа широко используют для производства фасонного стального литья (рис. 5.1);

– с закрытой дугой; электрическая дуга горит под слоем твердой шихты. Такие печи называют также комбинированными электродуговыми печами. Их широко используют при производстве ферросплавов.

Развитие электрометаллургических процессов сопровождается непрерывным совершенствованием технологии и конструкции печей. Наиболее характерной чертой современной электрометаллургии является быстрый рост емкости и мощности дуговых печей. Себестоимость стали, выплавляемой в таких печах, заметно ниже, чем стали, получаемой в печах малой емкости. По этой причине количество электрических печей большой емкости, используемых в литейных цехах, постоянно увеличивается. Увеличение емкости печей сопровождается и использованием трансформаторов повышенной мощности.

В конструкции некоторых современных печей предусматривают устройство для использования кислорода, кислородно-топливных горелок и вдувания в сталь пылевидных веществ.

Современные электродуговые печи имеют электромагнитные устройства (статоры) для перемешивания жидкого металла и выравнивания его химического состава и температуры, что в частности важно при легировании стали тугоплавкими элементами.

В литейных цехах в отличие от металлургических кислый процесс электроплавки применяется чаще. При кислом процессе электроплавки отмечаются большая стойкость футеровки, более низкая ее стоимость, меньший удельный расход электроэнергии и продолжительность плавки, хорошая раскисленность стали и в отдельных случаях повышенные литейные свойства.

В большой металлургии электродуговые печи в основном применяют для выплавки высоколегированных сталей. В литейном же производстве электродуговые печи широко используют и для выплавки углеродистых сталей.

5.2. Физико-химические особенности процесса

Как было отмечено, для всех процессов производства стали характерны общие физико-химические закономерности. Вместе с тем тип применяемого плавильного агрегата, источники тепловой энергии, природа газовой фазы и другие факторы придают каждому процессу свои специфические особенности.

Существенным отличием электрометаллургического способа производства стали от других способов является возможность получения в плавильном пространстве восстановительной или нейтральной атмосферы и различного давления (от вакуума до давления, значительно превышающего атмосферное).

Хотя в этом отношении плавка в электродуговых печах имеет более ограниченные возможности, чем в индукционных электрических печах, но наличие в первых более горячего шлака, постоянно разогреваемого в восстановительной атмосфере электрических дуг, позволяет с большим успехом использовать шлаковую фазу для рационального управления физико-химической стороной процесса.

Восстановительная атмосфера в электродуговых печах позволяет получить шлак, содержащий в конце плавки не более 1 % FeO, что примерно в 10 раз меньше, чем в обычном шлаке мартеновской плавки.

Другим существенным отличием электродугового процесса плавки является отсутствие в атмосфере печи кислорода. Поэтому ведение окислительных процессов возможно только за счет внешнего кислорода, источниками которого могут быть железная руда и газообразный кислород, вдуваемый в ванну. По этой же причине имеют место меньшие потери металла на угар.

В зоне электрических дуг металл, не защищенный шлаком, при очень высокой температуре приходит в непосредственное соприкосновение с газовой фазой, которая содержит атомарный и активный азот. Поэтому электродуговая сталь при прочих равных условиях содержит больше азота, чем мартеновская.

Возможность ведения плавки на шлаке с более высокой температурой плавления и перегрева в условиях основного процесса облегчает осуществление десульфурации. При основном процессе плавки обеспечиваются все условия, необходимые для получения стали с минимальным содержанием серы. С этой точки зрения любой другой промышленный процесс производства стали уступает электродуговой плавке. В то же время условия для проведения дефосфорации в электродуговых печах хуже, чем в мартеновских.

В электродуговых печах имеются благоприятные условия для переплава высоколегированных отходов. Здесь потери дефицитных легирующих элементов минимальны. В этом отношении с ним может конкурировать только индукционный процесс электроплавки.

Существенной особенностью выплавки углеродистых сталей в электродуговых печах является возможность работы с одним шла-

ком, без специального восстановительного периода. Это значительно сокращает продолжительность плавки, расход электроэнергии и улучшает все технико-экономические показатели процесса.

В процессе электроплавки конечный результат предопределяется в основном взаимодействием двух фаз – металлической и шлаковой. В других процессах выплавки стали (конвертерных, мартеновском) решающим является результат взаимодействия трех фаз: газовой, шлаковой и металлической. Поэтому с точки зрения возможности использования влияния физико-химических факторов на конечные результаты электроплавки является более совершенной. Практически значительное количество дефектов в отливках и слитках из легированных сталей получается из-за плохого качества металла или вызываются и усугубляются четырьмя вредными примесями: кислородом, серой, водородом и фосфором. Электроплавка является наиболее гибким процессом для борьбы с тремя примесями: кислородом, серой и водородом.

5.2.1. Основной процесс

Плавку стали можно осуществлять с окислением или без окисления металла. Особенностью первого варианта является наличие периода активного кипения металла, являющегося следствием окисления углерода кислородом железной руды. Кроме углерода, окисляются кремний, марганец, хром, фосфор и другие элементы. Плавку с окислением применяют при использовании сталеного лома неизвестного происхождения, засоренного фосфором, а также при выплавке мягких сортов стали. Плавку без окисления, называемую переплавом, осуществляют на качественной шихте, чистой по фосфору и другим примесям.

Плавка с окислением технологически сложнее. Она состоит из следующих этапов: заправки печи, загрузки шихты, плавления, дефосфорации, кипения, скачивания окислительного шлака, науглероживания, раскисления, десульфурации и доводки.

Заправку печи производят после выпуска стали и удаления остатков шлака. В качестве заправочных материалов используют магнетитовый порошок (первого класса), обожженный доломит, сырой доломит, хромистый железняк и др.

Этапы дефосфорации, кипения и скачивания шлака называют *окислительным периодом*; этапы науглероживания, раскисления, десульфурации и доводки — *восстановительным периодом*.

Заправку печи производят после каждой плавки. Заправка печей емкостью 0,5–1,5 т продолжается 5–10 мин, емкостью 3–5 т – 10–15 мин. Только после тщательной заправки приступают к загрузке шихты.

Шихту подбирают исходя из того, чтобы содержание в ней углерода примерно на 0,5 % было выше его содержания в готовой стали. Основным компонентом шихты обычно является стальной лом А2-1 (по ГОСТу 2787–63). При выплавке хромистых сталей допускается использование в шихте до 50 % хромистых отходов. Содержание хрома в этом случае не должно превышать 1,2 %.

Отходы, содержащие никель и молибден, могут быть использованы в шихте в любых количествах, необходимых для плавки. Отходы, содержащие вольфрам и ванадий, из-за их большого угара применяют только для плавки без окисления. При загрузке печи должен быть соблюден определенный, установленный практикой порядок. На под печи загружают чистую дробленую стружку и половину мелочи. Ближе к центру под электроды загружают наиболее крупные куски шихты; ближе к откосам и на крупные куски загружают средний лом. Сверху насыпают оставшуюся мелочь или чистую дробленую стружку (10–12 %).

Плавление состоит из проплавления колодцев в шихте под электродами, с образованием на поду озерка металла, расплавления шихты в середине ванны, т. е. в зоне действия электрических дуг, расплавления шихты на откосах и сталкивания ее на середину ванны. Сразу же после начала движения электродов вниз в центр печи забрасывают (5–6 лопат на 1 т) известь для ускорения шлакообразования. В практике скоростных плавки наводку окислительного шлака производят за 30–60 мин до полного расплавления. Для этой цели в печь вводят железную руду, обожженную известь и плавиковый шпат соответственно в количествах 4–9, 5–9 и 2–3 кг на 1 т металлической шихты. Благодаря этому к моменту полного расплавления ванна оказывается покрытой жидкоподвижным и химически активным шлаком.

После полного расплавления шихты и контрольного химического анализа стали в печь загружают железную руду и известь. После их расплавления и прореагирования с металлом скачивают, не выключая электрического тока, 60–70 % шлака. При уменьшении мощности на дугах можно обеспечить самопроизвольное стекание шлака из печи через порог загрузочного отверстия. Присадка руды и последующий спуск шлака могут повторяться до 3 раз с доведением при этом содержания фосфора в стали до 0,01 %.

После дефосфорации приступают к обезуглероживанию. Отметим, что граница между окончанием процесса дефосфорации и началом окисления углерода ясно не проявляется. Чтобы предупредить переход фосфора из шлака обратно в сталь, производят присадку извести. Периодическими присадками кусковой сухой и прокаленной руды (порциями 0,5 % веса металла) вызывают и поддерживают энергичное кипение.

Постепенным повышением температуры и снижением порций руды ванну доводят до чистого кипения. Признаком перехода к чистому кипению является восстановление марганца из шлака. Чистое кипение начинается, когда содержание углерода соответствует нижнему пределу заданного состава стали и фосфора не более 0,02 %. Перед чистым кипением, не включая электрического тока, скачивают около 80 % шлака.

Скачиваемый шлак окислительного периода обычно содержит 40–50 % CaO; 10–25% SiO₂; 12–15 % FeO; 4–10 % MgO; 5–10 % MnO; 2–4 % Al₂O₃ и 0,5–2 % P₂O₅.

При выплавке марок сталей ответственного назначения скорость выгорания углерода составляет в начале окислительного периода 0,7 % в час и в конце до 0,3 % в час. Окислительный период плавки успешно интенсифицируется применением газообразного кислорода, вдуваемого в жидкий металл. Во время окислительного периода должно быть удалено не менее 0,35 % C при выплавке углеродистых сталей и не менее 0,45 % C при выплавке большинства легированных сталей.

Применение кислорода не только сокращает время окисления углерода, но и позволяет сократить расход электроэнергии, уменьшает расход руды и электродов. Продолжительность окислительного периода в печах емкостью 3–5 т составляет около 35–45 мин (при плавке без кислорода).

Перед началом восстановительного периода содержание углерода в стали должно быть на 0,02–0,03 % меньше нижнего предела, заданного в готовой стали; содержание фосфора не более 0,015 %, а температура стали на 15–20 °C выше температуры ее выпуска.

Окислительный шлак в большинстве случаев скачивается только при выплавке высокоответственных марок сталей. После удаления окислительного шлака в печь вводят ферромарганец из расчета доведения его содержания в стали до норм, установленных для нижнего предела данной марки стали. Угар марганца при этом составляет око-

ло 10 %. Если плавку проводят без скачивания шлака, в него добавляют раскисляющие смеси (известь, молотый кокс и плавиновый шпат в соотношении 5:2:1).

Восстановительный (или рафинировочный) период является последним и наиболее ответственным. Во время восстановительного периода требуется раскислить сталь, провести десульфурацию, довести сталь до нужного химического состава и ее температуру до требуемой при выпуске.

Все это обычно осуществляется параллельно.

Восстановительный период можно вести одним из следующих способов:

- под карбидным шлаком с применением кускового ферросилиция для раскисления стали перед выпуском;
- под слабокарбидным шлаком с использованием молотого ферросилиция для раскисления шлака во второй половине периода;
- под белым шлаком с раскислением жидкой стали ферросплавами в начале периода. Этот вариант чаще других применяют при выплавке стали для отливок;
- под белым шлаком (с использованием в течение всего периода молотого ферросилиция);
- под полуокислым шлаком – рафинирование. Это экономически целесообразно при выплавке кислотоупорной и нержавеющей стали.

Доводка и плавка завершаются введением в сталь металлических раскислителей.

Показатель успешного проведения восстановительного периода – содержание серы в стали. Если оно не превышает 0,02 %, можно считать, что восстановительный период проведен успешно.

5.2.2. Кислый процесс

По сравнению с основным процессом кислый процесс обладает следующими преимуществами:

- меньшими тепловыми потерями и более низким расходом электроэнергии;
- большой стойкостью футеровки и меньшим расходом огнеупоров;
- меньшей стоимостью и дефицитностью огнеупорных материалов;
- более высокой производительностью.

К недостаткам кислого процесса следует отнести:

- необходимость применения чистых по сере и фосфору исходных материалов;

– трудность выплавки стали с регламентируемым в небольших пределах содержанием кремния.

Главной особенностью кислого процесса электроплавки является ведение процесса под шлаком, содержащим до 65 % кремнезема. Под таким шлаком фосфор и сера не удаляются; шихта, используемая при кислом процессе, в связи с этим должна содержать на 0,01 % меньше фосфора и серы, чем готовая сталь.

Наименьшие продолжительность плавки и расход электроэнергии достигаются при использовании в шихте 70–75 % крупной шихты и 25–30 % мелкой, в которую можно вводить 10–12 % стружки.

В литейном производстве в основном используют кислые печи емкостью до 10 т, наибольшее распространение получили печи емкостью 1,5, 3 и 5 т, мощность трансформаторов которых соответственно 900, 1500 и 2250 кВа, вторичное напряжение 200–220 В.

Глубина ванны в кислой электрической печи больше, чем в основной. Чем глубже ванна при прочих равных условиях, тем меньше, чем у основных печей, диаметр кожуха, тепловые потери и расход электроэнергии.

При кислой электроплавке, так же как и при мартеновской, применяют кремневосстановительный и активный процессы. Активный процесс имеет преобладающее значение. Иногда применяют промежуточный процесс – с обязательным окислением и последующим восстановлением кремнезема.

При активном процессе содержание углерода в стали после расплавления может превысить требуемое на 0,1–0,3 %. При этом почти все количество железной руды может быть введено в завалку (до 1 % веса завалки).

При наличии в шихте хрома и повышенного количества кремния руду присаживают в печь во время плавления шихты в собирающийся на поду расплавленный металл.

При кислом процессе плавки интенсивное кипение ванны оказывает на качество стали не меньшее влияние, чем при основном.

Плавка с окислением, при которой за 25–30 мин кипения окисляются 0,15–0,20 % углерода, обеспечивает хорошую дегазацию стали, освобождая ее от различных включений, и предупреждает брак по ситовидной пористости из-за наличия в расплаве повышенного количества водорода.

Интенсивное кипение ровными пузырями по всей поверхности расплава может быть достигнуто присадкой небольших порций руды в металл, нагретый до высокой температуры.

Чтобы предупредить восстановление кремния во время кипения расплава, в шлак добавляют мелкоизмельченный известняк, понижающий в нем концентрацию кремнезема.

Шлак окислительного периода рекомендуется удалять только при выплавке ответственных марок стали после окончания чистого кипения. После получения нормального шлака, характеризующегося светло-зеленым, светло-голубым или дымчатым цветом, приступают к раскислению стали. Предварительное раскисление производят ферросилицием или силикомарганцем. Ферромарганец, с целью снижения угара марганца, рекомендуется присаживать в ковш. Окончательное раскисление производят алюминием, который вводят в сталь во время выпуска ее из печи.

Ответственной задачей при проведении любого процесса электродуговой плавки является определение и соблюдение оптимального электрического режима, особенно во время расплавления шихты. Электрическая аппаратура при этом работает в очень напряженном режиме. При правильном электрическом режиме наименьшему удельному расходу электроэнергии соответствует некоторая оптимальная сила (мощность) тока $I_{\text{опт}}$, при которой в условиях достаточно интенсивного плавления величина $\cos \varphi$ составляет 0,85–0,9. В печах средней емкости, используемых в литейных цехах, наименьший расход электроэнергии в период плавления обычно соответствует средней мощности 1200–1300 кВт.

5.3. Применение и технико-экономические показатели

Выплавка стали в электродуговых печах для фасонных стальных отливок в настоящее время является наиболее распространенной. Этому в значительной степени способствуют более низкая по сравнению с чугуном стоимость стального лома. Фасонно-сталелитейное производство сосредоточено на крупных машиностроительных заводах, которые располагают большим количеством дешевых стальных отходов (стружкой, стальной обрезью, отходами кузнечно-штамповочного производства и т. д.). Дуговая электросталеплавильная печь является агрегатом, в котором можно экономично производить утилизацию указанных отходов. Обычно такие отходы содержат мало фосфора и серы и, будучи использованными совместно с привозным ломом, являются хорошей шихтой для выплавки углеродистых сталей кислым процессом.

Практически в электродуговых печах кислым или основным процессом может быть выплавлена любая углеродистая или легированная сталь, используемая для машиностроительных отливок.

Электродуговая сталеплавильная печь может быть остановлена или пущена в эксплуатацию в любое время, удобное для производства, и при любом режиме работы (ступенчатом или параллельном). Однако следует иметь в виду (это часто при проектировании плавильных отделений не учитывается), что электродуговую печь не рекомендуется использовать при дуплекс-процессе или при работе на режиме, который требует выпуск жидкой стали несколькими порциями. Выдержка в электрической печи и подогрев стали изменяют ее химический состав, особенно при неглубокой ванне.

Электродуговая печь наиболее рационально может быть использована как плавильный агрегат с разовой выдачей выплавленной стали в один ковш.

Важным техническим показателем процесса электроплавки является расход электроэнергии на 1 т стали. Теоретически он должен в среднем составлять около 340 кВт · ч. Практически расход электроэнергии колеблется в довольно широких пределах (от 500 до 1000 кВт · ч на 1 т, а иногда и больше) в зависимости от типа печи, сорта стали, характера процесса и т. д. Эти величины приблизительно соответствуют расходу теплоты в 500–900 тыс. кал, что на 25–35 % меньше расхода теплоты в мартеновском процессе.

Технико-экономические показатели основного и кислого процессов существенно отличаются друг от друга. Некоторые из них для печей средней емкости при выплавке углеродистых, мало- и среднелегированных сталей приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Некоторые технико-экономические показатели плавки
в электродуговых печах**

Показатель	Процесс	
	основной	кислый
Средняя продолжительность плавки, ч	4	3,2
Средняя стойкость свода, кол-во плавок	20	120
Средняя стойкость стен, кол-во плавок	50	110
Количество ремонтов в месяц	3	1,5
Расход огнеупорного кирпича, кг/т	97	17
Расход электроэнергии, кВт · ч/т	750	620

Проводятся мероприятия, улучшающие технико-экономические показатели процесса плавки стали в электродуговых печах и повышающие его конкурентоспособность. К таким мерам, прежде всего, следует отнести увеличение мощности трансформаторов, ведение плавки на одном шлаке, применение кислорода, электромагнитное перемешивание, вдувание порошков и др.

В печах большой емкости при выплавке углеродистых сталей на твердой завалке и использовании кислорода получены следующие примерные показатели процесса: производительность – 26,8 т/ч, удельный расход электроэнергии – 500 кВт · ч/т, расход электродов – 4,6 кг/т, расход огнеупорного кирпича для стен электропечи – 1 кг/т, расход кирпича для свода – 1,2 кг/т, расход кислорода – 1,4 м³/т.

С определенным эффектом используют и вдувание в металл различных порошкообразных смесей. Например, вдувание в расплавленную сталь в струе кислорода смеси извести и плавикового шпата (в соотношении 8:2) в течение 6–10 мин позволяет снизить в стали содержание фосфора с 0,07 до 0,01 %. Удельный расход кислорода при этом составляет 4–5 м³/т, расход извести и плавикового шпата соответственно составляет до 20 и 6,5 кг/т. В других случаях для науглероживания стали применяют вдувание смеси пылевидного графита и кокса.

При дефицитности электроэнергии экономически целесообразно вести плавку в электродуговых печах, применяя топливно-кислородные горелки. Обычно такие горелки работают на жидком топливе (мазуте), однако могут быть использованы такие горючие газы, как пропан, природный и т. д., 1 кг пропана может заменить около 10–11 кВт · ч электроэнергии. Горелки можно вводить через заслонку рабочего окна печи или через отверстие в своде или боковой стенке. Горелки используют при выключенном электрическом токе на протяжении части периода расплавления (около 1 ч). В этом случае горелка компенсирует до 60 % теплоты, требующейся для расплавления шихты при включенном электрическом токе в течение всего периода расплавления. Расход мазута при этом составляет 35–45 л, а кислорода 55–57 м³ на 1 т стали; расход электроэнергии сокращается на 30–35 %. Продолжительность плавки увеличивается примерно на 20 %.

В реальных условиях производства невозможно избежать потерь металла и шлака, происходящих в результате испарения. В процессе плавки стали в электродуговых печах выделяется до 1 % (веса металла) продуктов испарения, большая часть которых оседает в виде тонкой пыли на конструкциях или попадает, если их специально не улавливают, в атмосферу цеха и в окружающую его атмосферу.

6. ПЛАВКА ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

6.1. Классификация процессов плавки и их общая характеристика

Все цветные сплавы по условиям их плавки подразделяют на три группы: I – алюминиевые, магниевые и цинковые; II – медные и никелевые; III – на основе титана и тугоплавких металлов.

Алюминиевые и магниевые сплавы имеют температурный интервал плавления от 600 до 800 °С, цинковые сплавы еще более легкоплавкие (температура плавления цинка равна 419 °С). В то же время все эти сплавы обладают повышенным сродством к кислороду. Эти две характерные черты определяют технологию плавки алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов.

Медь, никель, а также кобальт относятся к металлам, малоактивным по отношению к кислороду. Они могут быть раскислены железом. По температуре плавления эти металлы и их сплавы располагаются в среднем интервале между легкоплавкими и тугоплавкими металлами (1000–1600 °С).

Титан и тугоплавкие металлы кроме высокой температуры плавления имеют, как правило, и высокую активность по отношению к другим фазам, участвующим в процессе плавки.

В соответствии с указанными особенностями каждой из групп сплавов выбирают те или иные методы плавки.

Для плавки алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов применяют (рис. 6.1) как монопроцессы в топливных и электрических печах, так и полипроцессы. Полипроцессы применяют в крупносерийном и массовом производстве отливок. В этом случае плавку ведут в топливной печи (обычно это стационарная пламенная печь ПлС), а операции по доводке и рафинированию осуществляют в раздаточных печах (обычно это тигельные печи сопротивления – ПСТ). При этом кроме дуплекс-процесса возможен также триплекс-процесс VIII (рис. 6.1): плавку ведут в ПлС, затем сливают в печь ожидания (тоже ПлС), а уже потом разливают по раздаточным печам. При небольших объемах производства предпочтительнее бесконтактные методы плавки; более того, даже топливные процессы реализуются бесконтактным методом (рис. 6.1, а). Для магниевых сплавов использование бесконтактной плавки необходимо, так как магний очень активный металл, легко окисляется, и меры по ограничению контакта с воздухом приходится применять даже при разливке.

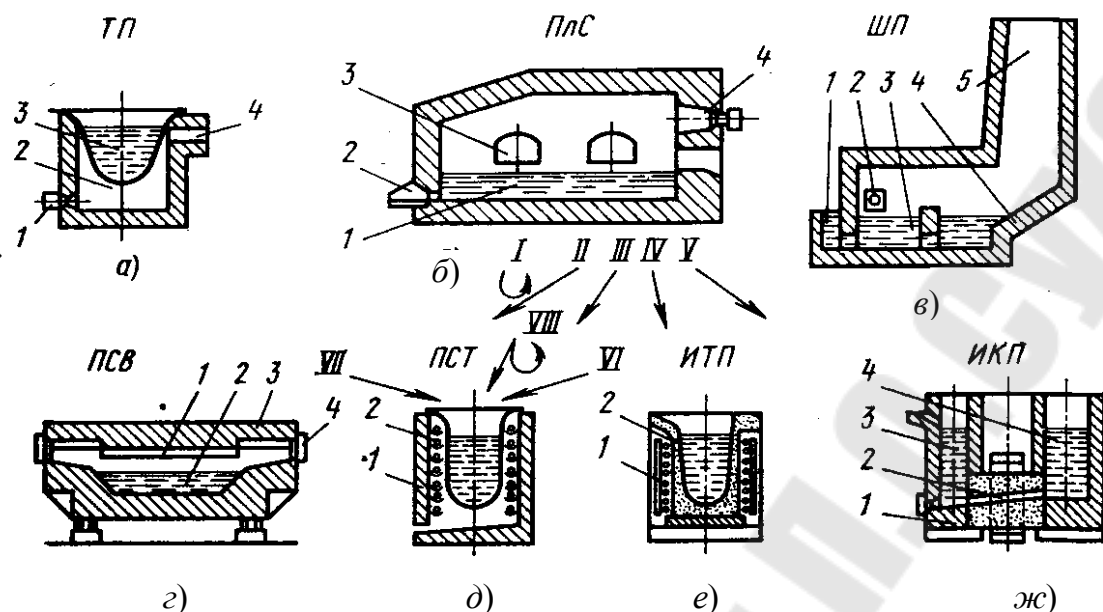


Рис. 6.1. Классификация процессов плавки и технологические схемы печей для плавки алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов: а – тигельная топливная печь ТП; б – стационарная пламенная печь ПлС; в – шахтно-пламенная печь ШП; г – ванная электропечь сопротивления ПСВ; д – тигельная электропечь сопротивления ПСТ; е – индукционная тигельная печь ИТП; ж – индукционная каналная печь ИКП; дуплекс-процессы: I – ПлС – ПлС, II – ПлС – ПСВ, III – ПлС – ПСТ, IV – ПлС – ИТП, V – ПлС – ИКП, VI – ИТП – ПСТ, VII – ПСВ – ПСТ; триплекс-процесс VIII – ПлС – ПлС – ПСТ

До последнего времени для плавки цветных сплавов применяли только периодические процессы. Однако энергетически выгоднее осуществлять непрерывный процесс. В связи с этим при плавке цветных сплавов начали использовать шахтно-пламенные печи (рис. 6.1, в).

Для плавки медных и никелевых сплавов применяют в основном монопроцессы. Их осуществляют в топливных печах (ПлС, ПлВ). Для плавки бронзы применяют дуговые печи с независимой дугой (рис. 6.2, е), для плавки никелевых сплавов, содержащих легкоокисляемые элементы, используют индукционные вакуумные печи. Плавку латуни производят в ИТП, ИКЛ (рис. 6.2, в и 6.2, г).

Для плавки титановых сплавов и тугоплавких металлов применяют исключительно переплавные процессы: вакуумно-дуговой, электронно-лучевой и плазменно-дуговой (рис. 6.3).

6.2. Технологические схемы печей

Тигельная топливная печь (рис. 6.1, а) имеет графитовый, стальной или чугунный тигель 3 для металла, в пространстве 2 сжигается

газ или мазут при помощи горелок *1*, продукты сгорания уходят в газоход *4*. Шихтовые материалы загружают в тигель, расплавляют, затем сплав доводят до требуемой кондиции.

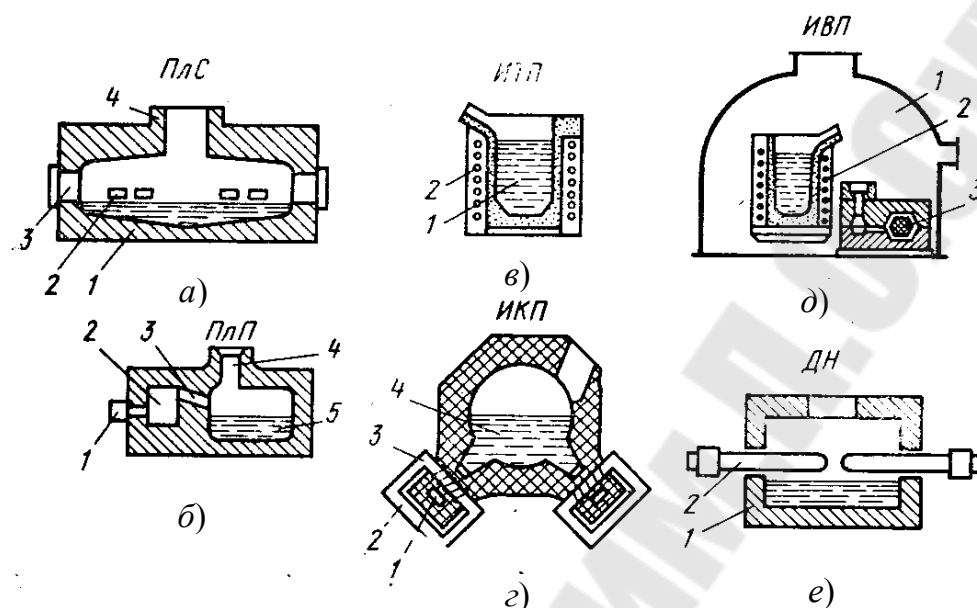


Рис. 6.2. Технологические схемы печей для плавки медных и никелевых сплавов:

- a* – стационарная пламенная печь; *б* – поворотная пламенная печь;
в – индукционная тигельная печь; *г* – индукционная канальная печь;
д – индукционная вакуумная печь; *е* – дуговая печь с независимой дугой

Пламенная печь (рис. 6.1, *б*) отличается от тигельной тем, что расплав в ванне *1* контактирует с атмосферой печи. Загружают эти печи через окна *3*, газ сжигается при помощи горелок *4*, для выпуска жидкого металла имеется летка *2*.

Шахтно-пламенная печь (рис. 6.1, *в*) имеет шахту *5* с подиной *4*, на которой плавится шихта, и ванну *3*, где скапливается металл. Над ванной расположена горелка *2*. Для раздачи металла служит камера *1*. Эти печи применяют для плавки алюминиевых сплавов.

В ванной электропечи сопротивления (рис. 6.1, *г*) нагрев ванны осуществляется нагревательными элементами *1*, расположенными у свода *3*. В ванну *2* через окна *4* загружают шихту. Металл сливают, наклоняя печь.

Тигельные электропечи сопротивления (рис. 6.1, *д*) получили наибольшее распространение при плавке в небольших литейных цехах, а также в качестве раздаточных печей. В тигле *2* готовят сплав, нагрев производится при помощи спирали *1*.

Индукционные тигельные печи (рис. 6.1, *е*) имеют обычное устройство: индуктор *1* охватывает тигель *2* и индуцирует в металле вихревые токи. Для плавки алюминиевых сплавов серийно выпускаются печи типа ИАТ.

Индукционные каналные печи могут быть двух типов: с одним тиглем и с двумя. На рис. 6.1, *ж* показана двухтигельная печь. Индуктор на сердечнике *1* охватывает каналы *2*, в которых выделяется теплота. Эти каналы соединяют тигли *3* и *4*. Раздача металла осуществляется из тигля *3*, а загрузка производится в тигель *4*.

Для плавки медных сплавов (рис. 6.2, *а*) предназначена стационарная пламенная печь, которая отапливается горелками или форсунками *2*, расположенными над ванной *1*. Загрузка производится через окна *3*, дымовые газы уходят в газоход *4*. Масса садки для этих печей обычно достаточно большая, и их применяют при соответствующих объемах производства.

При небольших объемах производства могут применяться топливные печи с графитовым тиглем или поворотные печи барабанного типа (рис. 6.2, *б*). В этой печи сжигание жидкого топлива производится при помощи форсунки *1* в форкамере *2*, газы по каналу *3* поступают в рабочее пространство *5*, загрузку осуществляют через горловину *4*.

Индукционные тигельные печи (рис. 6.2, *в*) применяют как для медных (серия печей ИЛТ – для латуней), так и для никелевых сплавов (серия ИСТ, т. е. сталеплавильные).

Индукционные каналные печи для плавки латуней выпускают тигельного и барабанного типа (это печи серии ИЛК). Масса садки печей для барабанного типа (рис. 6.2, *г*) больше, чем для тигельных печей. Барабан *4* с металлом в нижней части имеет обычно несколько индукционных единиц; сердечник *2* с первичной обмоткой *3* охватывает канал *1* с жидким металлом, являющийся вторичной обмоткой, в которой генерируется тепловая энергия.

Индукционные вакуумные печи (рис. 6.2, *д*) применяют для плавки никелевых сплавов. В вакуумной камере *1* располагается как сама печь *2*, так и форма *3*.

Дуговые печи применяют в основном для плавки бронзы. Это печи с независимой дугой (рис. 6.2, *е*). Они имеют рабочее пространство *1* барабанного типа, в которое с торцов введены графитированные электроды *2*, между которыми горит дуга.

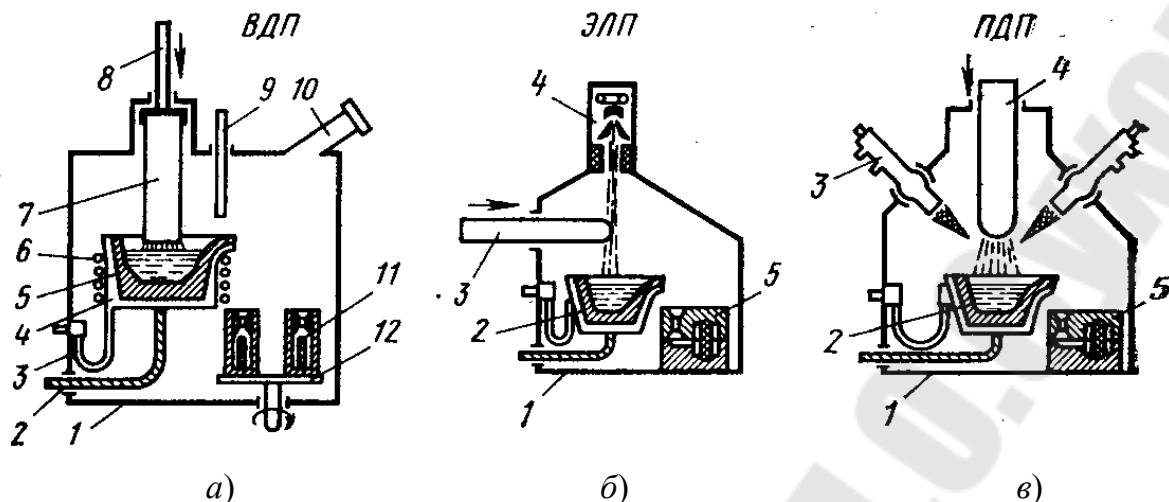


Рис. 6.3. Технологические схемы печей для плавки сплавов на основе титана и тугоплавких металлов

Для плавки титановых сплавов и сплавов тугоплавких металлов применяют в основном три типа печей (рис. 6.3): вакуумные дуговые, электронно-лучевые и плазменные.

Вакуумно-дуговая печь (рис. 6.3, а) с расходуемым электродом имеет вакуумную камеру 1, в которой расположен медный водоохлаждаемый тигель 4, связанный с внешней средой электрическим кабелем 2 и шлангами водяного охлаждения 3. Вокруг тигля располагается соленоид 6, предназначенный для фокусирования дугового разряда и перемешивания ванны жидкого металла. Футеровкой тигля служит гарнисаж 5, представляющий собой слой переплавляемого металла или сплава, застывшего на стенках водоохлаждаемого тигля. Шихтовый слиток 7 является обычно электродом. Иногда применяют нерасходуемый электрод, а шихтовый слиток подают отдельно. Шихтовый слиток прикреплен к электрододержателю 8, который перемещает его вниз по мере оплавления. Для оплавления настыля на сливном носке тигля имеется вспомогательный нерасходуемый электрод 9. Наблюдение за процессом производят через гляделку 10. Формы 11 находятся на поворотном столе 12.

Электронно-лучевая печь (рис. 6.3, б) имеет электронную пушку 4. В вакуумной камере 1 расположены водоохлаждаемый гарнисажный тигель 2 и форма 5. Шихтовый слиток 3 подается сбоку печи.

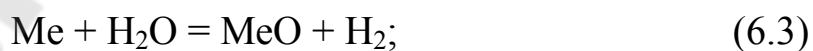
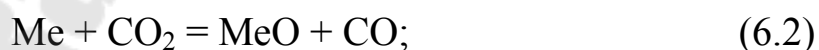
Плазменная переплавная печь (рис. 6.3, в) имеет камеру 1, тигель 2 и несколько плазмотронов 3, оплавливающих шихтовый слиток 4. Жидкий металл, так же как и в электронно-лучевой печи, заливается из поворотного тигля 2 в форму 5.

6.3. Общая характеристика процесса плавки цветных сплавов

Все печи для плавки цветных сплавов, за исключением шахтно-пламенной печи, являются печами периодического действия. В рабочее пространство, т. е. в ванну печи или тигель, загружают шихту расчетного состава, включают источник энергии, расплавляют шихту, перегревают расплав до заданной температуры, затем сплав доводят до заданного состава, рафинируют и модифицируют (рис. 6.4). Процесс плавки подразделяют на периоды: нагрева и расплавления, перегрева и доводки. Модель воздействия включает пять основных методов: корректировку шихты, последовательность загрузки, режим плавки, рафинирование, модифицирование. Способы рафинирования выбирают в зависимости от типа сплава, его состава, условий плавки и разливки и, как правило, связаны с применением специальных флюсов и других добавок.

При плавке цветных сплавов особенно важно соблюдать последовательность загрузки, режим плавки и проводить эффективное рафинирование сплава, так как многие его компоненты имеют высокую склонность к окислению и поглощению газов (растворение газов, образование соединений с газами).

Компоненты, входящие в цветные сплавы, могут реагировать с газовой фазой (рис. 6.4), образуя окислы, нитриды, гидроокиси и другие соединения:



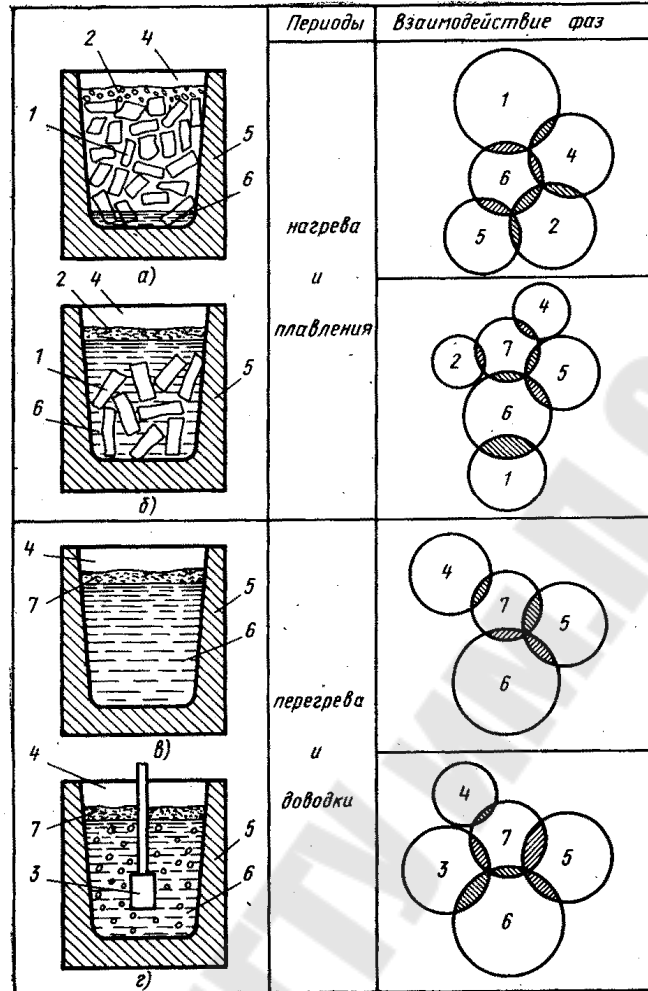


Рис. 6.4. Схема взаимодействия фаз при плавке цветных сплавов:
 а – распределение из твердого состояния; б – расплавление при растворении в жидкой ванне; в – доводка под флюсом; г – рафинирование; 1 – твердый металл; 2 – покровный флюс; 3 – рафинирующий флюс или добавки; 4 – газовая фаза; 5 – футеровка печи; 6 – жидкий сплав; 7 – шлак

Кроме того, многие цветные металлы склонны к повышенному газопоглощению:



При окислении алюминия и цинка образуется плотная равномерная пленка из окислов Al_2O_3 и ZnO , которая обладает хорошими защитными свойствами, а при окислении магния – пленка, не обла-

дающая защитными свойствами. Поэтому магний можно плавить только под покровным флюсом или в защитной атмосфере. Еще более активен титан. Его можно плавить только в вакууме.

Кроме взаимодействия металла с газовой фазой при плавке цветных сплавов происходит также взаимодействие твердого металла с жидким металлом. При плавке многих цветных сплавов твердые составляющие шихты растворяют в жидком сплаве. Это могут быть чушки того же сплава, лигатуры или другие добавки.

Жидкий сплав реагирует с покровными флюсами и образующимися шлаками. Составы флюсов подбирают таким образом, чтобы ограничить реакции окисления. Как жидкий сплав, так и шлак реагируют с футеровкой печи.

На заключительной стадии приготовления сплава (в печи, в ковше или в раздаточной печи) во время рафинирования флюсы или другие добавки реагируют со сплавом.

Выпуск металла из печей осуществляется четырьмя методами: через летку, путем наклона печи, магнитогидродинамическими насосами и вычерпыванием, которое производят специальные роботы-манипуляторы, зачерпывающие металл из раздаточной печи и заливающие его в форму. При производстве мелких отливок в небольших литейных цехах готовый расплав вычерпывают ручными ковшами непосредственно из раздаточных печей или из специальных раздаточных камер, соединенных каналами с основной ванной в пламенных или шахтно-пламенных печах.

6.4. Плавка алюминиевых сплавов

6.4.1. Физико-химическая характеристика процесса

Алюминий – сравнительно легкоплавкий и легкий металл ($t_{\text{пл}} = 658 \text{ }^\circ\text{C}$, плотность – 2700 кг/м^3), обладает высокой теплопроводностью и скрытой теплотой плавления, а так же большим сродством к кислороду.

Во время плавки алюминий реагирует с компонентами газовой фазы по реакциям типа (6.1)–(6.8). Наиболее вероятна реакция (6.1); для нее значения ΔG находятся в интервале 600–800 кДж/моль. Менее вероятна реакция (6.4). Реакция (6.3) имеет ΔG в интервале 350–420 кДж/моль. В расплавленном состоянии алюминий обладает повышенной способностью к растворению водорода, выделяемого при взаимодействии жидкого расплава алюминия с парами воды по реакции (6.3), источниками образования которых могут быть шихто-

вые материалы, футеровка печи, материал тигля, флюсы, инструмент, применяемый при плавке, продукты сгорания газообразного и жидкого топлива и атмосфера. Большое количество водорода в расплав может быть внесено с лигатурами: алюминиево-циркониевая лигатура (5 % Zr) может содержать до 45 см³ водорода на 100 г; алюминиево-титановая (3 % Ti) – до 30 см³ водорода на 100 г.

Кроме газов алюминиевый сплав может взаимодействовать также с огнеупорной футеровкой и флюсами. Взаимодействие с футеровкой, обычно выполняемой из окислов, может привести к восстановлению их алюминием. Развитие этих реакций для большинства окислов возможно, однако тормозится тем, что пленка Al₂O₃ обволакивает поверхность футеровки.

Взаимодействие расплавов с флюсами и добавками связано уже с рафинированием алюминиевых сплавов.

6.4.2. Рафинирование

При плавке алюминиевых сплавов применяют как печное рафинирование, так и рафинирование различными методами внепечной обработки. Наиболее распространенными способами рафинирования алюминиевых сплавов являются обработка рафинирующими флюсами и другими добавками, продувка газами и фильтрация, иногда применяют электрофлюсовое рафинирование.

Составы флюсов приведены в табл. 6.1. Все они содержат хлористые и фтористые соединения. Для предохранения расплавленного металла от взаимодействия с атмосферой печи применяют покровные флюсы, которые должны обладать возможно меньшей удельной массой, минимальной гигроскопичностью, располагаться равномерным слоем по зеркалу металла и легко отделяться от его поверхности при снятии шлака. Покровные флюсы вводят в печь при загрузке шихты. При плавке всех сплавов, кроме сплавов системы Al–Mg, применяют флюсы № 1–3, для сплавов системы Al–Mg флюсы № 4, 5, 6 (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Составы флюсов, используемых при плавке алюминиевых сплавов

№ п/п	Содержание компонентов по массе, %						
	NaCl	KCl	Na ₂ AlF ₃	CaF ₂	MgF ₂	MgCl ₂ · KCl	NaF
1	45	55	–	–	–	–	–
2	37	50	6,6	6,4	–	–	–
3	35	50	15	–	–	–	–

№ п/п	Содержание компонентов по массе, %						
	NaCl	KCl	Na ₂ AlF ₃	CaF ₂	MgF ₂	MgCl ₂ · KCl	NaF
4	–	–	–	–	–	100	–
5	–	–	–	15	–	85	–
6	–	–	–	–	15	85	–
7	30	47	23	–	–	–	–
8	–	–	–	40	–	60	–
9	–	–	–	–	15	85	–
10	47,5	47,5	5	–	–	–	–
11	35	40	10	–	–	–	15
12	56,5	11,5	7	–	–	–	25
13	50	10	10	–	–	–	30

Рафинирующие флюсы (№ 7–11, табл. 6.1) можно вводить непосредственно на поверхность расплава в ковше или тигле раздаточной печи. Однако это малоэффективно, так как они в этом случае играют роль покровных флюсов, лишь частично рафинируя расплав.

Эффективнее введение их в расплав при помощи колокола. Например, флюсы № 10 и 11 (табл. 6.1) вводят в жидком виде при помощи колокольчика.

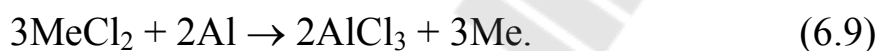
Особую группу составляют универсальные флюсы (№ 12, 13, табл. 6.1), обработка которыми позволяет совместить рафинирование и модифицирование сплава. В их составе обычно присутствует NaF, наличием которого объясняется модифицирующее действие флюса. Содержание NaF во флюсе может достигать до 60 %.

Рафинирование газами производится при температуре 710–730 °С в течение 5–20 мин. Обработка расплава хлором – процесс эффективный. Однако хлор токсичен, поэтому требуются специальные устройства для проведения процесса рафинирования: герметичные камеры, ковши, хорошая вентиляция, изолированные помещения, что ограничивает применение этого процесса. В связи с этим в фаснолитейном производстве алюминиевых сплавов находят широкое применение процессы, связанные с обработкой расплавов хлоридами (хлористым цинком, хлористым марганцем, гексахлорэтаном, четыреххлористым титаном и др.). В связи с высокой гигроскопичностью хлоридов перед вводом в расплав их обязательно подвергают сушке. Хлориды вводят в расплав в колокольчике, так как они имеют малую плотность. Расход составляет 0,05–2 % от массы обрабатываемого расплава, температура

процесса 700–730 °С. Расход гексахлорэтана составляет 0,3–0,7 %, обработка производится при 740–750 °С. Низкие температуры снижают эффект рафинирования, высокие – приводят к интенсивному окислению сплава.

В литейных цехах широкое применение находят таблетки препарата «Дегазер», которые содержат гексахлорэтан и хлористый барий (10 % по массе). Гексахлорэтан (C₂Cl₆) является органическим веществом с плотностью 2,09 · 10³ кг/м³ и низкой температурой плавления (186,5 °С). В отличие от хлористых солей C₂Cl₆ негигроскопичен, и для него не требуется специальных условий хранения.

Хлористые соединения в расплаве взаимодействуют с алюминием.



Хлористый алюминий в виде пузырьков, проходя через расплав, увлекает неметаллические включения, чем обеспечивается очистка металла от неметаллических примесей.

Рафинирование алюминиевых сплавов можно осуществить также фильтрацией сплава, в основе которой лежит как физическая и химическая адсорбция расплава на границе раздела металл–фильтр, так и механическое улавливание взвешенных в расплаве неметаллических включений. Для фильтрации применяют различные материалы, например, стеклоткань, которая позволяет снизить загрязненность сплава неметаллическими включениями приблизительно в 2–2,5 раза или слой измельченного глинозема с размером зерна 3–6 мм, который значительно уменьшает содержание неметаллических включений в сплаве, но не снижает содержание водорода.

Для рафинирования алюминиевых сплавов можно применять также вакуум, ультразвук и другие способы рафинирования.

6.4.3. Технология плавки

В качестве шихтовых материалов используют первичный алюминий и силумин в чушках, сплавы алюминиевые в чушках, возврат, лом и отходы, а также лигатуры.

Приготовление лигатур производится с целью введения в алюминиевый сплав тугоплавких компонентов (Cu, Ni и др.) или активных легкоокисляющихся компонентов с минимальными потерями (табл. 6.2).

Характеристика двойных алюминиевых лигатур

Лигатура	Содержание легирующего компонента	Температура, °С	
		плавления лигатуры	расплава при введении легирующей добавки
Al–Cu	45–50	575	750
Al–Mn	10	780	850–900
Al–Ni	20	780	850–900
Al–Ti	3–4	800–850	1200–1300
Al–Mg	9–11	560–640	700–750

Лигатуры можно готовить в любой плавильной печи. Тугоплавкие лигатуры (Ti, Be, Zr, Cr) плавят в графитовых тиглях. При приготовлении всех лигатур сначала плавят алюминий, а затем небольшими порциями вводят легирующую добавку при определенной температуре (табл. 6.2). Плавку ведут под покровным флюсом. Расплавы перемешивают для более быстрого усвоения легирующих добавок, после чего рафинируют.

Расчет шихты при плавке алюминиевых сплавов производится методом подбора или аналитическим методом с учетом угара элементов.

Загрузка шихтовых материалов обычно производится в следующей очередности: чушковый алюминий, крупногабаритный лом, переплав, лигатуры. Цинк вводят перед магнием. Материалы, вводимые в жидкий расплав, необходимо подогреть до температуры 150–200 °С во избежание выброса металла. Медь вводят в расплав при температуре 740–750 °С. Материалы, имеющие малую плотность, вводят в колокольчике.

Исходя из того, что поглощение газов интенсифицируется с увеличением температуры, плавку алюминиевых сплавов рекомендуется вести форсированно и при оптимальных температурах (табл. 6.3).

Температурные режимы плавки алюминиевых сплавов

Марка сплава	Температура, °С	
	перегрева	заливки
Al–Si	730–750	700–710
Al–Si–Mg	750	680–720
Al–Cu	740–780	690–730
Al–Cu–Si	750	680–730
Al–Cu–Zn	700–750	670–710

Расплав защищают от взаимодействия с атмосферой покровным флюсом.

Сплавы системы Al–Si–Cu плавят также в газовых печах. Шихта для газовых печей состоит из 40 % сплава в чушках и 60 % возврата, плавку ведут под покровным флюсом при температуре в газовой печи 850 °С, сам сплав не перегревают выше 780 °С; готовый сплав из плавильной печи выпускают через летку по желобу в печь ожидания, откуда при помощи пневмоперекачивающего устройства его подают в ковш. В ковше с помощью колокольчика, в который помещают дегазирующую таблетку, металл рафинируют. Во время транспортировки ковша поверхность металла закрывают покровным флюсом. Из ковша сплав заливают в раздаточные печи, где он также находится под покровным флюсом.

Плавка алюминиево-магниевых сплавов (с 9,5–11,5 % Mg) имеет ряд особенностей. В качестве шихтовых материалов используют алюминий высокой чистоты А995, А99, А97, А95, магний и лигатуры: Al–Be, Al–Ti, Al–Zr, а также возврат собственного производства.

В чистый прогретый до 700 °С тигель загружают чушки алюминия и лигатуру Al–Be, после расплавления и перегрева металла до 700 °С вводят лигатуры Al–Ti и Al–Zr. После расплавления всей загрузки сплав очищают от шлака, тщательно перемешивают и с помощью колокольчика, изготовленного из титана, вводят магний. Перегрев сплава выше 750 °С не допускается. При наличии в сплаве бериллия и титана плавку можно вести без защитного флюса. В остальных случаях применяют покровные флюсы № 4–6 (табл. 6.1). Появление на поверхности зеркала металла темно-бурых пятен указывает на то, что сплав окисляется. Черный налет на поверхности отливок или темный цвет на изломе образцов свидетельствуют о превышении температуры перегрева сплава выше нормы. После ввода всех компонентов сплав рафинируют флюсами № 8 и 9 (табл. 6.1), затем снимают шлак и производят заливку форм. Заливка сплава по формам осуществляется в интервале температур 660–770 °С в зависимости от толщины стенки отливок.

При плавке сплавов Al–Mg, содержащих более 3–4 % Mg, следует иметь в виду, что эти сплавы не только склонны к поглощению кислорода, водорода, но и взаимодействуют с азотом воздуха и с печной атмосферой. Для предотвращения образования нитридов применяют специальные флюсы, которые в своем составе, наряду с другими хлоридами, содержат обязательно хлорид магния, препятствующий выгоранию магния.

Во время плавки необходимо контролировать температуру расплава и содержание газов в металле, которые определяют по технологическим пробам, а также методом вакуумной экстракции.

На заключительной стадии получения алюминиевых сплавов проводят их модифицирование.

6.4.4. Модифицирование

Доэвтектические и эвтектические сплавы (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АК9 и др.) модифицируют путем ввода в расплав натрия или стронция. Натрий имеет высокую химическую активность и низкую температуру кипения, поэтому применяют натриевую соль. При использовании смеси 67 % NaF и 33 % NaCl температура металла должна быть 780–810 °С, а с применением модификатора, содержащего 62,5 % NaCl, 25 % NaF и 12,5 % KCl, температура понижается до 730–750 °С. Модификатор вводят на поверхность металла, очищенного от шлака, в количестве 1–2 % от массы расплава. Для интенсификации процесса расплав необходимо перемешивать. В процессе реакций, происходящих в расплаве, выделяется натрий, который и оказывает модифицирующее воздействие на металл. По окончании процесса модифицирования шлак сгущают добавками фторидов и хлоридов натрия и удаляют. Далее отбирают пробы и по их излому определяют эффект модифицирования. Затем расплав в течение 25–30 мин должен быть разлит по формам, так как эффект модифицирования ограничен во времени.

Для обеспечения более длительного времени эффекта модифицирования в качестве модификаторов применяют стронций, иттрий, сурьму, что позволяет сохранять модифицирующий эффект до 2–3 ч и в противоположность натрию обеспечивает расплаву меньшую склонность к окислению и насыщению газами, особенно водородом (в результате предотвращается образование газовой пористости). Стронций вводят в сплав в виде лигатуры.

Для заэвтектических силуминов в качестве модификаторов применяют лигатуру Cu–P (9–11 %) в количестве 0,05–0,1 % или смесь 20%-ного красного фосфора с 10 % K_2ZrF_6 и 10 % KCl в количестве 1,5–2 %, а также смеси, содержащие фосфорорганические вещества (хлорофос, трифинилфосфат).

Модифицирование часто совмещают с рафинированием. Применение, например, таблеток, содержащих гексахлорэтан C_2Cl_6 и KCl (рафинирующие) и пентисернистый фосфор P_4S_{10} , а также гексафторотитанат калия K_2TiF_6 (модифицирующие), позволяет получать на базе вторичных сплавов высококачественные отливки.

6.5. Плавка медных сплавов

6.5.1. Физико-химическая характеристика процесса

Медь имеет температуру плавления 1083 °С, латуни плавятся в интервале температур 950–1050 °С, оптимальной температурой литья бронз можно считать 1150–1200 °С. Перегрев выше этих температур приводит к насыщению сплавов газами, интенсивное выделение которых в процессе затвердевания ведет к пористости и ухудшает плотность и герметичность отливок. Насыщение газами зависит от химического состава сплава. Одни легирующие элементы способствуют уменьшению количества растворенного водорода, другие – увеличению. Например, чистые двойные сплавы Cu–Al имеют малую склонность к газопоглощению, но она резко возрастает при введении в сплав дополнительных легирующих компонентов и при наличии в сплаве примесей. Водород попадает в металл из печной атмосферы, содержащей пары воды.

Компоненты сплавов окисляются газовой фазой по реакциям (6.1)–(6.3). Окислы необходимо переводить в шлак. Например, окись олова удаляют из сплава, ошлаковывая ее обезвоженной содой



Железо удаляют окислительным рафинированием сплава купритом



При плавке бронз получение требуемого химического состава не вызывает особых трудностей, сложнее обеспечить минимальное насыщение сплавов газами, которые интенсивно поглощаются расплавом в процессе плавки и являются причиной образования газовых раковин и газоусадочной пористости. В связи с этим особое значение приобретает выбор защитного покрытия расплава, которое, однако, только предохраняет сплав от окисления, но не удаляет газы, растворенные в жидком металле.

6.5.2. Рафинирование

Для удаления водорода из расплава применяют несколько способов: вакуумирование, обогащение металлической ванны кислородом и введение в расплав дегазирующих присадок. Первый способ, требующий дорогостоящего оборудования, применяется ограниченно.

Обогащение кислородом значительно уменьшает содержание водорода, но приводит к насыщению металла кислородом, что вызывает необходимость раскисления. Дегазация окислением производится продувкой расплава воздухом, чистым кислородом и введением в жидкий металл окисляющих флюсов. В качестве окислителей в состав флюсов обычно вводят окислы меди, марганца.

Окислительное рафинирование флюсами осуществляется при температуре 1180–1200 °С, расход окислителей составляет 0,5–1 % от массы металла. Для удаления кислорода из расплава применяют раскисление.

Наиболее широко применяемым раскислителем при плавке медных сплавов с оловом и свинцом является фосфор. Раскисление сплавов меди, содержащих в своем составе Zn, Al, Be, Si, производится бериллием, так как окислы этих элементов не восстанавливаются фосфором. Бериллий позволяет полностью раскислить и получить отливки высокой плотности.

В качестве поверхностных раскислителей используют борид магния, карбид кальция и борный шлак. Наиболее эффективен борный шлак, состоящий из борной кислоты или буры и порошка магния в соотношении 95:5.

Дегазацию медных сплавов производят также газами, для чего используют азот, хлор, гелий и аргон. Рафинирование сплава хлором, кроме того, протекает за счет активности хлора, вступающего в реакцию с растворенными в металле газами и образующего хлориды, которые затем удаляются из металла.

Дегазацию медных сплавов, как и алюминиевых, производят гексахлорэтаном C_2Cl_6 , который по дегазующей способности не уступает инертным и нейтральным газам.

Для рафинирования применяют также фильтрацию сплавов, например, алюминиевых бронз. Для этого используют как керамические зернистые фильтры, например, из магнезита, пропитанного CaF_2 , так и металлические сетки, например, из молибдена.

6.5.3. Технология плавки

Плавку бронзы обычно производят в дуговых печах с независимой дугой или в пламенных печах (см. рис. 6.1, а, б, е), а латуней в индукционных тигельных и канальных печах (см. рис. 6.2, в, з).

В качестве шихты используют первичные материалы, возврат, лом и сплавы в чушках. Для доводки сплава по химическому составу применяют лишь чистые первичные металлы либо лигатуры (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Составы лигатур, применяемых при плавке медных сплавов

Наименование лигатуры	Состав, % по массе	Температура плавления, °С
Медно-марганцовая	73 Cu; 27 Mn	860
Медно-бериллиевая	85–95 Cu; 5–15 Be	900
Медно-кремниевая	84 Cu; 16 Si	800
Медно-оловянная	50 Cu; 50 Sn	780
Медно-никелевая	67–85 Cu; 15–33 Ni	1050–1080
Алюминиево-медноникелевая	50 Al; 40 Cu; 10 Ni	670

При расчете шихты учитывают угар элементов, который зависит от применяемых материалов, а также от типа печи. При плавке медных сплавов в качестве покровных материалов применяют древесный уголь и покровные флюсы (табл. 6.5).

Таблица 6.5

Покровные и рафинирующие флюсы для медных сплавов

№ п/п	Состав, % по массе	Назначение
1	41–47 SiO ₂ ; 25–32 MnO ₂ ; 10–15 Na ₂ O; 11–14 Al ₂ O ₃	Покровный для оловянных бронз (в печах с шамотной футеровкой)
2	50 SiO ₂ ; 30 Na ₂ B ₄ O ₇ ; 20 CaO	То же
3	10–30 SiO ₂ ; 90–70 Na ₃ B ₄ O ₇	То же (в печах с магнетитовой футеровкой)
4	7 Na ₂ B ₄ O ₇ ; 60 Na ₂ CO ₃ ; 33 CaF ₂	Рафинирующий для оловянных бронз
5	50 Na ₂ CO ₃ ; 50 – бой стекла	Покровный для алюминиевых бронз
6	30 SiO ₂ ; 30 Na ₂ CO ₃ ; 40 CaF ₂	Покровный для кремнистых и простых латуней
7	50 Na ₂ CO ₃ ; 50 CaF ₂	То же
8	50 CaF ₂ ; 50 MgF ₂	Покровно-рафинирующий для бронз и латуней
9	20 CaF ₂ ; 60 NaF; 20 Na ₃ AlF ₆	Рафинирующий для алюминиевых бронз
10	6 Na ₃ B ₄ O ₇ ; 70 Na ₂ CO ₃ ; 12 Na ₃ AlF ₆ ; 12 K ₂ CO ₃	То же

Приготовление лигатур можно производить в любой печи, однако предпочтительны индукционные печи, в которых обеспечиваются минимальные потери дорогостоящих цветных металлов и перемешивание расплава.

Плавка латуней может производиться в печах всех типов за исключением дуговых и вакуумных, в которых происходит повышенный угар цинка. Технология плавки состоит в следующем. Подготовленную шихту загружают в очищенную и разогретую печь. Если плавка производится из первичных компонентов шихты, то вначале загружают просушенный флюс, например буру, в количестве 0,25 % от массы металла, одновременно загружают чистую медь. После расплавления медь перегревают до 1130–1150 °С и производят раскисление фосфористой медью из расчета 0,3–0,4 % от массы металла. Сплав тщательно перемешивают и вводят по расчету меднокремниевую лигатуру (15–20 % Si), предварительно подогретую до 200–250 °С. Лигатуру вводят под шлак. Ошлакование кусков лигатуры не допускается, так как ошлакованная лигатура не растворяется в металле. После полного растворения лигатуры вводят подогретый цинк и затем свинец и тщательно перемешивают расплав графитовой мешалкой, доводят температуру металла до 1050–1100 °С и отбирают пробы. Готовность сплава оценивают по излому отлитых проб: если излом мелкозернистый, а на поверхности пробы отсутствуют ликвационные наплывы, значит, сплав качественный и можно приступить к разливке. Если обнаруживается высокая насыщенность сплава газами, то производят дегазацию, для чего применяют продувку азотом либо дегазацию перегревом.

Плавка двойных латуней особых трудностей не вызывает. В разогретой печи расплавляют загруженную медь, затем вводят цинкосо-держащие отходы и вторичную латунь. Сплав доводят до температуры 1000–1050 °С, перед заливкой вводят недостающее количество цинка. Так как цинк является отличным раскислителем, то медь после расплавления не раскисляют. Чтобы уменьшить угар цинка, плавку проводят под слоем покровного флюса.

Плавка многокомпонентных сложных латуней от указанной выше отличается лишь тем, что перед введением легирующих компонентов, например алюминия, проводят раскисление фосфористой медью. Для удаления неметаллических включений сплавы подвергают рафинированию хлористым марганцем или фильтрации через зернистые фильтры.

Плавка оловянных бронз производится на первичных материалах, возврате производства, и путем переплавки чушковой бронзы. В подготовленную разогретую печь загружают большую часть шихты и засыпают ее просушенным древесным углем. После расплавления

медь обязательно раскисляют фосфористой медью (9–10 % P) в количестве 0,2 % от массы, доводят расплав до температуры 1100–1150 °С, после чего поочередно вводят остальные составляющие шихты Zn, Sn, Pb, затем сплав нагревают до температуры 1100–1200 °С, рафинируют хлористым марганцем или азотом, модифицируют, например, комплексным модификатором 0,05 % Zn, 0,06 % В и 0,2 % Ti, отбирают технологические пробы и транспортируют на заливку.

При выплавке оловянных бронз, наряду с раскислением фосфористой медью, применяют раскисление цинком из расчета 500 г фосфористой меди и 500 г цинка на 100 кг сплава. Фосфористую медь вводят в два приема, вначале присаживают 250 г фосфористой меди и сплав перемешивают (если плавят на первичных материалах, то перед присадкой олова), затем присаживают цинк в количестве 500 г и перед выпуском сплава вводят оставшиеся 250 г фосфористой меди.

Плавка безоловянных бронз, например алюминиевых, чаще всего производится в дуговых либо индукционных печах на форсированном режиме. Реже используют топливные печи. Алюминиевые бронзы весьма чувствительны к перегреву и обладают высокой активностью к поглощению газов. В связи с этим плавку проводят в окислительной атмосфере под слоем флюса, избегая перегрева сплава выше 1200 °С. При плавке алюминиевой бронзы, легированной никелем, марганцем или железом, вначале расплавляют медь, производят раскисление фосфористой медью (0,05–0,1 %), а затем вводят алюминий или лигатуру Al–Cu. Алюминий необходимо вводить перед марганцем и железом, т. к. в противном случае образующиеся плены делают сплав непригодным для заливки. Сплав перегревают до 1150–1200 °С, рафинируют хлористым марганцем либо криолитом из расчета 0,1–0,3 % от массы расплава и вводят лигатуры, содержащие Mn, Ni и Fe.

Учитывая большую разницу в плотности вводимых компонентов меди и алюминия, что способствует зональной ликвации, необходимо расплав тщательно перемешивать. Плавку проводят под флюсом (табл. 6.5). Алюминиевые бронзы склонны образовывать плены, т. е. волокнистые неметаллические включения. Для удаления плен целесообразно производить фильтрацию сплава.

Определенные трудности вызывает плавка свинцовых бронз. Из-за высокой разницы в плотности входящих в сплав компонентов наблюдается высокая склонность этих сплавов к ликвации. Поэтому рекомендуется применять для плавки индукционные печи, в которых

осуществляется хорошее перемешивание расплава, легировать бронзы никелем до 2–2,5 % и производить заливку сплава в металлические формы, обеспечивающие высокую скорость кристаллизации сплава в отливках.

Плавка бериллиевых бронз подобна плавке оловянных бронз. Однако следует иметь в виду, что бериллий токсичен, поэтому требуются специальные меры предосторожности. Плавка производится в изолированных, хорошо оборудованных приточно-вытяжной вентиляцией помещениях.

Плавка кремнистых бронз так же подобна плавке оловянных бронз. Для предотвращения сплавов водородом не допускается перегрев расплава выше 1250–1300 °С. На заключительной стадии получения медных сплавов целесообразно применять модифицирование.

6.5.4. Модифицирование

Медные сплавы модифицируют тугоплавкими элементами Ti, V, Zr, В, Мо, W с помощью лигатур: Cu–В (3–4 % В), Cu–Ti, Al–V (до 50 %), Al–Ti в количествах 0,002–0,1 % от массы металла при 1200–1250 °С. Перегрев сплава не допускается, так как это ведет к укрупнению зерна. Следует иметь в виду, что модифицирующее действие указанных металлов равнозначно не для всех сплавов. Так, Ti, В и W не являются модификаторами для сплавов, не содержащих железа.

Литература

1. Башенко, В. В. Электроплавильные печи цветной металлургии / В. В. Башенко, А. В. Донской, И. М. Соломахин. – Москва : Металлургия, 1971. – 320 с.
2. Брокмайер, К. Индукционные плавильные печи : / К. Брокмайер ; под ред. М. А. Шевцава и М. Я. Столова ; пер. с нем. – Москва : Энергия, 1972. – 304 с. : ил.
3. Вайнберг, А. М. Индукционные плавильные печи : учеб. пособие для вузов / А. М. Вайнберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1967. – 416 с. : ил.
4. Индукционные печи для плавки чугуна / Б. П. Платонов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1976. – 176 с.
5. Леви, Л. И. Основы теории металлургических процессов и технология плавки литейных сплавов : учеб. для студентов вузов / Л. И. Леви, Л. М. Мариенбах. – Москва : Машиностроение, 1970. – 496 с.
6. Мариенбах, Л. М. Металлургические основы ваграночного процесса / Л. М. Мариенбах. – Москва : Машгиз, 1960. – 327 с.
7. Мариенбах, Л. М. Металлургические основы плавки чугуна в вагранке / Л. М. Мариенбах. – Москва : Машиностроение, 1957. – 80 с.
8. Смирягин, А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы : справочник / А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, А. В. Белова. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва : Металлургия, 1974. – 488 с. : ил.
9. Самохвалов, Г. В. Электрические печи черной металлургии / Г. В. Самохвалов, Г. И. Черныш. – Москва : Металлургия, 1984. – 232 с. : ил.
10. Справочник по обработке цветных металлов и сплавов / под ред. Л. Е. Миллера. – Москва : Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цв. металлургии, 1961. – 872 с. : ил.
11. Сухарчук, Ю. С. Плавка чугуна в вагранках / Ю. С. Сухарчук, А. К. Юдкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1967. – 416 с. : ил.
12. Тринкс, В. Промышленные печи / В. Тринкс, М. Г. Моугиней ; пер. с англ. Л. Г. Фридман ; под ред. В. Н. Григорьева. – Москва : Металлургия, 1966. – 510 с.
13. Фарбман, С. А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / С. А. Фарбман, И. Ф. Колобнев. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Металлургия, 1968. – 496 с.
14. Цыганов, В. А. Плавка цветных металлов в индукционных печах / В. А. Цыганов. – Москва : Металлургия, 1974. – 248 с. : 64 ил.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ПЛАВКИ	4
1.1. Основные понятия и определения	4
1.2. Классификация процессов плавки и методы их осуществления.....	7
1.3. Параметры процесса плавки.....	11
2. ПРОМЫШЛЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ	11
3. ПЛАВКА В ВАГРАНКАХ	12
3.1. Общая характеристика процесса плавки в вагранке	12
3.2. Схема ваграночного процесса	13
3.3. Образование ваграночного шлака и его влияние на свойства чугуна и стойкость футеровки.....	16
3.3.1. Образование ваграночного шлака	16
3.3.2. Физические свойства ваграночного шлака	17
3.3.3. Влияние состава ваграночного шлака на качество чугуна и стойкость футеровки	18
4. ПЛАВКА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ.....	20
4.1. Классификация и назначение индукционных плавильных печей... 20	
4.2. История развития индукционных тигельных печей	21
4.3. Индукционные тигельные печи	22
4.3.1. Назначение индукционных тигельных печей	22
4.3.2. Принцип действия индукционной тигельной печи	26
4.4. Физико-химические особенности процесса.....	27
4.5. Плавка в индукционной тигельной печи	29
4.6. Применение и технико-экономические показатели.....	31
5. ПЛАВКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ.....	33
5.1. История развития дуговых электрических печей	33
5.2. Физико-химические особенности процесса.....	35
5.2.1. Основной процесс	37
5.2.2. Кислый процесс.....	40
5.3. Применение и технико-экономические показатели.....	42
6. ПЛАВКА ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ	45
6.1. Классификация процессов плавки и их общая характеристика	45
6.2. Технологические схемы печей	46
6.3. Общая характеристика процесса плавки цветных сплавов.....	50
6.4. Плавка алюминиевых сплавов	52
6.4.1. Физико-химическая характеристика процесса	52
6.4.2. Рафинирование	53
6.4.3. Технология плавки.....	55
6.4.4. Модифицирование	58

6.5. Плавка медных сплавов	59
6.5.1. Физико-химическая характеристика процесса	59
6.5.2. Рафинирование	59
6.5.3. Технология плавки	60
6.5.4. Модифицирование	64
ЛИТЕРАТУРА	65

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Ткаченко Александр Владимирович
Юшкина Ольга Леонидовна

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАВКИ

Курс лекций
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-36 02 01
«Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения

Электронный аналог печатного издания

Редактор *В. В. Вороник*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 30.11.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 3,88.

Изд. № 164.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.