



УДК 669.187.58:620.192.47

## ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ

### Ч. 1. Классификация способов индукционной плавки металлов и сплавов, способы бестигельной плавки

И. В. Шейко, Г. М. Григоренко

Приведена классификация различных способов плавки металлов, основанных на индукционном нагреве. Рассмотрены технические характеристики бестигельных способов плавки, выполнен анализ их технологических возможностей.

Classification of different methods of metal melting, based on induction heating, is given. Technical characteristics of crucible-free methods of melting are considered and analysis of their technological capabilities is made.

**Ключевые слова:** индуктор; электромагнитное поле; металлическая ванна; слиток; секционный кристаллизатор; холодный тигель; кристаллизация металла

Индукционный нагрев широко применяется в различных процессах, в том числе и при плавке различных металлов и сплавов, что обусловлено комплексом следующих технологических свойств, присутствующих индукционному источнику нагрева [1–6]:

высокая стерильность источника тепловой энергии, поскольку он не оказывает негативного влияния на свойства нагреваемого материала;

интенсивное перемешивание расплава во время плавки обеспечивает выравнивание температуры и химического состава в объеме ванны;

отсутствие локального перегрева, в результате чего обеспечивается небольшой угар легирующих элементов;

отсутствие жесткой связи между подводимой мощностью и скоростью плавки;

возможность выдерживать металлический расплав в жидком состоянии неограниченное время;

простота регулирования и поддержания температуры расплава в заданном диапазоне;

высокая степень надежности в работе и хорошая адаптация в системе автоматизации технологического оборудования, используемого в процессах индукционного нагрева;

отсутствие необходимости в создании каких-либо специальных условий для его работы и поэтому технологические процессы можно вести в газовой среде любого состава и давления, в том числе и в вакууме.



Рис. 1. Классификация процессов и установок, использующих индукционный нагрев

© И. В. ШЕЙКО, Г. М. ГРИГОРЕНКО, 2003



Отмеченные особенности и технологические достоинства индукционных источников нагрева обуславливают непрерывное расширение сферы их применения в различных отраслях промышленности. В зависимости от назначения процесса, вида обрабатываемого материала или изделия и конечного продукта все технологические процессы, основанные на индукционном нагреве, можно классифицировать следующим образом (рис. 1).

Традиционными областями применения индукционного нагрева являются термообработка (закалка, отпуск, нормализация), нагрев заготовок перед обработкой давлением (прессование, штамповка, гибка) и при механической обработке и резке (фрезерование, токарные работы и резка) [4, 5, 7–10]. При этом значения температуры нагрева для этих процессов могут колебаться от 700 до 1500 К. В ряде случаев некоторые процессы, например деформация и термообработка, могут совмещаться. Индукционный нагрев при этом позволяет стабилизировать и оптимизировать температурный режим процесса, повысить производительность механического оборудования, сократить отходы металла.

Чрезвычайно широкое распространение индукционный нагрев получил в области сварки, пайки и нанесения защитных покрытий на листовой прокат [7, 11–15]. Достоинства сварки, основанной на высокочастотном нагреве металла в сварочной зоне, заключаются в высокой производительности процесса, достигающей 100 м сварного шва в минуту; универсальности процесса, поскольку он позволяет сваривать практически любые металлы без применения защитных сред; высоком качестве соединения благодаря локализации тепловой энергии в узкой зоне свариваемых кромок. В отдельных случаях, например при сварке оболочек кабелей, высокочастотный нагрев является единственно возможным.

Применение индукционного нагрева в процессах пайки позволяет решить одну из основных задач — получить однородные температуры соединяемых тел и припоя в зоне пайки. При однотипности изделий и массовом производстве процесс пайки может быть автоматизирован.

Индукционные источники нагрева успешно применяются в процессах высокотемпературного плазмохимического синтеза химических соединений металлов с другими элементами, получения ультрачистых материалов и сфероидизации металлических и керамических порошков с применением высокочастотной плазмы [16–19].

Широкое применение индукционного нагрева для плавки металлов и сплавов объясняется его специфическим отличием от других способов. Оно заключается в том, что тепло, необходимое для нагрева, выделяется непосредственно в самом материале. Причем выделение тепла в нагреваемом теле можно организовать, в зависимости от решаемых задач, с любой стороны: снизу, сбоку или сверху.

Благодаря тому, что жидкий металл, находящийся в переменном электромагнитном поле индук-

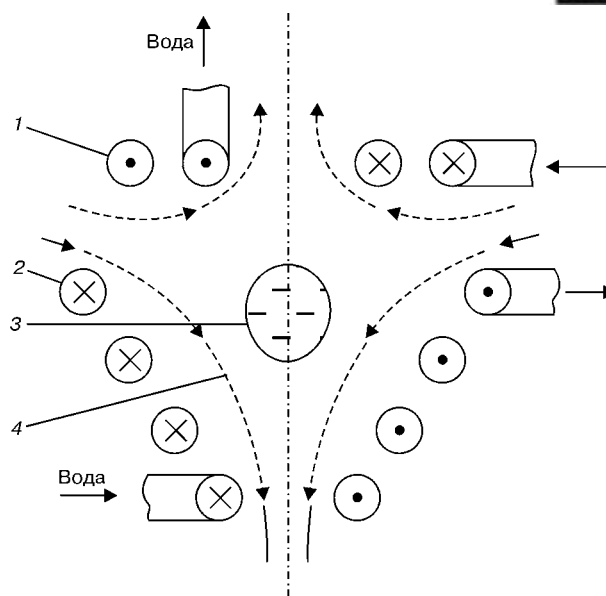


Рис. 2. Схема индукционной плавки во взвешенном состоянии: 1 и 2 — соответственно верхняя и нижняя секции индуктора; 3 — расплавленная навеска металла; 4 — силовые линии электромагнитного поля; X и ● — направления тока в витках индуктора

тора непрерывно перемешивается под воздействием электромагнитных сил, представляется возможным при разработке технологического процесса создавать благоприятный гидродинамический режим, выбирая необходимую частоту тока и конструкцию нагревателя (индуктора).

Процессы плавки и обработки жидкого металла с использованием индукционного нагрева можно разделить на три основные группы:

тепловая энергия выделяется в нагреваемом материале, и металлический расплав не соприкасается с материалом тигля;

металлический расплав во время всего цикла нагрева контактирует с огнеупорным материалом, и тепловая энергия выделяется непосредственно в расплаве или шихте;

тепловая энергия выделяется в сосуде (тигле), выполненном из электропроводного материала, удельное электрическое сопротивление и температура плавления которого значительно выше, чем у переплавляемого материала. При этом нагрев и плавление шихты, а также перегрев металлического расплава происходят благодаря теплоотдаче более нагретой стенки тигля.

В зависимости от вида и материала применяемых тиглей и способа подвода тепла к расплаву многообразие технологических способов индукционной плавки и соответствующее плавильное оборудование можно классифицировать следующим образом.

В настоящее время процессы и устройства, позволяющие плавить металлы без контакта расплава с огнеупорными материалами, составляют отдельную группу способов индукционной плавки [5, 20–29]. К ним относятся такие виды плавки: во взвешенном состоянии; бестигельная зонная; с электромагнитным удержанием расплава на опоре; гарнисажная; в холодных тиглях.

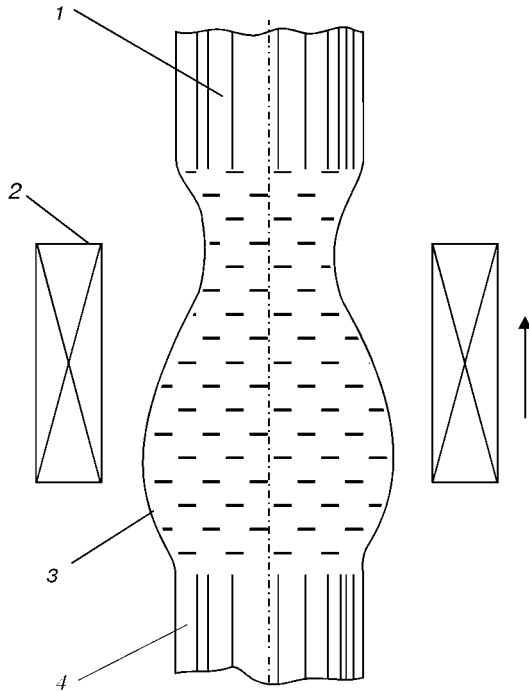


Рис. 3. Схема бестигельной зонной плавки: 1 — обрабатываемый цилиндрический стержень; 2 — индуктор; 3 — расплавленная зона; 4 — переплавленный металл

Способ индукционной плавки во взвешенном состоянии в настоящее время хорошо разработан и находит широкое применение при проведении физико-химических исследований [20–22, 30–35]. Суть его заключается в следующем. При помощи одного индуктора или системы индукторов создают электромагнитное поле с так называемой потенциальной ямой, т. е. поле, внутри которого располагается зона с низкой напряженностью (рис. 2). Помещенная в эту зону навеска металла устойчиво висит, если силы гравитации уравновешиваются равнодействующей силой, создаваемой полем нижнего индуктора. В навеске металла происходит индуктирование токов, вызывающих нагрев и последующее расплавление. Пространственное положение взвешенной капли металла хорошо стабилизируется в индуктирующей системе из двух коаксиальных секций индукторов, соосно расположенных одна над другой. При этом направления токов в секциях должны быть противоположны.

При изменении мощности, подводимой к индуктору, изменяется не только напряженность электромагнитного поля, но и его конфигурация, что в свою очередь приводит к изменению пространственного положения расплавленного металла в индукторе. В установившемся режиме мощность, выделяемая в расплаве, равна мощности, теряемой поверхностью металла за счет излучения и конвекции.

Принцип бестигельной зонной плавки основан на способности расплавленной зоны перераспределять примеси между жидкой и твердой фазами [23–25, 36]. Эффективность этого процесса определяется многими факторами, включая конструктивные особенности установки, способ нагрева зоны, охлаждение, а также характеристики обрабатываемого вещества. Важнейшей характеристикой

материала является эффективный коэффициент распределения примесей  $K$ , который представляет собой отношение концентрации примеси в затвердевшей фазе  $C_{ТВ}$  к концентрации ее в жидкой фазе  $C_{Ж}$ , т. е.  $K = C_{ТВ}/C_{Ж}$  [23–25]. Коэффициент распределения  $K$  может быть больше и меньше единицы в зависимости от того, как примесь влияет на температуру плавления растворителя (матрицы). Если примесь способствует повышению температуры плавления растворителя, то ее концентрация в затвердевшей фазе будет больше, чем в жидкой ( $K > 1$ ), и наоборот, т. е.  $K < 1$ .

Схема процесса вертикальной зонной плавки представлена на рис. 3. Суть этого способа плавки заключается в том, что в цилиндрическом стержне 1 при помощи индуктора 2 проплавляют зону 3, металл которой удерживается силами поверхностного натяжения и электромагнитными силами переменного поля. Зону медленно передвигают вдоль стержня. При этом примеси перемещаются вместе с расплавленной зоной и таким образом отесняются на конец стержня.

Процесс можно вести в вакууме или газовой атмосфере заданного состава. За несколько проходов вдоль стержня получают слиток с чрезвычайно низким содержанием примесей. Степень очистки зависит от количества проходов. Зонную бестигельную плавку можно использовать не только для очистки переплавляемого вещества от вредных примесей и их равномерного распределения по сечению и длине стержня. Зонная плавка позволяет вводить требуемое количество примеси в материал и практически полностью устранять сегрегацию примесей в обрабатываемом материале.

Современная техника зонной плавки и прогрессивные технологии дают возможность получать материалы с содержанием примесей в несколько десятков атомов на миллионы матричных атомов. Диаметр выплавляемых слитков колеблется от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров.

Процесс зонной плавки в большинстве случаев совмещают с получением заданной кристаллической структуры в слитке, в том числе и монокристаллической.

Плавка с электромагнитным удержанием расплава на опоре характеризуется наиболее полным использованием свойств электромагнитного поля. Нагрев и плавление обрабатываемого материала здесь совмещаются с удержанием расплава силами взаимодействия, возникающими между индуцированными токами в материале и переменным магнитным полем индуктора [5, 26, 28, 29, 37, 38].

С учетом электромагнитного удержания расплава на опоре разработаны два способа получения слитков: полунепрерывная отливка в так называемый магнитный кристаллизатор (рис. 4, а) [38] и выращивание монокристаллов по способу Чохральского (рис. 4, б) [28, 37].



В зависимости от характера технологического процесса в качестве опоры для расплава может служить кристаллизирующийся слиток, переплавляемая монолитная заготовка или шихта, гарнисаж или водоохлаждаемый поддон.

При отливке слитков жидкий металл из плавильной печи поступает на поддон 4, установленный в зоне индуктора 2. Таким образом, на поддоне наводится металлическая ванна 1. Ванна жидкого металла обжимается и удерживается на поддоне электромагнитным полем, создаваемым переменным током, протекающим в индукторе 2. По мере увеличения объема металлической ванны поддон 4 медленно опускают вниз, а на боковую поверхность кристаллизирующегося слитка 3 через отверстия в индукторе подается охлаждающая вода.

Литье с формированием боковой поверхности слитка в электромагнитном поле позволяет полностью исключить механическое взаимодействие между слитком и стенкой кристаллизатора, что обеспечивает высокое качество поверхности. Полученные слитки не имеют поверхностных дефектов (трещины, наплывы, неслитины и пр.) и не нуждаются в механической обдирке перед деформированием [38].

По своим техническим возможностям, включая чистоту выплавленного металла, индукционная плавка на опоре близка к плавке во взвешенном состоянии. В то же время наличие опоры под расплавом позволяет удерживать достаточно большие массы жидкого металла. Указанная особенность процесса получила развитие при выращивании монокристаллов (рис. 4, б). Электромагнитное поле, создаваемое индуктором 2, используется для расплавления вершины слитка (расходуемой заготовки) 3 и формирования в этой зоне металлической ванны 1. При помощи монокристаллической затравки (на рисунке не показана), которую в начале процесса приводят в соприкосновение с вершиной ванны, производится «вытягивание» монокристалла 7 из ванны. Для усреднения температурных полей монокристалла в зоне контакта с металлическим расплавом монокристалл вращают вокруг продольной оси. Этот способ широко применяется для получения монокристаллов из полупроводниковых материалов, а также монокристаллов многих высокорекреционных металлов.

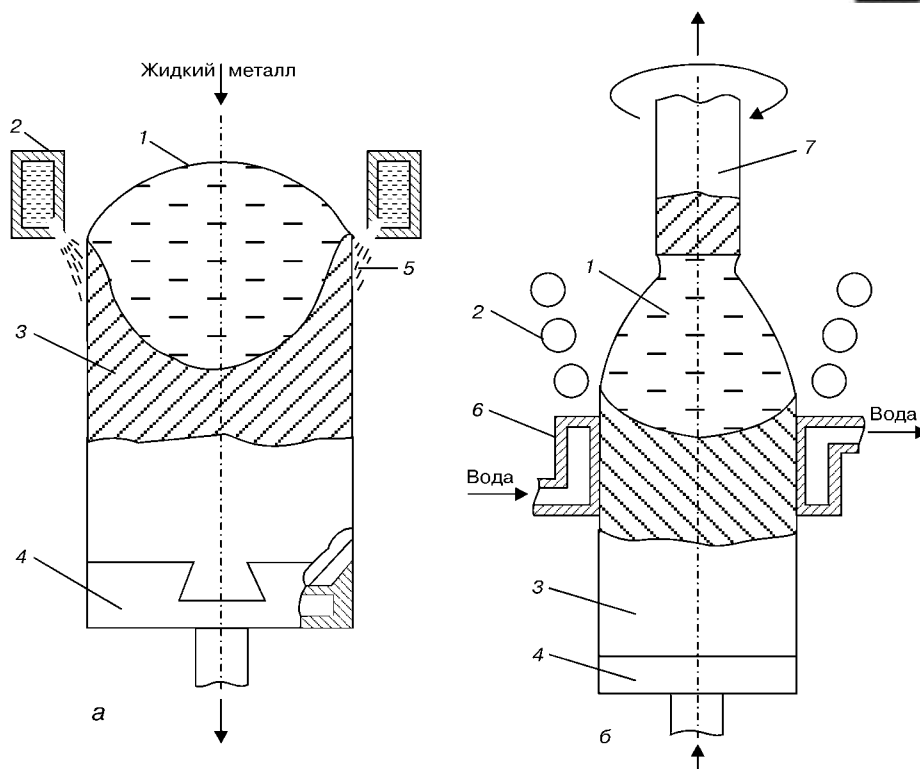


Рис. 4. Схемы процессов с электромагнитным удержанием расплава на опоре: а — отливка слитков в электромагнитном кристаллизаторе; б — выращивание монокристаллов; 1 — металлическая ванна; 2 — индуктор; 3 — слиток; 4 — поддон; 5 — струи воды; 6 — кристаллизатор; 7 — монокристалл

Особенностью любой гарнисажной плавки является то, что переплавляемый металл соприкасается с твердым металлом того же химического состава, что и расплав. При этом твердый металл отделяет расплав от его контакта с элементами конструкции печи и таким образом защищает от загрязнения [39, 40]. В качестве источников тепловой энергии могут применяться как высококонцентрированные (электрическая дуга, дуговая плазма и электронный луч), так и источники с рассредоточенным нагревом (индукционный) [27, 41].

Используют две схемы индукционной гарнисажной плавки, отличающиеся способом подведения энергии к металлу: через открытое зеркало ванны или сбоку через гарнисаж (рис. 5). Первая схема (рис. 5, а) не отличается от других способов гарнисажной плавки, где используются высококонцентрированные источники тепловой энергии. Главное ее достоинство — отсутствие электрических потерь в гарнисаже при подводе тепловой энергии к ванне. Однако она характеризуется плохой электромагнитной связью, в результате чего электрический КПД системы торцевой индуктор-загрузка является чрезвычайно низким. И из-за этого схема с верхним подводом энергии не находит практического применения.

Вторая схема индукционной гарнисажной плавки с боковым подводом энергии считается предпочтительнее с энергетической точки зрения (рис. 5, б). Электрический КПД системы цилиндрической индуктор-загрузка значительно выше, чем при верхнем подводе энергии. Боковой гарнисаж создается

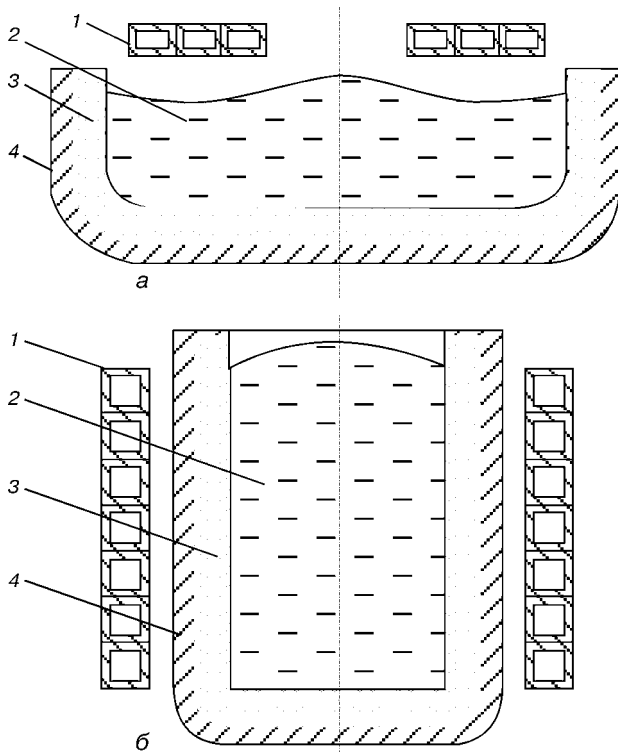


Рис. 5. Схемы индукционной гарнисажной плавки: *а, б* — соответственно верхний и боковой подводы энергии к металлу; 1 — индуктор; 2 — металлический расплав; 3 — гарнисаж; 4 — охлаждаемая поверхность гарнисажа

из порошка металла, который переплавляется. Мелкодисперсные частицы порошка «прозрачны» для электромагнитного поля и поэтому температура их нагрева значительно ниже температуры плавления. В процессе плавки происходит спекание порошка с образованием корочки, в которой располагается расплав. При этом часть вводимой энергии теряется в гарнисаже.

Несмотря на то, что этот способ был предложен более 40 лет назад и уже выполнен большой объем теоретических и лабораторных исследований, в литературе отсутствуют сведения о его практическом применении.

В работах [25, 42–47] описаны две технологические схемы индукционной плавки металлов в холодных тиглях, отличающиеся местом подвода энергии электромагнитного поля в металлический расплав:

верхним, через открытое зеркало металлической ванны с помощью торцевого индуктора (рис. 6, *а*);

боковым, через стенку тигля с помощью цилиндрического индуктора (рис. 6, *б*).

Переплавляемая шихта помещается в холодный тигель 2, выполненный в виде глухонного водохлаждаемого сосуда. Подвод и сброс охлаждающей воды из холодного тигля 2 производится через полый шток (рис. 6, *а*). Соосно над холодным тиглем установлен торцевой индуктор 3, выполненный в виде кольца (одновитковый) или спирали Архимеда (многовитковый). Стрелками показано направление передачи энергии в металлический расплав и отвод ее от расплава.

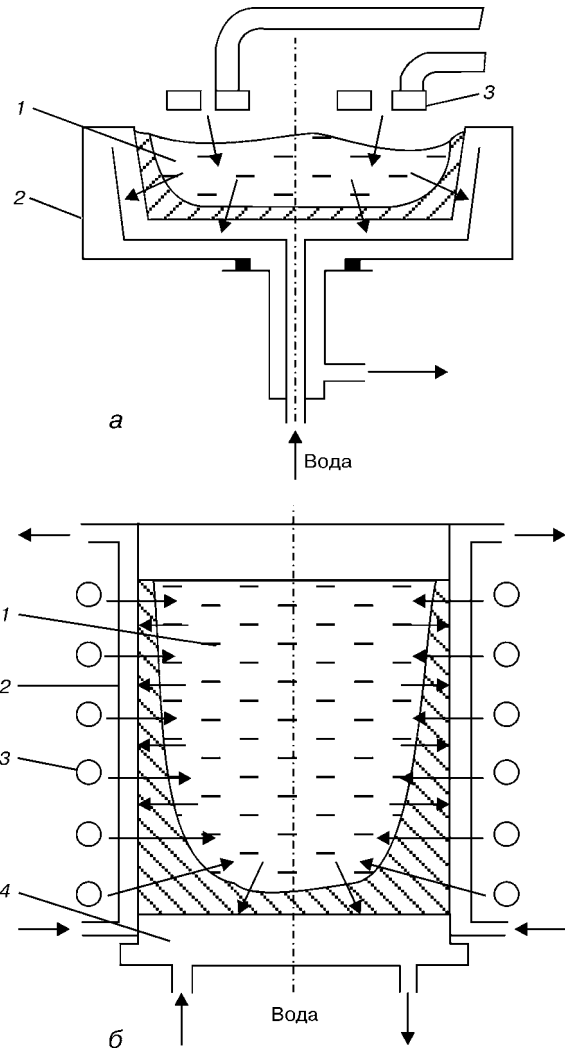


Рис. 6. Схемы индукционной плавки в холодном тигле: *а, б* — подвод энергии соответственно через открытое зеркало металлической ванны и через стенку холодного тигля; 1 — металлическая ванна; 2 — холодный тигель; 3 — индуктор; 4 — поддон

При такой схеме подвода энергии к переплавляемой шихте (расплаву), повторяющей принцип, основанный на применении высококонцентрированных источников тепловой энергии (электрическая дуга, низкотемпературная плазма или направленный поток электронов), индукционный нагрев малоэффективен, поскольку торцевой индуктор имеет слабую электромагнитную связь с расплавом в тигле. Поэтому выделяющаяся в расплаве тепловая энергия не обеспечивает наведение ванны достаточного объема, а также необходимого перегрева расплава. К тому же пары металлов, которые конденсируются на индукторе, могут вызывать электрические пробой между витками индуктора [26, 27]. Рассмотренная схема индукционной плавки в силу указанных выше причин не нашла практического применения.

Более перспективной и менее энергоемкой является индукционная плавка в холодном тигле с вводом энергии в металлическую ванну через ее боковую поверхность (рис. 6, *б*). Металлическая ванна 1 находится в холодном тигле 2, цилиндри-



ческая стенка которого выполнена из отдельных охлаждаемых секций электрически изолированных друг от друга, и «прозрачна» для электромагнитного поля, создаваемого высокочастотным током, протекающим в индукторе  $\mathcal{Z}$ . Индуктор выполнен в виде цилиндрической спирали и в него помещен холодный тигель.

Плавка в холодном типе отличается от обычной тигельной индукционной условиями передачи энергии от индуктора к расплаву, поскольку между индуктором и металлическим расплавом находится стенка холодного тигля, искажающая электромагнитное поле, создаваемое током в индукторе.

Сплошная металлическая стенка обычного охлаждаемого тигля является экраном для высокочастотного электромагнитного поля, создаваемого индуктором, поскольку вихревые токи, индуцируемые в стенке тигля, образуют замкнутую электрическую цепь по наружной поверхности его стенки. Стенка холодного тигля, выполненная из отдельных электрически изолированных охлаждаемых секций, представляет собой вторичную обмотку трансформатора. Благодаря этому происходит передача энергии электромагнитного поля от индуктора к расплаву в холодном тигле [43–45].

Несмотря на то, что часть энергии электромагнитного поля теряется в охлаждаемой стенке тигля, весьма высокое значение коэффициента мощности цилиндрического индуктора (по сравнению с торцевым) обеспечивает выделение тепловой энергии в шихте, достаточной для ее расплавления и последующего перегрева металлического расплава. Равномерный боковой нагрев и интенсивное перемешивание расплава в электромагнитном поле позволяет получить ванну с однородным химическим составом и температурой.

При индукционной плавке в холодном тигле его геометрические параметры близки к таковым тиглей из огнеупорных материалов, применяемых в обычных индукционных печах, т. е. высота тигля и индуктора в несколько раз превышает диаметр тигля. Поэтому для индукционной плавки в холодном тигле характерна большая глубина металлической ванны. По высоте металлического расплава, находящегося в холодном тигле, можно выделить три характерные зоны (рис. 7) [25]. Верхняя *I* — зона полного отжигания расплава от стенки холодного тигля, средняя *II* — зона частичного (щелевого) отжигания расплава от стенки тигля и нижняя *III* — зона полного контакта расплава со стенкой холодного тигля.

Существенным недостатком печей с холодным тиглем является то, что при сливе металла значительная часть его намораживается на стенку тигля и сливной носок. Количество слитого металла не превышает 60... 65 % [43–46]. Кроме того, отлитые в изложницу слитки имеют пороки усадочного происхождения и развитую ликвацию легирующих элементов, что характерно для обычных способов литья. Несмотря на то, что многие аспекты процесса индукционной плавки в холодных тиглях достаточ-

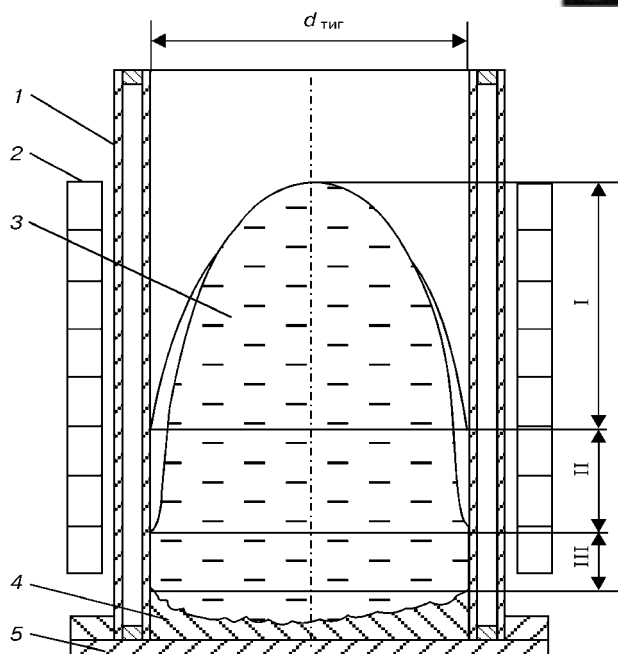


Рис. 7. Схема металлической ванны при плавке в холодном тигле: *I* — зона полного отжигания расплава от стенки тигля; *II* — зона щелевого отжигания расплава; *III* — зона полного контакта расплава со стенкой тигля; 1 — холодный тигель; 2 — индуктор; 3 — металлическая ванна; 4 — гарнисаж; 5 — днище

но хорошо проработаны как в теоретическом, так и в конструкторском направлении (вопросы электрических параметров и энергетики процесса в целом, конструкции холодных тиглей и т. д.), практическое применение его для изготовления отливок или слитков не получило развития.

Индукционные установки с холодным тиглем используются в технологических процессах, не связанных с разливкой металла. Одним из них является металлургическое восстановление, весьма широко применяемое при получении металлов, характеризующихся высокой реакционной способностью в жидком состоянии, например цирконий, ванадий и др. [44, 47]. Процессы металлургического восстановления осуществляют в специальных реакторах или термических установках. В качестве таких агрегатов могут использоваться и индукционные установки с охлаждаемым секционным кристаллизатором. Они дают возможность дополнительно к теплу химических реакций, которое выделяется в реакционной массе, осуществлять ввод тепловой энергии электромагнитного поля. Это способствует более равномерному прогреву реакционной массы и лучшему разделению в жидком состоянии образующихся металла и шлака.

В работе [44] описаны конструкция и технические характеристики промышленной индукционной установки «Импульс» с холодным тиглем, предназначенной для получения таких металлов, как ванадий, цирконий и др. Установка состоит из четырех плавильных модулей, объединенных общей вакуумной системой, и одного комплекта высокочастотного электрооборудования (рис. 8). Каждый из плавильных модулей содержит герметичную плавильную камеру, внутри которой установлен секционный ох-

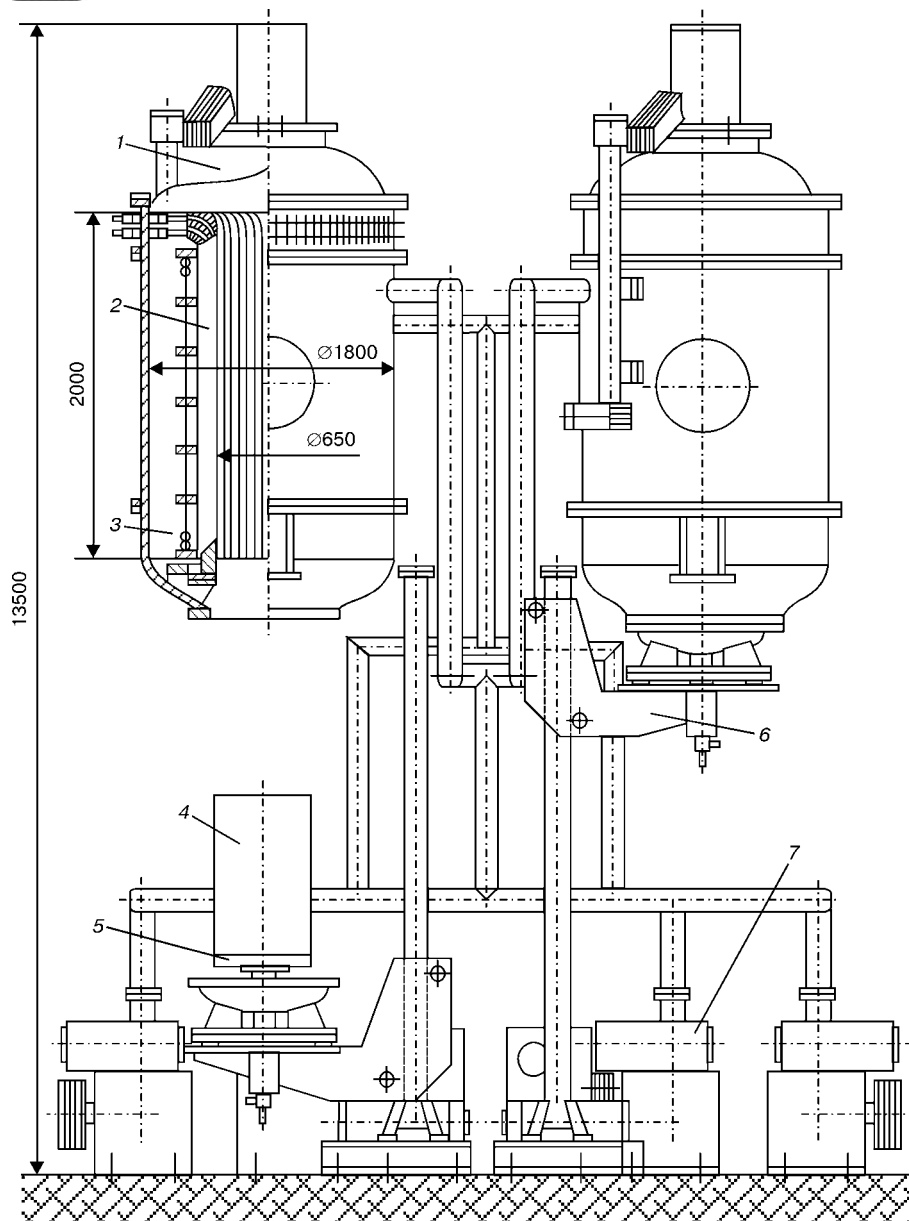


Рис. 8. Схема индукционной установки «Импульс» для металлургического восстановления: 1 — плавильная камера (реактор); 2 — холодный тигель; 3 — индуктор; 4 — слиток металла; 5 — поддон; 6 — механизм извлечения слитка; 7 — вакуумная система

лаждаемый тигель (диаметр 0,65 м, высота 2,0 м) с индуктором, а также механизм выгрузки слитка.

Процессы загрузки, плавки, охлаждения продуктов реакции и выгрузки их из плавильной камеры осуществляются в каждом плавильном модуле последовательно, со смещением во времени относительно других модулей.

Тигель представляет собой цилиндрическую металлическую охлаждаемую конструкцию, собранную из электрически изолированных друг от друга секций (50 медных секций трапециевидной формы с каналами для протока охлаждающей воды).

Установка «Импульс» оснащена четырьмя машинными преобразователями частоты суммарной мощностью 2000 кВт. Рабочая частота тока, подводимого к индуктору, составляет 2,4 кГц.

При разогреве реакционной массы электромагнитным полем достигается температура, достаточная для инициирования химической реакции в загруженной массе. В результате протекания окислительно-восстановительной реакции образуются металл и шлак. Ввиду большой разницы в плотности металл и шлак хорошо разделяются. На поддоне формируется металлический слиток, над которым располагается шлаковая ванна. После завершения восстановительного процесса и остывания слитка последний извлекают из плавильной камеры при помощи механизма вытягивания.

Продолжительность цикла на каждом плавильном модуле может составлять от 2,0 до 3,5 ч с учетом времени остывания слитка.

Полученный таким образом металлический слиток содержит повышенное количество газовых примесей, неметаллических включений, а также техногенных примесей (повышенное содержание металла восстановителя). Поэтому эти слитки подвергают рафинирующему переплаву в печах вакуумно-дугового или электронно-лучевого перепада.

Итак, анализируя схемы процессов индукционной бесстигельной плавки, их технические характеристики, особенности и возможности, можно сделать вывод о том, что

промышленное применение плавки во взвешенном состоянии вряд ли возможно в обозримом будущем.

Индукционная плавка во взвешенном состоянии сегодня является незаменимым и, пожалуй, единственным современным способом физико-химических исследований металлических расплавов.

Зонная плавка и плавка с электромагнитным удержанием расплава на опоре уже нашли применение в промышленности при производстве особо чистых металлов.

Что касается индукционной плавки в холодном тигле, то следует отметить, что несмотря на применение в промышленных масштабах этот процесс нуждается в серьезных преобразованиях технологий и плавильного оборудования для повышения его технико-экономических показателей.



1. *Вайнберг А. М.* Индукционные плавильные печи. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 450 с.
2. *Брокмайер К.* Индукционные плавильные печи. — М.: Энергия, 1972. — 304 с.
3. *Простяков А. А.* Индукционные печи и миксеры для плавки чугуна. — М.: Энергия, 1977. — 216 с.
4. *Баташ Г. И.* Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. — М.; Л.: Энергия, 1965. — 552 с.
5. *Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Балунер.* — Л.: Энергоиздат, 1981. — 328 с.
6. *Глуханов Н. П.* Физические основы высокочастотного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1979. — Вып. 1. — 60 с.
7. *Шамов А. Н., Бодажков В. А.* Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. — Л.: Машиностроение, 1974. — 263 с.
8. *Головнева М. А., Атрошенко А. П.* Оборудование и технология горячей штамповки. Учебник для машиностроительных техникумов. — М.; Л.: Машгиз, 1962. — 368 с.
9. *Простяков А. А.* Индукционные нагревательные установки. — М.: Энергия, 1970. — 119 с.
10. *Рыскан С. Е., Смирнов В. М., Благоевский Г. В.* Оборудование индукционной термообработки. — М.; Л.: Машиностроение, 1966. — 158 с.
11. *Установка для высокочастотной сварки спирально-шовных труб / Ю. Н. Скачко, Н. В. Попов, В. Ф. Мошкин и др.* // Автомат. сварка. — 1976. — № 11. — С. 72-73.
12. *Письменный А. С.* Новое в применении индукционного нагрева в сварке и родственных технологиях // Там же. — 1998. — № 11. — С. 54-60.
13. *Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С.* Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов // Там же. — 1983. — № 9. — С. 25-27.
14. *Шамов А. Н., Лукин И. В., Иванов В. Н.* Высокочастотная сварка металлов. — Л.: Машиностроение, 1977. — 200 с.
15. *Вологдин В. В., Куц Э. В.* Индукционная пайка (Библиотека высокочастотника-термиста. Вып. 7). — Л.: Машиностроение, 1979. — 78 с.
16. *Reboix J.* Les plasmas induction: un outil exceptionnel pour une metallurgie de qualite // J. fr. electroterm. — 1985. — № 5. — Р. 29.
17. *Лакомский В. И., Мельник Г. А.* Сфероидизация в высокочастотном разряде порошка окиси алюминия // Порошк. металлург. — 1966. — № 2. — С. 6-8.
18. *Арсеньев П. А., Кустов Е. Ф.* Исследование высокочастотного газового разряда высокого давления // Теплофизика высоких температур. — 1966. — 4, № 2. — С. 166-170.
19. *Процесс получения пигментной двуокиси титана в высокочастотном разряде кислородной плазмы / И. В. Антипов, А. Б. Гугняк, С. Н. Дмитриев // Физ. и хим. обраб. материалов. — 1968. — № 4. — С. 146-149.*
20. *Лакомский В. И.* Методика изучения растворимости водорода в жидких металлах в широком температурном интервале // Газы в литом металле. — М.: Наука, 1964. — С. 254-259.
21. *Фогель А. А.* Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии // Под ред. Шамова А. Н. — Л.: Машиностроение, 1979. — 104 с.
22. *Фогель А. А., Коркин И. В.* Плавка металлов во взвешенном состоянии при электроннолучевом нагреве // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. — 1968. — № 2. — С. 138-145.
23. *Ратников Д. Г.* Бестигельная зонная плавка. — М.: Металлургия, 1976. — 224 с.
24. *Вигдорович В. Н., Вольян А. Е., Курдюмов Т. М.* Применение зонной перекристаллизации для физико-химического анализа // Завод. лаб. — 1969. — № 11. — С. 1350-1356.
25. *Тур Л. Л., Фомин Н. И.* Современные методы индукционной плавки // Библиотека электротермиста. Вып. 59. — М.: Энергия, 1975. — 110 с.
26. *Бындин В. М., Добровольская В. И., Ратников Д. Т.* Индукционный нагрев при производстве обочистых металлов / Под ред. А. Н. Шамова. — Л.: Машиностроение, 1980. — 65 с.
27. *Коган М. Г.* Индукционная плавка в гарнисаже // Теплофизика высоких температур. — 1967. — 5, № 3. — С. 485-491.
28. *Губченко А. П.* Плавка и кристаллизация расплава в электромагнитном поле на опоре // Магнитная гидродинамика. — 1986. — № 1. — С. 132-133.
29. *Фомин Н. И., Тур Л. Л.* Обеспечение заданной конфигурации расплава, удерживаемого магнитным полем // Материалы 7-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике (Рига, март 1963). Т. III. — Рига: Зинатие, 1963. — 327 с.
30. *Температурная зависимость растворимости в жидких сплавах железо-марганец / Г. М. Григоренко, Ю. М. Помарин, В. И. Лакомский и др.* // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. — 1974. — № 6. — С. 11-16.
31. *Влияние хрома и никеля на растворимость азота в сплавах железа при высоких температурах / В. И. Лакомский, Г. М. Григоренко, Г. Ф. Торхов, Ю. М. Помарин // Взаимодействие азота с металлами. — М.: Наука, 1973. — С. 125-135.*
32. *Исследование растворимости азота при повышенном давлении в низкоуглеродистой нержавеющей стали ОЗХ25Н5АМЗ / Ю. М. Помарин, И. В. Шейко, Г. М. Григоренко, С. А. Каниболочки // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 14. — С. 84-88.*
33. *Федорченко В. Н., Аверин А. В.* Изучение растворимости и кинетики растворения азота в расплавах железо-кислород и железо-сера методом бестигельной плавки // Взаимодействие металлов и газов в сталеплавильных процессах. — М.: МИСиС, 1973. — С. 26-29.
34. *Шимайо И., Такаки Т.* Исследование кинетики реакции между жидким железом и азотом методом плавки во взвешенном состоянии // Физико-химические основы металлургических процессов. — М.: Наука, 1972. — С. 169-178.
35. *Wada H., Gundi K., Wada T.* Solubility of Nitrogen and interaction with Oxygen in Liquid Iron // Trans. Iron and Steel Inst. Jap. — 1968. — 8, № 5. — P. 323-328.
36. *Недзвецкий Ю. Э.* Способы увеличения сечения стержня при бестигельной зонной плавке // Промышленное применение токов высокой частоты. — М.: Машгиз, 1961. — С. 118-123.
37. *Артышевский П. П., Кравецкий Д. Я., Затуловский Л. М.* Исследование процесса выращивания профилированных кристаллов кремния с пьедестала // Изв. АН СССР. Сер. физическая. — 1971. — 35, № 3. — С. 469-472.
38. *Ливанов В. А., Габидуллин Р. М., Шипалов В. С.* Непрерывное литье алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1977. — 168 с.
39. *Неуструев А. А., Ходоровский Г. А.* Вакуумные гарнисажные печи. — М.: Металлургия, 1967. — 235 с.
40. *Волохонский Л. А.* Теплофизические процессы и энергетический баланс при плавке в гарнисаже. — М.: ВНИИЭМ, 1966. — 56 с.
41. *А. с. СССР 113211, МПК С21с 5/56.* Индукционный метод плавки химически активных металлов в тигле из того же металла / Н. П. Глуханов, Р. П. Жежерин, М. А. Меликов, А. А. Фогель // Открытия. Изобретения. — 1958. — № 5. — 18 с.
42. *Фомин Н. И., Тур Л. Л., Вертман А. А.* Использование индукционных плавильных устройств с холодными тиглями и электромагнитным обжатием расплава для высокотемпературных физико-химических исследований // Электротермия. — 1971. — Вып. 10. — С. 20-22.
43. *Петров Ю. Б., Ратников Д. Г.* Холодные тигли. — М.: Металлургия, 1972. — 112 с.
44. *Тур Л. Л., Губченко А. П.* Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. — М.: Энергоиздат, 1988. — 120 с.
45. *Кудрявцев Ю. Н.* Индукционные тигельные печи для плавки и литья титановых сплавов // Титан. — 1993. — № 1. — С. 39-42.
46. *Донской А. В., Ратников Д. Г.* Об использовании охлаждаемых тиглей в индукционных печах // Электротермия. — 1993. — Вып. 3. — С. 3-6.
47. *Качур Л. И., Губченко А. П.* Особенности плавки и получения гомогенных сплавов в индукционной печи с холодным тиглем // Цв. мет. — 1978. — № 3. — С. 67-69.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 11.03.2003