

ЛИСТОК СТРОКІВ ПОВЕРНЕННЯ

Книга повинна бути повернута
не пізніше зазначеного тут строку.
Кількість попередніх видач

393		
19/11		
9/11-92-219		
22/11-04-150		
31/04-02-205		
15.09.2000		-1047

Киево-Святош. друк. Арт. КО-087-5,
Ціна 1 т. прим. 0-80 коп.

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОТЕРМИСТА

Выпуск 59

Л. Л. ТИР,
Н. И. ФОМИН

СОВРЕМЕННЫЕ
МЕТОДЫ
ИНДУКЦИОННОЙ
ПЛАВКИ

ПРОВЕРЕНО



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1975

613
012.1.081

Т 44

УДК 621.365.5:621.745

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л. Е. Никольский, С. П. Розанов, Ю. Л. Рыжнев, А. Д. Свенчанский, М. А. Шевцов, К. З. Шепеляковский, Ф. И. Шуманский

Тир Л. Л. и Фомин Н. И.

Т 44 Современные методы индукционной плавки. М., «Энергия», 1975.

112 с. с ил. (Б-ка электротермиста. Вып. 59).

Книга посвящена современным методам индукционной плавки. Рассматриваются современный уровень и тенденции развития печей с футерованной ванной (тигельных и канальных). Описываются методы плавки без соприкосновения с футеровкой (гарниссажная, в холодных тиглях и др.), а также применение индукционных методов нагрева и силового воздействия на расплав в устройствах для зонной очистки и высокотемпературных исследований материалов.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников металлургических и машиностроительных заводов и исследовательских организаций, связанных с плавкой металлов и тугоплавких соединений, а также может быть полезна студентам электроэнергетических и физико-металлургических специальностей, изучающим электротермические процессы и установки.

Т 30310-356
051(01)-75 203-75

6П2.1.081

© Издательство «Энергия», 1975 г.
Директор издательства
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

ПРЕДИСЛОВИЕ

Индукционная плавка приобрела исключительно широкое распространение как по числу действующих установок, так и по разнообразию технологических применений в самых различных областях техники. По массе расплава устройства, использующие индукционный метод плавки, различаются на 8 порядков: от нескольких граммов в установке для высокотемпературных исследований металла до 250 т чугуна в канальном миксере. Разнообразие задач обусловило большое количество методов индукционной плавки, различающихся по своим физическим основам, принципиальной технологической схеме и конструкции оборудования, предназначенного для их реализации.

Периодическая литература, посвященная современным методам индукционной плавки, весьма обширна, однако ощущается недостаток в систематизации разрозненных материалов. Задачей данной книги является частичное восполнение этого пробела. Назрела также необходимость в сравнительном анализе процессов и конструкций и определении тенденций развития. В тех областях, где промышленная практика или данные исследований дают необходимый материал, делается попытка сформулировать основные из этих тенденций.

В книге наряду с типами печей и процессами, прочно вошедшими в практику, рассматриваются также новые методы и конструкции (главным образом предложенные в связи с потребностями новых областей науки и техники), перспективы применения которых еще не определились. Тем не менее изучение их полезно, так как концентрирует внимание специалистов на еще не вполне решенных актуальных вопросах, а также способствует использованию предложенных идей для решения других задач индукционной плавки.

Ввиду охвата разнородного материала построение книги не однотипно. В гл. 1, относящейся к традицион-

ным методам плавки с широко известными физическими принципами и конструктивными решениями, основное внимание уделено выявлению современных показателей процессов и печей и определению тенденций их развития. В главах, посвященных новым видам плавки, описаны принципы и физические особенности метода, а также конструкции плавильного устройства. В тех случаях, когда уже имеется достаточный материал, приводятся данные по технологическим и энергетическим характеристикам процесса и оборудования.

Материал, связанный с выбором параметров индукционных печей, управлением движением металла, а также параграфы, посвященные плавке в холодном тигле, плавке с электромагнитным удержанием расплава и плавке при физико-химических исследованиях, написан главным образом на основе исследовательских работ, выполненных с участием авторов во ВНИИЭТО и Институте металлургии им. А. А. Байкова АН СССР. Остальные материалы книги базируются на изучении отечественных и иностранных литературных материалов, а также опыта конструирования и исследования электропечей, накопленного во ВНИИЭТО и ряде других организаций.

Введение и § 1, 3, и 5 написаны Л. Л. Тиром, § 6-9 и гл. 4—Н. И. Фоминым, § 4 написан совместно Л. Л. Тиром и Н. И. Фоминым, § 2—М. Я. Столовым.

Авторы выражают благодарность Л. М. Затуловскому, сделавшему ряд ценных замечаний при просмотре рукописи.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники вызывает все возрастающую потребность в высококачественном металле, обладающем высокими и стабильными эксплуатационными и технологическими свойствами. Непрерывно увеличивается также потребление сплавов, предназначенных для работы в особых условиях—при высоких температурах, больших напряжениях, в агрессивных средах. Поэтому в последнем десятилетии интенсивно совершенствуются методы плавки, а также возрастает производство плавильных электропечей наиболее эффективных конструкций. Особенно сильно вырос парк индукционных печей, количество которых в мире уже в 1966 г. превысило 3000 шт.

Широкое применение индукционного метода плавки объясняется как относительной простотой индукционных плавильных устройств, так и особенностями метода индукционного нагрева, при котором выделение тепла происходит в толще металла и в отличие от плавки с другими источниками нагрева может быть обеспечено поступление тепла к расплаву сбоку или снизу.

В жидком металле, находящемся в переменном электромагнитном поле индуктора, действуют электромагнитные силы, приводящие металл в движение [Л. 1]. Интенсивность этого движения зависит от частоты тока и конструкции печи, выбирая которые можно создавать гидродинамические режимы, наиболее благоприятные для заданного технологического процесса.

Во всех методах индукционной плавки, за исключением струйной (см. § 6), поступление в ванну энергии не зависит от подачи расплавляемого материала (в отличие от плавки с расходуемым электродом при любом виде нагрева), а также не связано с насыщением расплава компонентами материала нагревательного устройства (в отличие от электродугового нагрева, ведущего к науглероживанию ванны, и от методов плавки с нерасходуемым электродом, подверженным эрозии).

Процессы плавки и обработки жидкого металла с индукционным обогревом можно разделить на две основные группы. К первой относятся процессы, осуществляемые в футерованной ванне (см. гл. 1), ко второй — выполняемые без соприкосновения расплава с футеровкой (см. гл. 2 и 3). При изучении второй группы процессов необходимо выделить плавку и удержание жидкого металла при зонной очистке и в устройствах для высокотемпературных исследований металлов (см. гл. 3), существенно отличающиеся по своему характеру и масштабам жидкой садки от остальных процессов обеих групп.

Процессы, выполняемые в футерованной ванне, являются основными; технология их и соответствующие им типы печей существуют в течение нескольких десятилетий и хорошо отработаны. По виду используемого оборудования эти процессы можно подразделить на плавку в индукционных тигельных и канальных печах.

В индукционных тигельных печах (ИТП) в полной мере проявляются особенности метода нагрева, описанные выше: выделение энергии распределено по большей части периферии садки, металл интенсивно перемешивается.

В индукционных канальных печах (ИКП) современного типа (с закрытым каналом) энергия, передаваемая электромагнитным полем металлу, выделяется почти исключительно в расплаве, заполняющем закрытый канал относительно малого сечения, и передается оттуда основной массе садки, находящейся в ванне печи, конвекцией и теплопроводностью. Таким образом, возможности рассредоточенного выделения тепла, свойственные индукционному нагреву, реализуются в ИКП лишь частично. Значительно слабее, чем в ИТП, проявляется также электромагнитная циркуляция металла. Однако схема введения тепловой энергии в ванну снизу или сбоку — с потоком циркулирующего через нее металла, положенная в основу конструкции ИКП, имеет значительные технологические преимущества перед схемой введения тепла сверху, используемой в печах с другими источниками нагрева, так как исключает перегрев поверхности расплава и нежелательную интенсификацию процессов окисления компонентов сплава при плавке на воздухе и испарения их при плавке в вакууме.

Для обоих типов индукционных печей с футерованной ванной характерны равномерность распределения температуры и концентрации компонентов в расплаве, отсутствие зон местного перегрева, гибкость регулирования режима, возможность выполнения в вакуумном или компрессионном исполнении. В печах обоих типов возможна как жидкая, так и твердая загрузка с применением шихты любого вида. Однако плавка в ИКП шихты малой объемной плотности (стружка, высечка и т. п.), а также науглероживание расплава с поверхности затруднены из-за недостаточно активной циркуляции на зеркале расплава.

Особенностью ИТП является также возможность опорожнения печи для замены марки сплава или при длительном перерыве в работе.

При эксплуатации ИКП эти операции осложнены недопустимостью охлаждения канала и необходимостью предварительного заполнения его жидким металлом при пуске. Коэффициент мощности и к. п. д. заметно выше у ИКП, чем у ИТП.

Удельные мощности ИТП промышленной частоты ограничиваются интенсивностью реакций на границах расплава с футеровкой и атмосферой печи [Л. 2]. У ИКП удельные мощности лимитируются также перегревом металла в каналах. В современных конструкциях допускаются удельные мощности для крупных печей тигельного типа до 300 кВт/т и канального типа до 100 кВт/т. В соответствии с этими особенностями ИТП применяют преимущественно для плавления черных металлов и их сплавов, цветных металлов и их сплавов с наиболее высокой температурой плавления, а также в тех случаях, когда шихта имеет малую объемную плотность или необходима большая производительность, ИКП — для плавления цветных металлов и их сплавов, а также в качестве миксера (доводка, выдержка и раздача расплава) для чугуна, цветных металлов и их сплавов. Положительные свойства ИКП проявляются в наибольшей степени при непрерывных процессах.

В связи с низкой температурой шлака в индукционных печах металлургические операции рафинирования от серы и фосфора до последнего времени в этих печах не производились. Однако в настоящее время разрабатываются методы выполнения этих операций при производстве чугунного литья в ИТП за счет дополнительного по-

догрева шлака [Л. 3] или использования специальных низкотемпературных шлаков [Л. 4]. Вакуумное рафинирование металла проводят в индукционных печах тигельного типа. Сделаны попытки обработки металла в неглубоком вакууме $\{(6,65 \div 13,3) \cdot 10^2 \text{ Па}\}$ также в печах канального типа. Результаты промышленных исследований [Л. 5] показали эффективность этого технологического процесса (см. § 2).

Потребность в сплавах высокой чистоты, в сплавах на основе химически активных металлов и тугоплавких сплавах, плавка которых в керамической футеровке практически невозможна, привела к разработке и внедрению ряда методов плавки и соответствующих типов печей с водоохлаждаемыми тиглями (вакуумных дуговых, электронно-лучевых, электрошлаковых, плазменных), в том числе в гарниссажном исполнении.

Однако во многих производственных процессах вся сумма технологических требований не удовлетворяется в полной мере ни при одном из известных методов плавки. Это привело к практике двойных и тройных переплавов металла последовательно в электропечах различных типов, что усложняет производственный цикл и не всегда полностью решает задачу. Поэтому как в СССР, так и за рубежом с целью совершенствования плавки чистых, химически активных и тугоплавких металлов и сплавов пытаются создать методы плавки без соприкосновения расплава с футеровкой, обладающие новыми сочетаниями технологических свойств. Такие попытки, основанные на использовании переменных электромагнитных полей, рассматриваются в гл. 2 и 3. Распространение новых методов еще весьма ограничено, многие из них представлены лишь несколькими опытными экземплярами, и дать надежную оценку областям их будущего применения невозможно. Тем не менее, учитывая актуальность поставленной задачи, рассмотрение этих методов является целесообразным.

Существенной особенностью современного периода развития технологии плавки является необходимость учета влияния магнитогидродинамических режимов расплава на качественные и технико-экономические показатели процесса. Так, максимально допустимые скорости движения металла определяют выбор удельной мощности печей промышленной частоты. Кроме того, скорость движения расплава часто решающим образом влияет на го-

могенность, количество неметаллических включений, фазонасыщенность и другие показатели качества конечного продукта плавки. Длительность многих технологических операций (вакуумное рафинирование, растворение науглероживателя при плавке синтетического чугуна и др.) также сильно зависит от движения металла. Новые методы плавки либо целиком основаны на магнитогидродинамических явлениях (плавка во взвешенном состоянии, удержание расплава силами магнитного поля на опоре и пр.), либо существенно зависят от этих явлений. Поэтому в последние годы уделяется особое внимание изучению магнитогидродинамических явлений в расплаве и разработке методов управления ими. Некоторые результаты работ в этой области изложены ниже.

Успехи в области управляемого силового воздействия магнитного поля на расплав, достигнутые при индукционной плавке, послужили толчком к использованию аналогичных средств воздействия также и при других методах плавки [Л. 6].

В стабилизировавшихся видах индукционной плавки проявляются следующие основные технические тенденции: продолжается рост максимальных емкостей печей и увеличение удельных мощностей (в ряде серий печей эти показатели уже приближаются к расчетному экономическому оптимальному); интенсифицируется процесс плавления и обработки расплава, в первую очередь за счет управления магнитогидродинамическим режимом; конструкции печей максимально приспособляются к особенностям конкретных технологических процессов; увеличиваются механизация и автоматизация процессов. По мере уточнения технологии определилось различие требований к тепловым и гидродинамическим режимам в отдельные периоды цикла плавки. Это (наряду с энергетическими соображениями) привело к выполнению плавильных установок по агрегатному принципу, в том числе из разнотипных печей.

Одновременно действует и общая для всех энергоемких процессов тенденция повышения к. п. д. оборудования и коэффициента его использования. Последнее, в частности, явилось одной из главных причин, вызвавших тенденцию введения полунепрерывных и непрерывных процессов индукционной плавки (см. гл. 1 и 2).

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА В ПЕЧИ С ФУТЕРОВАННОЙ ВАННОЙ

1. ПЛАВКА В ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

А. Построение рабочего процесса в тигельных печах

Характер технологических процессов, выполняемых в ИТП, чрезвычайно разнообразен: от металлургического — приготовление сплава заданного состава, до чисто литейного — раздача готового сплава в литейные формы.

Процесс в ИТП ведут обычно либо в периодическом режиме, при котором после окончания обработки расплава в тигле весь металл выливается из него, либо в полунепрерывном, при котором по окончании рабочего цикла часть расплава не сливается и следующий цикл начинается с загрузки шихты в жидкую ванну, оставшуюся от предыдущего цикла (так называемое «болото»). Первоначально плавка с «болотом» применялась главным образом в печах промышленной частоты при относительно мелкой шихте, расплавление которой в пустом тигле затруднено. Однако в дальнейшем определился ряд других преимуществ полунепрерывного процесса плавки, в связи с чем выявилась тенденция к более широкому применению этого процесса и увеличению доли металла, оставляемого в «болоте». К числу этих преимуществ относятся равномерная выдача металла относительно малыми порциями, выравнивание состава сливаемого сплава за счет буферного действия «болота» и постоянный тепловой режим футеровки, что значительно уменьшает ее износ. При плавке в печах с большой удельной мощностью в случае высокого уровня «болота» уменьшаются нежелательные электродинамические эффекты на поверхности расплава. В связи с изложенным все больше распространяется плавка в крупных печах

с поддержанием «болота» на уровне 65—90% номинальной емкости тигля.

К недостаткам полунепрерывного процесса относится увеличение доли времени, расходуемого на операции загрузки и разгрузки печи, в общей длительности цикла плавки. Активная корректировка состава ванны при неоднородном составе шихты значительно сложнее, чем при периодическом процессе. Смена марки сплава в процессе работы печи без нарушения полунепрерывного цикла обычно невозможна. Однако опыт эксплуатации печей 60 т фирмы Броун-Бовери в описанном режиме показал, что при работе с неизменным составом шихты и механизации всех технологических операций удается работать без отключения печи (с регулированием мощности), причем экономические показатели процесса могут быть очень высокими (коэффициент использования мощности — до 90%).

В 1969 г. в США был впервые опробован технологический процесс непрерывной плавки чугуна, при котором подача шихты производилась непрерывно в загрузочное отверстие горизонтальной проходной печи, а слив металла происходил также непрерывно из ее сливного отверстия [Л. 8]. Непрерывный процесс плавки обладает теми же основными технологическими качествами, что и полунепрерывный, однако энергетически более выгоден, так как отсутствует недоиспользование мощности в период загрузки и слива металла.

Характерным для построения современных производственных процессов плавки при больших масштабах производства является распределение отдельных операций обработки металла между различными печами — создание дуплекс-процессов с переливом жидкого металла из одной печи в другую. Такие процессы осуществляются обычно либо с использованием ИТП в качестве плавильного звена, а ИКП — в качестве доводочного или миксера, либо с использованием вагранки или открытой дуговой электропечи в качестве плавильного звена, а ИТП или ИКП — в качестве миксера. Для производства чугунных отливок используется также дуплекс-процесс с доводкой доменного чугуна (заливаемого в жидком виде) в ИТП. Преимуществом процесса с операциями, разделенными по разным печам, является возможность проведения каждой операции в наиболее оптимальных для нее технологических и энергетических условиях.

Технологический процесс плавки в ряде случаев требует от ИТП, помимо тепловых, также и ряда других физико-химических воздействий на садку, что во многом определяет конструкцию печей. К таким воздействиям относятся создание вакуума или повышенного давления при различном составе атмосферы, обработка шлаками, заданное или регулируемое перемешивание металла, управляемая, в том числе закрытая, выдача расплава из печи.

Наиболее массовым из процессов, выполняемых в ИТП, является выплавка синтетического чугуна из вторичной шихты. Для получения высококачественного чугуна печь должна обеспечивать проведение процесса по определенному температурному графику в сочетании с графиком подачи шихты, а также определенный режим движения металла, оказывающий существенное влияние на темп плавления шихты (особенно с малой объемной плотностью), процесс науглероживания, газонасыщенность металла, количество неметаллических включений, износ футеровки.

Значительное распространение имеет плавка в индукционных печах алюминиевых сплавов. Главной особенностью этого процесса является чувствительность к режиму движения на зеркале ванны, который определяет целостность окисной пленки, защищающей металл от дальнейшего окисления и насыщения газами. При разрывах и замешивании пленки в расплав для получения металла высокого качества необходимы трудоемкие и энергоемкие дополнительные операции рафинирования металла. До последнего времени ИТП для плавки алюминиевых сплавов работали, как правило, на промышленной частоте, что обеспечивало высокие экономические показатели. Однако с повышением требований к качеству металла и ростом удельных мощностей, а следовательно, и скоростей движения металла, возникло противоречие между требованиями технологии и экономики. В связи с этим при производстве высококачественных алюминиевых сплавов наряду с усовершенствованием методов их очистки наметилась тенденция к искусственному снижению скорости движения на зеркале ванны, в том числе за счет использования повышенной частоты.

Б. Особенности плавки в вакуумных индукционных печах

Среди многообразных технологических процессов, выполняемых в индукционных вакуумных печах (ИВП), можно выделить три основные группы: выплавка сплава заданного состава; рафинирование залитого в печь жидкого металла; переплав готового сплава с целью получения фасонного литья. При выполнении двух первых процессов в ИВП отливают обычно слитки или расходные электроды для вакуумных дуговых печей; ИВП литейного назначения используют главным образом для точного литья.

При вакуумной плавке подобно плавке в открытых индукционных печах наряду с твердой загрузкой начали применять также и жидкую. При этом значительно повышается производительность вакуумных печей, что особенно важно ввиду высокой стоимости этих печей и сложности их эксплуатации. При работе плавильной ИВП в комплексе с открытой дуговой печью существенно изменяется также и материальный баланс установки, так как можно использовать для выплавки высококачественного вакуумного металла обычный скрап и ферросплавы вместо чистых шихтовых материалов. В результате на одной из ИВП емкостью 27 т стоимость передела при жидкой загрузке оказалась на 32% ниже, чем при твердой. При большой производительности установки (в частности при выплавке нержавеющей стали с производительностью выше 1000 т/мес) стоимость металла, полученного при таком дуплекс-процессе, оказывается сопоставимой со стоимостью металла, полученного в открытой дуговой печи, но качество более высокое [Л. 9].

Номенклатура материалов, выплаваемых в ИВП, весьма широка. К ним относятся: ряд чистых металлов, жаропрочные, магнитные и прецизионные сплавы, сплавы сопротивления, нержавеющей и шарикоподшипниковые стали, никелевые и медные сплавы.

Вакуумную плавку производят в ИВП периодического и полунепрерывного действия. В печах обоих типов процесс плавки производится в настоящее время в периодическом режиме. Различие в построении процесса относится к загрузке, разгрузке и вакуумированию печи. В печах периодического действия операции по установке и выгрузке форм или изложниц, зачистке, подготовке и загрузке тигля выполняются при открытой, заполненной воздухом плавильной камере. В печах полунепрерывного действия все эти операции производят при сохранении в плавильной камере вакуума. Это облегчает получение металла высокого качества, так как устраняет дополнительное поглощение воздуха элементами конструкции печи, находящимися внутри плавильной камеры. Эти печи имеют более высокую производительность, так как отсутствуют потери времени на остывание металла в изложницах под вакуумом и на повторное вакуумирование плавильной камеры. В то же время ИВП полунепрерывного действия сложнее и дороже, чем печи

периодического действия, обслуживание их требует более квалифицированного персонала.

Перемешивание расплава, являющееся важным технологическим фактором во всех ИТП, имеет особое значение для ИВП при выплавке сложных многокомпонентных сплавов. В современных технологических процессах плавки в открытых ИТП, а также в крупных ИВП, работающих на низких частотах (50—180 Гц), обычно ограничиваются естественной циркуляцией расплава под действием магнитного поля плавильного индуктора печи, которая при этих частотах достаточно интенсивна. При плавке в ИВП на повышенной частоте обычно создают искусственную управляемую циркуляцию расплава с помощью специальных устройств электромагнитного перемешивания (УЭМП). В большинстве случаев оказывается достаточным периодическое (1—3 раза за плавку) кратковременное (по 1—3 мин) включение УЭМП после подачи некоторых добавок и перед сливом. В этом случае используют наиболее простые УЭМП, включаемые при отключенном источнике нагрева садки. В некоторых процессах используют длительное перемешивание с помощью более сложного УЭМП, допускающего включение одновременно с нагревом расплава. Интенсивное движение расплава (со скоростями 0,5—1,0 м/с) существенно активизирует массообменные и теплообменные процессы, что значительно сокращает длительность процессов легирования и рафинирования сплава, повышает качество металла и стабильность его свойств [Л. 10, 11].

В. Технические данные и особенности современных индукционных тигельных печей

Максимальная емкость открытых (не вакуумных) ИТП с твердой загрузкой, находящихся в промышленной эксплуатации, составляет: для плавки чугуна 60, для стали 13,5, для медных сплавов 25 и для алюминиевых сплавов 40 т. При жидкой загрузке максимальная емкость эксплуатирующихся печей составляет 54 т (вакуумная тигельная печь) [Л. 9, 11].

Для питания ИТП используют обычно промышленную, утроенную и повышенную частоту. Общей закономерностью является снижение частоты f с увеличением емкости печи G , что уравнивает гидродинамические условия протекания процессов в расплаве у печей различной емкости. В частности, одинаковая скорость движения

расплава при равном настиле тока в печах разной емкости имеет место при соблюдении условия $f = k/G^{2/3}$, где k — постоянная [Л. 13]. Во всех случаях для обеспечения реальной передачи энергии расплаву выдерживается соотношение $f > k \cdot 10^6 / \gamma_0 d^2$, где d — диаметр тигля; γ_0 — удельная электрическая проводимость, а $k = 5$. Для получения хорошего электрического к. п. д. желательны значительно более высокие значения частоты ($k \geq 25$). В практике при выборе частоты учитывается также ряд других технико-экономических факторов, в том числе стоимость преобразователей энергии, трансформаторов и конденсаторов. При частой остановке печи или замене марки сплава частота принимается более высокой для эффективного плавления кусковой шихты заданного размера [Л. 1]. При отсутствии таких ограничений промышленная частота (50 или 60 Гц) применяется при емкости печи не менее 1 т для чугуна, 1,2 т — для медных сплавов и 0,4 т для алюминиевых сплавов, а утроенная промышленная частота (150 и 180 Гц) — при емкостях тиглей соответственно не менее 0,75; 0,8 и 0,3 т. Повышенная частота (для печей емкостью более 25 кг) принимается обычно в пределах 500—3000 Гц (большие цифры относятся к печам меньшей емкости). Для мелких печей (1—25 кг) используют частоты до 10 000 Гц.

Печи одного и того же типоразмера обычно выпускаются в нескольких исполнениях, различающихся по номинальной мощности. Исполнения с наибольшей мощностью используются при твердой садке, малой длительности выдержки металла, высоком коэффициенте использования печи по времени, низком тарифе на электроэнергию. Исполнения с наименьшей мощностью применяют при работе печи в качестве копильника для жидкого металла. Удельная мощность, определяемая как отношение номинальной активной мощно-

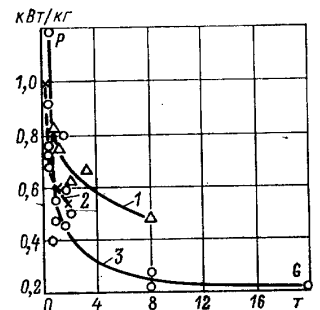


Рис. 1. Зависимость удельной мощности печи p от емкости тигля G для наиболее мощных исполнений индукционных тигельных печей повышенной частоты.

1 — серия ИТМ фирмы Броун Бовери; 2 — серия HF-SNH фирмы Тосба; 3 — серия фирмы АСЕА.

сти печи P (на зажимах печи) к ее номинальной емкости G ($p=P/G$), достигает у крупных печей промышленной частоты (60 Гц) 0,3 кВт/кг. У печей повышенной частоты емкостью 100—500 кг (500—3000 Гц) в исполнениях с наибольшей мощностью значения p обычно достигают 1,0 кВт/кг, поднимаясь в отдельных сериях до 1,6 кВт/кг. У печей меньшей емкости (2000—10 000 Гц) значения p доходят в некоторых случаях до 2,0—3,0 кВт/кг, а у печей емкостью 2—8 т (500—1000 Гц) не превышают 0,5—0,7 кВт/кг. Значения p для наиболее мощных печей некоторых серий приведены на рис. 1.

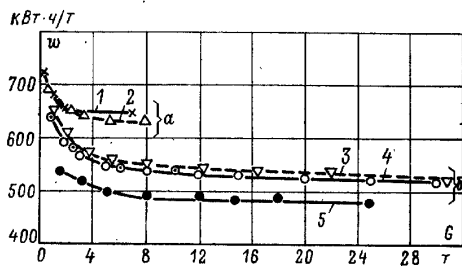


Рис. 2. Зависимости удельного расхода энергии на расплавление и перегрев ω от емкости G для индукционных тигельных печей повышенной (а) и промышленной (б) частоты для плавки чугуна и стали.

1 — серия HF-SNH фирмы Тосиба, плавка стали; 2 — серия ITM фирмы Броун Бовери, 1450 °С; 3 — серия фирмы Броун Бовери, 1500 °С; 4 — серия LFN-SP фирмы Тосиба, 1450 °С; 5 — серия LFD фирмы ACEA, 1500 °С; 6 — серия ИЧТ ВНИИЭТО.

Номинальный удельный расход электроэнергии на расплавление и перегрев садки ω при полной мощности печи представлен на рис. 2 (по значениям на зажимах печи). Номинальный расход энергии соответствует расплавлению и перегреву садки при подаче полной мощности в печь (закрывается крышкой и не остывшая после предыдущей плавки). При этом расход энергии на выдержку и другие технологические операции не учитывается. Как видно из рис. 2, удельный расход энергии резко снижается с увеличением емкости печи до некоторого предела (примерно 6—12 т при плавке чугуна на промышленной частоте и 2—4 т при плавке стали на повышенной частоте), после чего дальнейшее его снижение практически прекращается.

Расход энергии при плавке металла в промышленных печах при реальных производственных условиях превышает указанные номинальные значения на 25—100 кВт·ч/т в зависимости от технологического процесса и местных условий проведения плавки [Л. 14].

Для плавки малых количеств металла (0,1—25 кг) используют также ИТП высокой частоты, питаемые от ламповых генераторов. Отечественная промышленность выпускает плавильные установки с ламповыми генераторами на максимальную емкость (по стали) от 0,25 (440 кГц) до 25 кг (66 кГц). Колебательная мощность генераторов этих установок составляет 10 и 25 кВт, а полная мощность, потребляемая от сети, 19 и 43 кВт·А соответственно.

По общей конструктивной схеме современная ИТП (рис. 3) подобна аналогичным печам прошлого десятилетия. Однако в связи с увеличением емкости и удельной мощности оказалось необходимым повысить жесткость и снизить вибрации каркаса и индуктора, влияющие на стойкость футеровки. Это привело к разработке весьма мощных конструкций. Для защиты каркаса от нагрева магнитным полем вслед за вакуумными печами в конструкцию открытых печей введены магнитопроводы. Плавильный узел, состоящий из индуктора с магнитопроводами, тигля и несущего каркаса, в ряде случаев стали выполнять транспортными для удаления старой и набивки новой футеровки вне печи, что при наличии запасного узла сокращает ремонтные простои оборудования.

Улучшается оснащение печей вспомогательным эксплуатационным оборудованием. Так, крупные печи снабжаются устройствами для измерения массы печи совместно с садкой, работающими при любом положении печи (вертикальном или наклонном), — так называемыми «прессдукторами». Применение прессдуктора позволяет регулировать ход подачи шихты и слива расплава по массе загружаемого или сливаемого металла, что повышает точность поддержания режима и значительно упрощает работу обслуживающего персонала.

Большое внимание уделяется механизации печи: обеспечению плавного регулируемого наклона, механизации подачи шихты, а также открывания и закрывания крышки печи, съема шлака и пр.

Во многих случаях современные плавильные установки комплектуются устройствами для подготовки твердых шихтовых материалов: удаления остатков масел на используемых отходах производства (в том числе химическая очистка) и сушки шихты. В последние годы широко применяется газовый подогрев шихты до 600—700 °С перед подачей ее в печь. Такой подогрев исключает предварительную сушку шихты, а главное обеспечивает значительное повышение производительности печи и улучшение ее технико-экономических показателей.

Большое внимание уделяется совершенствованию футеровки ИТП. Для печей малой и средней емкости применяется набивная футеровка, для крупных печей — набивная, блочная, а также комбинированная, состоящая из блочного и набивного слоев. Для плавки чугуна

обычно применяют кварцевые, а в крупных печах также глиноземистые футеровки (в некоторых случаях применяются муллитовые и силлиманитовые футеровочные материалы [Л. 3]), для плавки стали в открытых печах — кварцевые или магнезитовые и в вакуумных печах — футеровки из плавящего магнезита, корунда или шпинелемагнезита. Стойкость кварцевой футеровки при плавке чугуна может достигать 250—300 плавов, повышаясь в некоторых

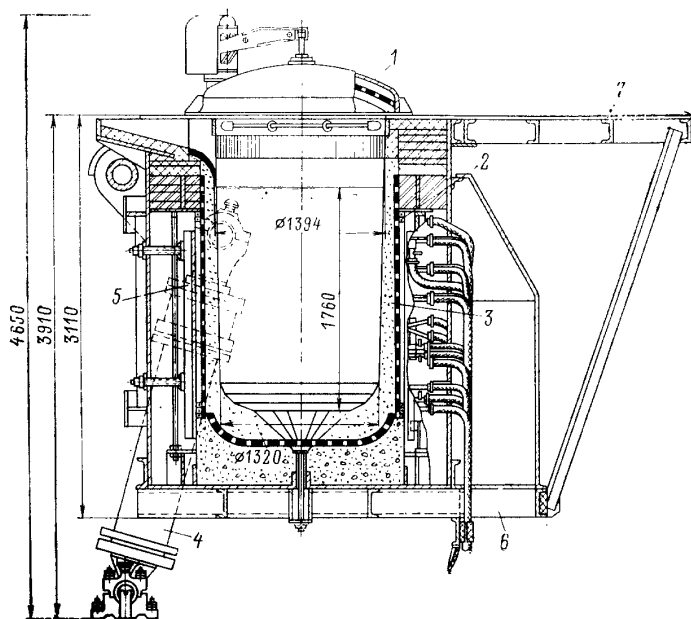


Рис. 3. Индукционная тигельная печь емкостью 6 т для плавки алюминия типа ИАТ-6.

1 — крышка с механизмом поворота; 2 — индуктор; 3 — футеровка; 4 — плунжер; 5 — магнитопровод; 6 — каркас; 7 — рабочая площадка.

случаях до 500 плавов и более [Л. 3]. Расход материалов при этом обычно колеблется от 1,5—2,5 кг/т (при плавке серого чугуна) до 3—5 кг/т (при плавке легированных и ковких чугунов). При плавке стали в открытых печах стойкость кварцевой футеровки составляет 20—100 плавов [Л. 15], а при плавке в вакуумных печах она доходит до 85 плавов (корундовая футеровка на печи емкостью 27 т) [Л. 11]. При плавке алюминиевых сплавов применяются футеровки из жароупорного бетона, стойкость которых составляет 3000—4000 плавов.

18

Для контроля состояния футеровки широко применяются специальные схемы сигнализации, число вариантов которых весьма велико.

Г. Вакуумные индукционные печи

Обычно ИВП работают на несколько более высокой частоте, чем открытые ПИ той же емкости. Это вызвано как различием шихты, так и стремлением предельно повысить удельные мощности (для сокращения времени контакта расплава с тиглем, ухудшающего качество вакуумного металла) без излишнего повышения интенсивности циркуляции.

Промышленные ИВП имеют индуктор, находящийся внутри вакуумной камеры и непосредственно охватывающий тигель. Для лабораторных печей иногда применяется компоновка с индуктором, вынесенным из вакуумного объема. В этом случае часть вакуумной камеры, находящаяся между тиглем и индуктором, должна быть прозрачной для магнитного поля. Обычно она представляет собой газонепроницаемую трубу из кварца или плавящего электрокорунда. Коэффициент полезного действия таких печей, как правило, велик из-за большого промежутка между индуктором и садкой, необходимого для получения приемлемых тепловых условий для кварцевой или электрокорундовой трубы. Эта конструкция имеет и недостатки. Это — уменьшение объема и поверхностей вакуумной камеры, что уменьшает патекание воздуха и удешевляет вакуумную откачку систему, уменьшение массы и стоимости печи и существенное облегчение требований к изоляции индуктирующей системы. В последние годы фирмой Юнкер (ФРГ) предложена промышленная ИВП, выполненная по описанному принципу. Особенностью этой печи является наличие охлаждающей системы, облегчившей условия работы трубчатой части тигля, что позволило сконструировать печь с удовлетворительной магнитной связью. Печь рассчитана на высокие требования к вакууму и разливку металла на воздухе.

Современные ИВП периодического действия выпускаются в двух исполнениях: с тиглем, наклоняющимся внутри неподвижной плавильной камеры (аналогично тиглю печи на рис. 4), и в двухкамерном исполнении — с плавильной камерой, поворачивающейся совместно с тиглем и соединенной с неподвижной разливочной камерой с помощью поворотного уплотнения [Л. 16]. В первом случае разливка производится непосредственно в изложницу или форму (обычно через приемную воронку), во втором металл поступает к изложнице или форме, находящейся в камере разливки, по футерованному желобу, проходящему сквозь поворотное уплотнение. Печи, рассчитанные на заливку нескольких изложниц или форм, снабжаются устройством, обеспечивающим поочередную подачу их под заливку.

Индукционные вакуумные печи полунепрерывного действия могут быть выполнены аналогично последней из описанных конструкций, с тем отличием, что после разливки металла желоб убирается в одну из камер и атмосфера камер разбирается с помощью вакуумного затвора. Однако чаще печи полунепрерывного действия

2*

19

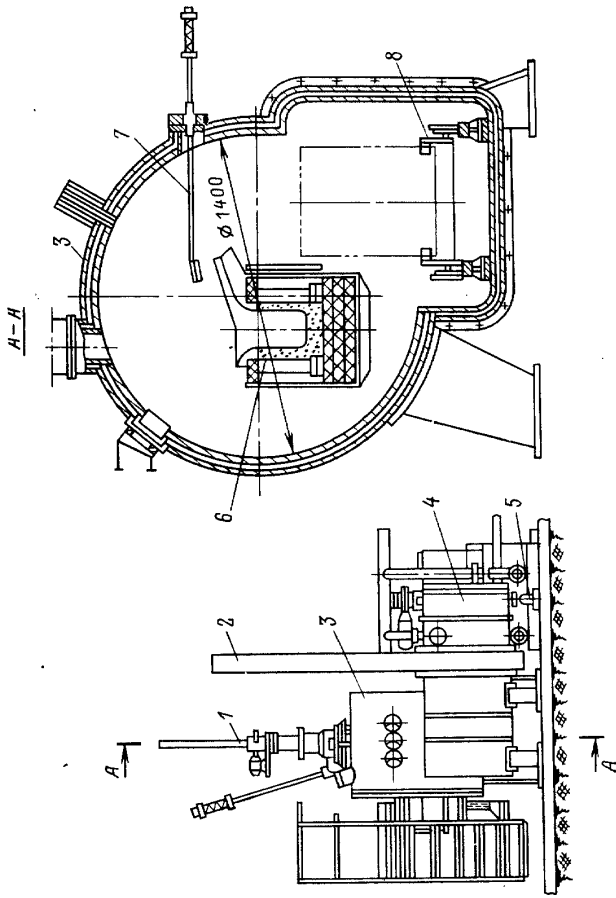


Рис. 4. Вакуумная индукционная печь полунепрерывного действия со шлюзовой камерой для разлива в формы (тип ИСВ-0,025НФ).
 1 — камера загрузки шихты, отделяемая вакуумным затвором; 2 — вакуумный затвор, разделяющий камеры 3 и 4; 3 — камера плавильная; 4 — камера загрузки формы; 5 — откачная система; 6 — плавильная печь емкостью 25 кг; 7 — устройство для чистки тигля; 8 — тележка для перемещения форм.

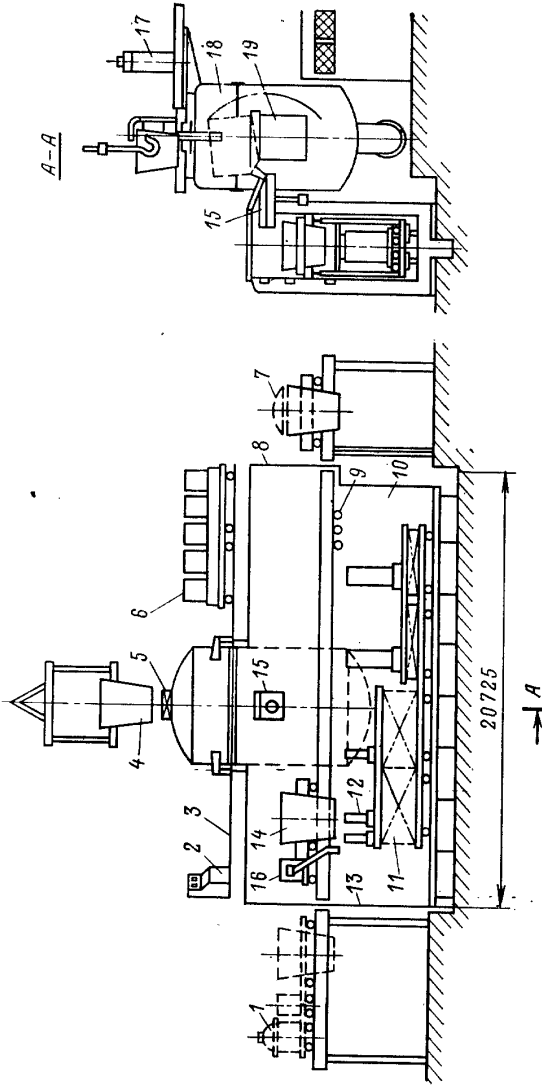


Рис. 5. Схема вакуумной индукционной печи емкостью 27 т.
 1 — промежуточный ковш с устройством для нагрева; 2 — панель управления; 3 — площадка оператора; 4 — заливочный ковш емкостью 27 т; 5 — вакуумный затвор диаметром 1220 мм; 6 — тележка с затворными корзинами для твердой шихты; 7 — устройство для нагрева разночного ковша; 8 — тележка; 9 — вакуумный затвор; 10 — плавильная камера; 11 — разливочная тележка; 12 — возжигатель; 13 — вакуумный затвор; 14 — заливочный ковш емкостью 27 т; 15 — желоб; 16 — бункер для утилизированных смесей; 17 — камера загрузки твердой шихты; 18 — плавильная камера; 19 — плавильная печь.

выполняются с наклоняющимся тиглем при неподвижной плавильной камере, снабженной шлюзовой камерой для подачи форм (рис. 4).

Компоновка особо крупной печи показана на рис. 5 [Л. 9]. Ряд компоновок ИВП приведен в [Л. 16]. Обычно ИВП полунепрерывного действия имеют герметичные шлюзовые камеры для подачи шихтовых материалов. В необходимых случаях ИВП снабжаются нагревательными устройствами для нагрева форм, а также для подогрева шихты (до 500—900 °С) и ее обезгаживания; ИВП снабжаются устройствами для пробивки мостов шихты, зачистки тигля и измерения температуры расплава, а также необходимым количеством гляделок. Печи для приготовления сплавов имеют также дозаторы для подачи в тигель присадок и устройство для отбора проб металла. В некоторых случаях предусматриваются подогрев сливного носка печи и сливного желоба с помощью нагревателей сопротивления, а также устройство для удаления шлака. Для осуществления центробежного литья выпускаются печи специального исполнения со столом, вращающимся со скоростью 100—800 об/мин.

Д. Системы питания и автоматизация ИТП

Колебательные контуры (индукторы и конденсаторная батарея) индукционных печей промышленной частоты питаются через специальные трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения. Число ступеней у современных трансформаторов около 10, переключение напряжения обычно допускается под нагрузкой.

Питание колебательных контуров ИТП повышенной частоты осуществляется преимущественно от электромашинных преобразователей частоты; к. п. д. большинства преобразователей, находящихся в эксплуатации, составляет 73—83%, потери холостого хода — до 30%. У лучших образцов, разработанных в последние годы, к. п. д. доведен до 92%, а потери холостого хода снижены до 10%. В то же время достигнуты существенные успехи в разработке статических преобразователей частоты, позволяющие ожидать широкого внедрения их в практику уже в ближайшие годы. Наиболее перспективны тиристорные преобразователи. Их достоинствами являются высокий к. п. д. (90—95%), бесшумность работы, малые потери холостого хода, возможность поддержания в течение плавки постоянной мощности печи, а также заданного соотношения без переключений конденсаторной батареи. Последние два преимущества достигаются путем регулирования частоты и выходного напряжения преобразователя в процессе работы. Предполагается, что по мере совершенствования тиристорных преобразователей их надежность должна стать еще выше, а стоимость — ниже, чем у машинных.

В СССР изготавливаются тиристорные преобразователи для индукционных печей с частотой до 1000 Гц (мощность до 1500 кВт), 2500 Гц (500 кВт), 8000 Гц (200 кВт). В ближайшие годы можно ожидать создания преобразователей на частоты до 1000 Гц мощностью до 3000 кВт [Л. 17, 18]. Некоторые иностранные фирмы используют для питания индукционных печей также статические умножители (утроители и упятерители частоты с насыщенными магнитопроводами [Л. 17]).

Для улучшения режима работы заводских сетей при подключении к ним однофазных ИТП большой мощности используют симметрирующие устройства. Их применение обязательно, если мощность печи составляет 2% (или более) мощности короткого замыкания в точке подключения печи. Необходимость симметрирования

нагрузки сохраняется в ряде случаев и при использовании печей с трехфазным индуктором, так как в силу неодинаковости собственных и взаимных индуктивностей у отдельных катушек индуктора нагрузка сети остается существенно несимметричной.

У мелких и средних печей обычно значительную долю рабочего цикла составляет технологическое и вспомогательное время (в ряде случаев до 50%), в течение которого потребляемая мощность снижается в несколько раз. Для повышения экономичности показателей печных установок в цехах, оборудованных значительным количеством таких печей, особенно при питании их от электромашинных преобразователей, в некоторых случаях используют централизованную систему питания [Л. 19].

Большое значение имеет автоматизация индукционных плавильных установок. Основной задачей автоматизации является поддержание максимально допустимой мощности печи в период плавления, когда электрические параметры печи нестабильны. Это требует согласованного регулирования тока, напряжения и коэффициента мощности печи.

В качестве средств регулирования в зависимости от типа источника питания используют изменения напряжения преобразователя частоты (для тиристорного преобразователя), емкости конденсаторной батареи (для машинного преобразователя), коэффициента трансформации согласующего трансформатора или автотрансформатора, а также переключение схемы индуктора.

Современные регуляторы выполняются обычно на полупроводниковых логических элементах и осуществляют все перечисленные функции. В частности, для сталеплавильных печей с питанием от машинных преобразователей частоты выпускается разработанная ВНИИЭТО серия регуляторов с точностью стабилизации тока и напряжения печи до 1% и коэффициента мощности до 3% [Л. 18].

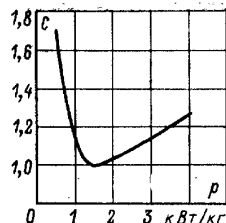
В последние годы делаются попытки управления с помощью ЭЦВМ также выбором технологического режима работы печи или всего плавильного участка. Такое управление может осуществляться в трех вариантах: а) ручное управление печью на основе анализа ее работы, выполняемого ЭЦВМ; б) ручное управление печью с использованием ЭЦВМ для комплексного анализа всего хода работы производственной линии, включая параметры металла в печах, готовность шихтового и литейного участков, часовой тариф на электроэнергию и пр.; в) автоматическое регулирование работы агрегатов с учетом указанных технико-экономических факторов [Л. 20].

Е. Тенденции развития и некоторые новые разработки

Одной из основных тенденций в развитии индукционного плавильного оборудования является рост максимальной емкости печей. Стимулом к росту емкости печей являются экономические соображения и потребность в больших количествах металла.

В каждой серии печей до некоторого предела, пока еще в большинстве случаев не достигнутого, увеличение емкости печи сокращает удельные расходы на изготовление и эксплуатацию печи, а также потребные производственные площади. В ИТП большой емкости теп-

Рис. 6. Расчетная зависимость стоимости плавки C в сталеплавильной печи емкостью 0,25 т (в относительных единицах) от ее удельной мощности p .



ловой и электрический к. п. д. очень высоки, например при плавке чугуна они достигают 90 и 85% соответственно. С увеличением емкости печи сокращается также удельная мощность ее конденсаторной батареи. Таким образом, с увеличением емкости экономические показатели ИТП могут стать весьма высокими.

При конструировании ИТП обычно стремятся к повышению удельной мощности p , что увеличивает производительность и к. п. д. печи. Однако при заданных технико-экономических условиях эксплуатации (годовое число часов работы, длительность вспомогательных операций, тариф на электроэнергию и пр.) имеется экономически оптимальное значение p (см., например, рис. 6). Часть печей, разрабатываемых в настоящее время, имеет значения p , приближающиеся к экономически оптимальным. Повышение удельной мощности до оптимальных значений в печах промышленной частоты обычно ограничивается

чрезмерной интенсивностью движения металла (рис. 7), а в печах повышенной частоты может вызвать конструктивные трудности в связи с возрастанием напряжения и тока индуктора.

Можно ожидать, что при создании плавильных установок высокой производительности одним из главных направлений будет внедрение непрерывной плавки. Максимальная эффективность при непрерывном процессе достигается, если условия работы каждого из элементов установки постоянны во времени. Это требует выполнения агрегатов с несколь-

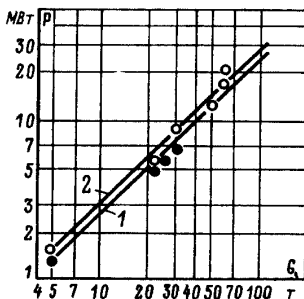


Рис. 7. Предельные допустимые мощности P ИТП промышленной частоты для плавки и перегрева чугуна (до 1550 °С) по условиям ограничения циркуляции металла [Л. 12].
1 и 2 — частоты 50 и 60 Гц соответственно; G — емкость печи.

кими рабочими зонами, различающимися по параметрам режимов. Для полного осуществления схемы непрерывного процесса активные зоны, в которых осуществляется изменение температуры или состава садки, должны быть выполнены в виде проходных устройств.

При создании проходных печей оказывается также возможным устранить ряд технических трудностей, свойственных печам садочного типа. В качестве примера рассмотрим печь типа НС1Е для плавки чугуна фирмы

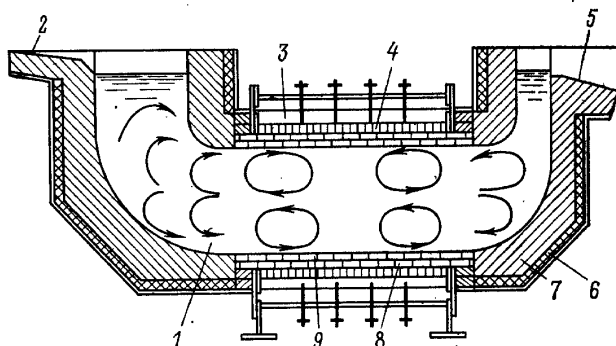


Рис. 8. Горизонтальная индукционная печь непрерывного действия для плавки чугуна.
1 — расплав; 2 — загрузочный носок; 3 — магнитопровод; 4 — индуктор; 5 — сливной носок; 6 — изоляционная кладка; 7 — высокоглиноземистая футеровка; 8 — муллитовая кладка; 9 — высокоглиноземистая футеровка.

Аякс Магнетермик (США), изображенную на рис. 8 [Л. 8]. Эта печь представляет собой керамический туннель, расположенный внутри горизонтального цилиндрического индуктора и снабженный по концам загрузочной и разгрузочной ваннами. Полость туннеля постоянно заполнена жидким металлом. Шихта загружается с одного конца печи, а жидкий металл постоянно сливается с другого. Присадки углерода и кремния вводятся в ванну путем инъекции на глубину 0,5 м. Опытный образец печи имел емкость 12 т, производительность 4 т/ч и мощность 2000 кВт при частоте 60 Гц. В горизонтальной части печь имела двухслойную футеровку (внутренний слой из высокоглиноземистого кирпича, наружный — из муллитового), а в концевых зонах была футе-

рована литым высокоглиноземистым огнеупором. Для аварийного слива металла были предусмотрены летки. При предварительном подогреве шихты до 150 °С и температуре выпускаемого чугуна 1480 °С средний расход электроэнергии на 1 т металла составлял 565 кВт·ч. Футеровка печи после 8,5 мес эксплуатации оставалась работоспособной. Предполагается выпуск печей той же конструкции на производительности от 5 до 40 т/ч при мощности от 2500 до 20 000 кВт.

Анализ данных опытной эксплуатации печи горизонтального типа с разливкой без наклона показал, что такая конструкция работоспособна и имеет ряд конструктивных достоинств. В частности, она позволяет вместить большое количество жидкого металла при малой поверхности открытого зеркала расплава и без чрезмерного повышения гидростатического давления, что не удается осуществить в обычной тигельной печи. В то же время в отличие от тигельной печи движение на зеркале ванны остается слабым даже при больших удельных мощностях. Футеровка печи работает в стабильных температурных условиях и не испытывает дополнительных механических нагрузок, возникающих в период наклона обычной тигельной печи, а также сравнительно мало подвержена разрушающему действию окислов, имеющих в шихте. В печах такого типа обеспечиваются высокая производительность, малое газо- и пылевыведение, низкие потери на окисление, легкость поддержания стабильного химического состава и температуры, а также высокий срок службы футеровки. К числу недостатков печей этого типа следует отнести необходимость принудительного погружения в расплав шихты, имеющей меньшую объемную плотность, чем расплав (стружка, брикеты), а также инжестирования легирующих, поскольку из-за слабой циркуляции металла на зеркале расплавление и растворение материалов, плавающих на нем, затруднено. Недостатком является также сложность контроля состояния футеровки.

Актуально создание непрерывных процессов технологической обработки жидкого металла с индукционным нагревом. В частности, для рафинирования олова создана электропечь, представленная на рис. 9 [Л. 21]. Процесс рафинирования протекает при 1200—1250 °С в дистилляционной тарельчатой колонне, расположенной внутри секционированного индуктора. Черновое олово

поступает в печь в жидком состоянии (при 400 °С) по барометрической трубе за счет разности давлений. Чистое олово непрерывно стекает в холодильник, а примеси конденсируются в конденсаторе и сливаются в специальный бак.

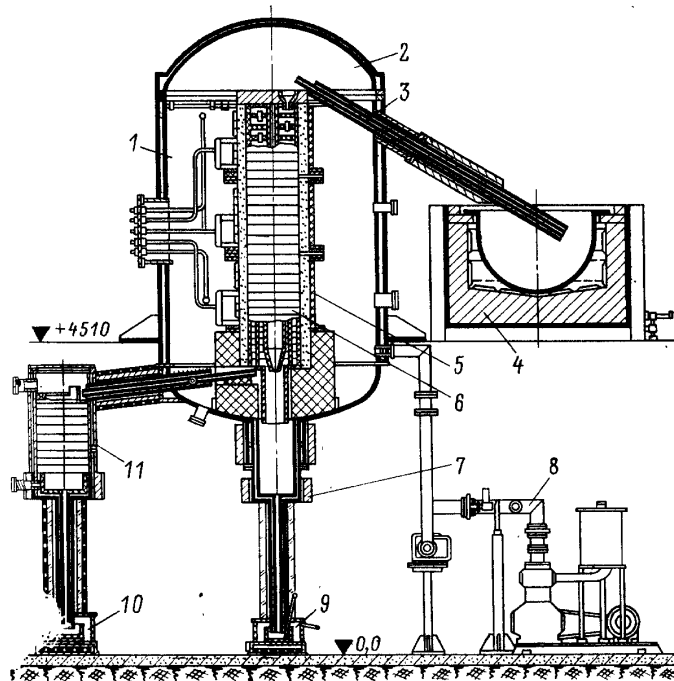


Рис. 9. Вакуумная индукционная печь непрерывного действия для рафинирования олова.

1 — рабочая камера; 2 — крышка; 3 — барометрическая труба; 4 — емкость с металлом; 5 — индуктор; 6 — дистилляционная колонна; 7 — конденсатор; 8 — вакуумная система; 9 — приемный бак для конденсата; 10 — приемный бак для чистого олова; 11 — холодильник.

Современная технология выдвигает весьма разнообразные требования к режиму движения металла в печи; это требует применения средств управления скоростью и траекториями движения расплава. Для изменения скорости движения металла наряду с использованием описанных выше устройств электромагнитного перемешива-

ния (позволяющих увеличить скорости движения расплава) действенной мерой является выбор соответствующей частоты рабочего тока индуктора (что позволяет как увеличивать, так и уменьшать скорости). У крупных промышленных печей максимальная скорость движения расплава при $G = \text{const}$ изменяется примерно пропорционально f^{-n} , где f — частота, а $n = \frac{1}{2} + \frac{1}{3}$ [Л. 13]. В од-

них случаях удается удовлетворить технологическим требованиям путем удачного подбора одной питающей частоты, например используя частоту 180 Гц для ИВП емкостью 5—8 т. В других целесообразно применять разные частоты в различные периоды рабочего цикла, что можно осуществить, переключая печь в процессе плавки на другой источник питания, или при использовании тиристорных преобразователей за счет настройки преобразователя.

Изменение траектории движения с целью получения одноконтурного движения осуществляют, применяя УЭМП или выполняя основной («греющий») индуктор печи двух- либо трехфазным. Электрический к. п. д. двух- и трехфазных печей несколько ниже, чем однофазных.

Принципиально возможно получение одноконтурного движения также при однофазном индукторе с несимметричным распределением настила тока относительно сядки [Л. 22, 71].

По мере увеличения емкости вакуумных печей значительно снижается удельная свободная поверхность металла (отнесенная к массе расплава). Так, например, при емкостях печей 100 кг и 2,5 т она составляет 1,1 и 0,15 м²/т соответственно. Это сильно ухудшает условия дегазации металла и требует удлинения периода пребывания его в тигле, что усиливает отрицательные последствия взаимодействия расплава с материалом тигля. В результате значительно усложняется в крупных ИВП получение сталей и сплавов с низким содержанием примесей. Поэтому для крупных ИВП особо важна оптимизация режима движения металла, при которой ускорятся бы процессы дегазации, но минимально интенсифицировались бы реакции на границе с футеровкой.

Одним из возможных радикальных решений проблемы дегазации больших масс металла является сочетание индукционной плавки с вакуумной обработкой рас-

плавленного металла на водоохлаждаемых лотках (так называемый «холодный под»). В период нахождения расплава на холодном поду необходимая для дегазации температура его зеркала поддерживается с помощью системы электроннолучевых пушек (см. гл. 4).

2. ПЛАВКА В КАНАЛЬНЫХ ПЕЧАХ

А. Построение рабочего процесса в индукционных канальных печах

Особенностями ИКП является высокий электрический к. п. д., не зависящий от заполнения печи расплавом (60—95% в зависимости от вида обрабатываемого материала), достаточная для большинства процессов циркуляция расплава внутри ванны при относительно спокойном зеркале металла, а также возможность выполнения печей очень большой емкости. С другой стороны, обязательным условием функционирования ИКП является сохранение в печи остатка расплава от предыдущей плавки (обычно 25—30% полной емкости печи). Отсутствие интенсивного движения металла на поверхности жидкой ванны уменьшает безвозвратные потери металла и загрязнение металла окислами при плавке алюминиевых сплавов, бронз и латуней, однако затрудняет плавку шихты с малой объемной плотностью и усвоение легких реагентов, вводимых на поверхность зеркала. Эти особенности определили области преимущественного использования ИКП: при производстве цветных металлов — плавка, а при производстве черных металлов — накопление расплава, выравнивание и доводка химического состава и перегрев до температуры разлива (в дуплекс-процессе). В настоящее время ИКП являются основным агрегатом для плавки сплавов на основе меди и используются при плавке цинка и алюминия и его сплавов. Применение ИКП для плавки чугуна до последнего времени носило ограниченный характер ввиду относительно низкой удельной мощности их и ограниченного срока службы футеровки индукционной единицы. Однако с прогрессом, достигнутым в повышении срока службы индукционных единиц, увеличением их мощности, разработкой отъемных единиц интерес к использованию ИКП при плавке чугуна возрос.

В чугунолитейном производстве известны следующие виды дуплекс-процессов с использованием канальных

печей: вагранка — ИКП, ИТП — ИКП, доменная печь — ИКП, дуговая электропечь — ИКП. В зависимости от первичного плавильного агрегата функции ИКП в дулекс-процессах несколько различны. Наиболее распространен процесс вагранка — ИКП, оказавшийся весьма эффективным. Так, в одном из процессов [Л. 23] применение ИКП совместно с вагранкой позволило без введения в ИКП металлической шихты для корректировки химического состава уменьшить колебания в химическом составе чугуна, выходящего из вагранки, примерно в 3 раза по углероду и в 2,5 раза по кремнию. В 3 раза уменьшились также колебания температуры металла на сливе. Использование ИКП в дулекс-процессе с ИТП позволяет повысить производительность последней, обеспечить высокий коэффициент использования установленной мощности и уменьшить расход электроэнергии на тонну выплавляемого металла.

Возможность выполнения ИКП весьма большой емкости (в настоящее время до 250 т) облегчает производство крупных отливок. В то же время сочетание большой емкости печи с малыми тепловыми потерями позволяет организовать экономичное накопление и хранение больших масс жидкого металла, что дает возможность нивелировать различия в химическом составе загружаемых порций шихты и обеспечить стабильность свойств отливок. Экономически целесообразно использование одной и той же ИКП в качестве плавильной печи в сменах, когда литейное отделение не работает (ночная и вечерняя), и в качестве раздаточной в период работы литейного отделения. Эффективно также использование ИКП для целей плавки при изменяющейся потребности в жидком металле в течение дня. Весьма целесообразнастройка ИКП в непрерывные автоматизированные системы литейного производства. При этом загрузка и разливка металла могут происходить одновременно.

Б. Технологические данные и особенности современных индукционных канальных печей

Параметры ИКП при плавке разных металлов различны. Печи для плавки меди и ее сплавов имеют максимальную емкость около 35 т, максимальную удельную мощность 80 кВт/т и производительность до 10 т/ч при плавке меди и 13—15 т/ч при плавке сплавов с 60—70%

30

меди. Удельный расход электроэнергии в этих печах в зависимости от емкости печи при плавке меди составляет 270—330 кВт·ч/т, а при плавке медных сплавов 190—210 кВт·ч/т. Для выдержки и перегрева меди и ее сплавов выпускаются ИКП на емкости 0,9—20 т мощностью 150—400 кВт. Широкое применение находят ИКП для плавки цинка. Их емкости достигают 150 т, а производительность 20 т/ч, удельный расход электроэнергии в пределах 95—110 кВт·ч/т.

Для плавки алюминия и его сплавов ИКП имеют емкость от 170 кг до 40 т, производительность от 75—100 кг/ч до 10 т/ч, а удельный расход электроэнергии 360—500 кВт·ч/т (при температуре разлива 750°C).

В чугунолитейном производстве емкость ИКП достигает 250 т; а мощность 4400 кВт (четыре индукционные единицы по 1100 кВт). Их удельная мощность при плавке твердой шихты составляет 30—100 кВт/т, а в дулекс-процессе при жидкой загрузке 20—50 кВт/т. Максимальная производительность действующих ИКП при плавке составляет 10 т/ч (печь емкостью 120 т, температура металла 1500°C). Производительность ИКП в дулекс-процессе зависит от многих факторов: температуры поступающего металла, температуры перегрева, которая должна быть достигнута в ИКП, процента вводимой холодной шихты, мощности и емкости печи. При нагреве до 100°C она колеблется от 2 до 170 т/ч. Печи в вертикальном исполнении имеют емкость до 60 т, в горизонтальном — до 250 т.

В. Конструкция ИКП

Современные ИКП выполняются, как правило, с закрытым каналом. Характерная особенность таких печей — наличие двух зон: зоны выделения энергии (так называемая «индукционная единица») и плавильной зоны (ванна печи). Индукционная единица представляет собой трансформатор, вторичной обмоткой которого является металл, находящийся в канале печи. Электрический к. п. д. индукционной единицы очень высок, например при плавке чугуна он достигает 95%.

Компоновки ИКП различны, но наибольшее распространение получили следующие три: шахтная, барабанная и двухкамерная (рис. 10).

В ИКП шахтного типа (рис. 10,а) плавильная камера имеет форму вертикально расположенного цилиндра, к донной части которого присоединена индукционная единица. Наклон печи обычно

31

выполняют гидравлическим способом и осуществляют вокруг оси, проходящей через центр тяжести печи или сливной носок. При работе печи в дуплекс-процессе ось наклона проходит через сливной носок и отверстие для заливки жидкого металла, что позволяет проводить заливку и разливку одновременно. Достоинства конструкции этого типа: простота выполнения, ремонта и замены футеровки ванны печи, которая может быть выполнена набивной, из кирпичной или жаростойкого бетона; доступность канала для осмотра и чистки; возможность механизированной загрузки печи. Эти

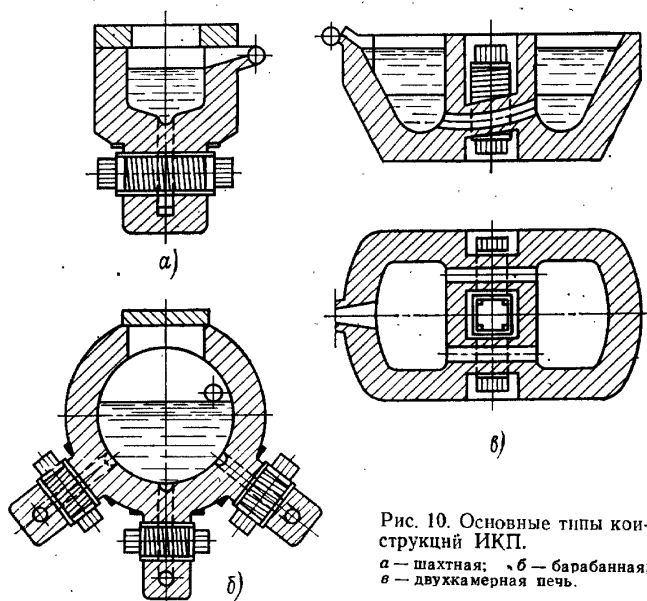


Рис. 10. Основные типы конструкций ИКП.
а — шахтная; б — барабанная;
в — двухкамерная печь.

достоинства конструкции в наибольшей степени реализуются при использовании печи в качестве плавильной. Печи такой конструкции выпускаются на емкости до 60 т (по чугуну).

В канальной печи барабанного типа (рис. 10,б) плавильная камера выполнена в виде горизонтально расположенного цилиндра, имеющего обычно ввиду сложной геометрической формы кирпичную футеровку. Печь устанавливается на цапфах (с гидравлическим приводом механизма наклона) или катках (с электромеханическим приводом механизма наклона), причем ось наклона проходит вблизи центра тяжести печи или через сливной носок. Последний может быть расположен на торцевой или боковой поверхности цилиндра. Печь обычно имеет несколько индукционных единиц, находящихся по обе стороны вертикальной оси.

32

Эта конструкция ИКП не требует дорогостоящего фундамента и соответственно больших первоначальных капитальных вложений, легко может быть приспособлена для одновременной заливки металлом, поступающим из первичного плавильного агрегата, и разливки. Максимальная емкость барабанных ИКП 250 т (по чугуну).

В обеих названных выше конструкциях ИКП при их использовании в чугунолитейном производстве применяется так называемая «сифонная» конструкция каналов для заливки и слива металла. При этом вход соответствующего канала в ванну печи расположен ниже минимального уровня «болота». Таким образом достигается эффективное отделение металла от шлака и уменьшается окисление металла.

В двухкамерной канальной печи (рис. 10,в) горизонтально (или наклонно) расположенные каналы соединяют две емкости (камеры). При этом одна из них используется как плавильная, а вторая — как раздаточная.

Для плавки меди и ее сплавов обычно применяют печи шахтного и барабанного типов, для плавки цинка — обычно двухкамерные стационарные или качающиеся с прямоугольной ванной, работающие в непрерывном режиме. Для плавки алюминия и его сплавов ИКП выполняются в качестве разливочных печей шахтными, барабанными или двухкамерными, а в качестве плавильных — с прямоугольной ванной (печи типа ИАК-16). В чугунолитейном производстве применяются ИКП шахтного и барабанного исполнений.

В ИКП тепловая энергия выделяется в жидком металле канала и передается в ванну печи теплопроводностью и конвекцией. Последняя является результатом действия как электромагнитных сил, индуцированных в металле канала, так и разности плотностей металла в ванне печи и канале. Из-за недостаточной интенсивности движения металла в существующих конструкциях перегрев металла в канале может достигать 100—200 °С. Это обстоятельство является основным фактором, ограничивающим удельную мощность ИКП и соответственно их производительность.

В индукционных единицах с одним каналом последний имеет V или U-образную форму, в сдвоенной индукционной единице — W-образную форму. Мощность сдвоенной единицы обычно в 1,5 раза больше, чем максимальная мощность единицы с одним каналом. Футеровка индукционных единиц испытывает значительно большую термическую нагрузку, чем футеровка ванны, и соответственно имеет более короткий срок службы. Поэтому в современных конструкциях канальных печей как для цветных, так и для черных металлов используются

3—64

33

съемные индукционные каналные единицы. Это позволяет произвести замену индукционной единицы без перефутеровки ванны печи. Особенно удобна с этой точки зрения барабанная конструкция печи, у которой замена индукционной единицы производится без остановки и опорожнения печи. В печах такого типа обычно используются по крайней мере две единицы, расположенные по обе стороны вертикальной оси печи. Поэтому для замены одной из них достаточно наклонить печь на угол, необходимый для опорожнения этой единицы, отсоединить ее от печи и укрепить на ее месте заранее подготовленную новую единицу. Эту замену удается провести за несколько часов. Срок службы футеровки ИКП зависит от обрабатываемого металла и назначения печи. В среднем для индукционных единиц он составляет 6—12 мес, а для ванны 1—2 года.

Футеровку ванны ИКП в отличие от ИТП выполняют толстой. Это повышает тепловой к. п. д., снижает тепловыделения, а последнее улучшает условия труда в цехе и обеспечивает длительное сохранение металла печи жидким в случае перерыва в подаче энергии (3—4 ч).

Электрическая схема установки ИКП весьма проста. Рабочее напряжение индуктора индукционной единицы, как правило, не превышает 525 В (обычно 220, 380, 500 В). В большинстве случаев установки ИКП комплектуются питающим автотрансформатором с большим числом ступеней напряжения, подключаемым к цеховой сети (на линейное напряжение) непосредственно, или с симметрирующим устройством (при одноканальных единицах мощностью более 500 кВт). Индукторы двоярных индукционных единиц подключаются к сети трехфазного тока по схеме Скотта или открытого треугольника, что позволяет обойтись без симметрирующего устройства.

Коэффициент мощности ИКП относительно высок (0,4—0,8), и для компенсации реактивной мощности требуется сравнительно небольшая конденсаторная батарея. Значения $\cos \phi$ постоянны в процессе плавки, поэтому часто не нужны для конденсаторной батареи коммутационная аппаратура и регуляторы.

Г. Последние достижения и тенденции развития ИКП

Основные достижения последнего десятилетия в развитии ИКП — отработка конструкций съемной двоярной индукционной единицы в печах для плавки и выдержки чугуна, а также увеличение максимальной мощности этих единиц с 300 до 1500—2000 кВт. В печах для сплавов на медной основе мощность двоярной единицы достигла 800 кВт. В результате усовершенствований резко

возросло использование ИКП, особенно в чугунолитейном производстве. Только в США в период с 1961 по 1968 г. общая емкость установленных в чугунолитейном производстве ИКП составила 3566 т, причем полагают, что уже к 1969 г. эта цифра должна была удвоиться [Л. 24].

Увеличение мощности индукционных единиц стало возможным благодаря успехам, достигнутым в совершенствовании футеровочных масс, и разработке методов усиления обмена металлом между каналной единицей и ванной печи, что позволило снизить перегрев металла в канале и тем самым облегчило условия работы его футеровки.

Наиболее эффективное средство увеличения обмена металлом между каналной единицей и ванной печи — однонаправленное движение металла сквозь канал. Попытки создать однонаправленное движение металла в канале за счет изменения формы канала и выполнения каналов переменного сечения. Однако применительно к одноканальным единицам эти методы не привели к желаемому результату. Шведская фирма АСЕА в 1965 г. предложила установку плоского электромагнитного статора под нижней частью канала или рядом с боковыми участками канала; последнее обеспечивало однонаправленное движение металла в канале. Однако этот метод не нашел применения в промышленности, что, видимо, связано с некупаемостью дополнительных затрат. В. П. Полищук и М. Р. Цин (Институт проблем литья АН УССР) предложили [Л. 26] индукционную каналную печь, отличительной особенностью которой является установка на двоярную индукционную единицу дополнительного электромагнита (рис. 11). Дополнительный электромагнит 1 монтируется на индукционной единице таким образом, что место соединения центрального 3 и нижнего 2 каналов находится в зазоре между его полюсами. В результате взаимодействия магнитного поля электромагнита с током, наведенным в канале основным индуктором, возникает электромагнитная сила; перемещающая расплав вверх по центральному каналу и соответственно вниз в крайних каналах (или наоборот). Этот метод также требует дополнительных затрат.

Американская фирма Аякс Магнетермик в 1963 г. получила патент [Л. 27] на индукционную каналную печь с однонаправленным движением металла в двояр-

ной индукционной единице. Благодаря специальной форме устья каналов (рис. 12) в этой печи металл приводится в движение, направленное вниз в центральном канале и вверх — в крайних. Такие двоянные индукционные единицы различной мощности (до 1100 кВт) установлены на большом числе промышленных печей. По данным фирмы эта конструкция обеспечивает удвоение срока

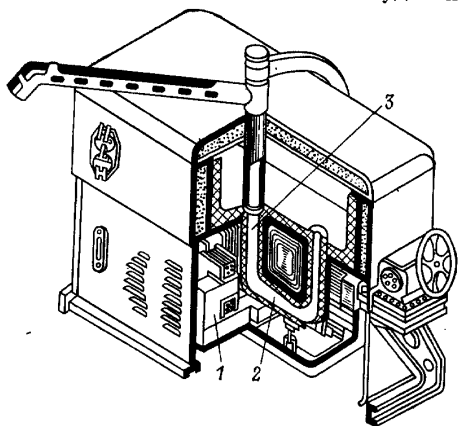


Рис. 11. Установка МДН-6.

службы футеровки и снижение разности температур металла в ванне и канале до 40 °С и менее. По литературным данным изготавливаются индукционные единицы мощностью 1500 кВт и находятся в стадии лабораторной проработки единицы мощностью 2000 кВт [Л. 28].

В последние годы в связи с расширяющейся механизацией и автоматизацией литейного производства становится популярным использование ИКП малой емкости, установленных на разливочных линиях или в непосредственной близости от нее, в качестве печей для доведения металла до температуры разливки и в качестве разливочных печей. Печи с автоматической разливкой работают на разливочных конвейерах различных типов.

В Институте проблем литья АН УССР на базе описанной выше канальной печи разработана разливочная установка МДН-6 (см. рис. 11). В этой установке ток, протекающий в канале, используется как для подогрева, так и для приведения металла в движе-

ние по сливному металлопроводу при заливке. В зависимости от режима включения магнитных систем металл в металлопроводе удерживается на определенном уровне или нагнетается в форму. Установка МДН-6 используется для производства отливок из алюминиевых сплавов и имеет полезную емкость 120—250 кг, что обеспечивает работу в течение 2—4 ч без доливки. Срок службы индукционной единицы составляет 700 ч при непрерывной работе, причем он может быть увеличен в 1,5—2 раза при периодической чистке нижнего канала. Конструкция установки позволяет быстро заменить плавильную ванну вместе с канальной частью заранее подготовленной. Часть металлопровода, погруженная в металл, выполнена из токопроводящей керамики и благодаря низкой теплопроводности металлопровода не требует его электроподогрев. Мощность установки 15—35 кВт, расход металла при заливке регулируется в интервале 0,3—2 кг/с при минимальной дозе 1 и максимальной 40 кг сплава.

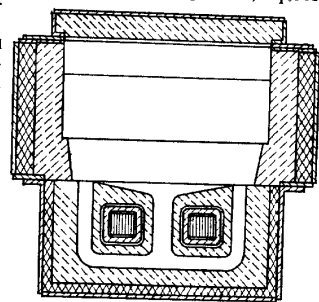


Рис. 12. Форма каналов двоянной индукционной единицы по патенту фирмы Аякс Магнетермик.

Шведская фирма АСЕА разработала и изготавливает разливочную канальную печь типа «Прессноур» емкостью 1, 2 и 5 т, мощностью 100—200 кВт, которая обеспечивает производительность при перегреве чугуна на 100 °С от 1,1 до 4,3 т/ч. В печи предусмотрена сифонная система заливки и разливки. Заполнение формы происходит при подаче в печь сжатого воздуха или инертного газа под избыточным давлением. В зависимости от диаметра сливного отверстия и высоты металла в сменном сливном носке можно изменять скорость заливки от 1 до 35 кг/с (по чугуну), однако при установленном носке скорость регулируется всего на 20%. Фирмой Броун Бовери на базе канальной печи создана автоматическая разливочная печь типа ХСР. Печь имеет три модификации по емкости 0,8; 1,3 и 2,7 т (по чугуну) и производительность 1—4, 1—8 и 1—12 кг/с соответственно. Слив осуществляется через встроенный в дно печи керамический стакан, отверстие которого перекрывается керамическим стопором, имеющим пневматический привод. Скорость разливки определяется размером отверстия в разливочном стакане и ходом стопора. При автоматической разливке исполнительный механизм получает сигнал на начало разливки от оптического прибора, определяющего степень наполнения выпора в литейной форме.

В заключение отметим тенденцию к расширению областей применения ИКП. В частности, в промышленных условиях исследовались возможность и эффективность использования ИКП в сталеплавильном цехе в качестве разливочной печи и в качестве агрегата для вакуумной обработки стали, выплавленной в другой

печи [Л. 5]. Исследования проводились на ИКП емкостью 7, 8, 18 и 45 т. Три печи емкостью 18 т и одна емкостью 7 т были переоборудованы в вакуумные. Исследование работы открытой канальной печи с основной футеровкой показало, что ИКП позволяет наводить достаточно жидкоподвижные основные шлаки и выполнять все металлургические операции доводки металла по химическому составу и его раскислению столь же успешно, как и дуговая печь, но с меньшим риском вторично окислить металл и лучшей его гомогенизацией. Исследование работы ИКП в условиях вакуума показало, что при доводке металла ИКП может сочетать металлургические данные, аналогичные данным дуговой печи, с рядом достоинств вакуумной обработки. В результате ИКП могут оказаться эффективными для производства стали различных марок из простого металла, получаемого в сталеплавильном цехе в агрегатах большой производительности [Л. 5]. Это создает предпосылки для более широкого изучения возможностей использования ИКП в сталеплавильном производстве.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА БЕЗ СОПРИКОСНОВЕНИЯ РАСПЛАВА С ФУТЕРОВКОЙ

3. ГАРНИССАЖНАЯ ПЛАВКА

Гарниссажной называют плавку, при которой расплавленный металл соприкасается только с твердой фазой того же химического состава, что и расплав, отделяющей его от контакта с конструктивными элементами печи.

Известны две схемы индукционной гарниссажной плавки (предложены в 1954—1957 гг. М. П. Глухановым и А. А. Фогелем с соавторами), различающиеся местом введения энергии: через открытое зеркало ванны, минуя гарниссаж, или, наоборот, сквозь гарниссаж. В последнем случае используют для введения энергии боковую поверхность садки, что обеспечивает всестороннее поступление тепла и хорошую магнитную связь индуктора с садкой. Принципиальные компоновки печей, соответствующие этим двум схемам плавки, приведены на рис. 13.

38

Достоинством первой из названных схем является отсутствие электрических потерь в гарниссаже. Однако по своей тепловой и технологической схеме она не отличается от схем других видов гарниссажной плавки с верхним вводом тепла (дуговой, электронно-лучевой, плазменной и др.). В то же время в силу худшего электрического к. п. д., усугубляемого плохой магнитной связью торцевого индуктора с садкой, этот метод плавки не находит практического применения.

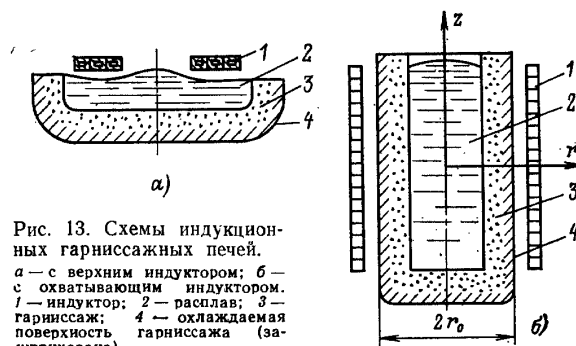


Рис. 13. Схемы индукционных гарниссажных печей.
а — с верхним индуктором; б — с охватывающим индуктором.
1 — индуктор; 2 — расплав; 3 — гарниссаж; 4 — охлаждаемая поверхность гарниссажа (запирхована).

При введении энергии через боковой гарниссаж, наоборот, проявляются достоинства, присущие индукционной плавке — равномерность температурного поля по высоте расплава и отсутствие перегрева верхней поверхности его, что в ряде случаев может быть определяющим фактором в выборе способа плавки.

В схеме индукционной гарниссажной плавки металла с введением энергии через боковой гарниссаж предусматривалось создание внутри цилиндрического индуктора или охлаждаемого им тигля слоя гарниссажа из порошка переплавляемого металла. В процессе плавки наружные слои порошка, охлаждаемые благодаря соприкосновению с относительно холодным индуктором или тиглем, не спекаются, остаются мало электро- и теплопроводными и выполняют функцию футеровки. Аналогичный способ плавки для огнеупорных материалов запатентован в США [Л. 29]. В патенте рекомендуется выбирать частоту магнитного поля из условия $r_0/\Delta_0 = 1,5 \div 3,0$ (r_0 — внутренний радиус индуктора; Δ_0 — глубина проникновения тока в расплав). Для плавки огне-

39

упорных окислов (UO_2 , ZrO_2 , ThO_2 , TiO_2 и их смесей с MgO и BeO) рекомендуется использовать частоты порядка нескольких мегагерц.

М. Г. Коган обосновал возможность индукционной плавки металла с введением энергии через боковую поверхность садки при монолитном металлическом гарниссаже, обладающем электропроводностью и теплопроводностью, не меньшими, чем расплав [Л. 30]. Такой процесс возможен благодаря глубинному выделению тепла в поверхностном слое садки при индукционном нагреве. В силу наличия теплового потока потерь, направленного сквозь поверхность садки наружу, температура этой поверхности оказывается ниже максимального значения температуры внутри металла.

Распределение температуры по сечению садки зависит как от глубины проникновения тока Δ_0 (определяющей распределение внутренних источников тепла), так и от соотношения тепловых потоков наружу (тепловые потери) и внутрь садки (полезное тепло).

В случае цилиндрической садки с закраиваемыми торцами (или при весьма большой высоте ее) можно, пренебрегая переносом энергии, связанным с циркуляцией расплава, выразить для стационарного теплового состояния превышение температуры t произвольной точки объема с относительной координатой $\bar{r}=r/r_0$ (рис. 13) над температурой поверхности t_n следующим образом:

$$\Delta t = t - t_n = H^2_{\pi} F(\alpha, \alpha_0) / 2\lambda\gamma_0, \quad (1)$$

где

$$F(\alpha, \alpha_0) = 1 - (\text{ber}^2\alpha + \text{bei}^2\alpha) / (\text{ber}^2\alpha_0 + \text{bei}^2\alpha_0). \quad (2)$$

Здесь: H_{π} — эффективное значение напряженности магнитного поля у поверхности расплава, А/м; $\alpha = r \sqrt{2/\Delta_0}$ и $\alpha_0 = r_0 \sqrt{2/\Delta_0}$ — относительная частота в садке и на ее поверхности соответственно.

Максимальный перепад температур в сечении садки Δt_n определяется выражениями (1) и (2) при $\alpha=0$. При определенных значениях $\lambda\gamma_0$ он зависит только от H^2_{π} и α_0 . В случае больших относительных радиусов садки ($\alpha_0 > 3$) можно принять $F(\alpha, \alpha_0) = 1$ и Δt_n будет определяться только значением H^2_{π} . Пренебрегая теплоотдачей в торцы, можно записать следующее выражение температуры боковой поверхности садки:

$$t_n = t_0 + R_{\tau} p_{\tau,6}, \quad (3)$$

где t_0 — температура теплопринимающей среды; R_{τ} — сопротивление на пути потока тепла от боковой поверхности садки к теплопринимающей среде; $p_{\tau,6}$ — плотность потока тепловых потерь с боковой поверхности садки.

40

При стационарном тепловом состоянии садки вся выделяющаяся в ней энергия расходуется на тепловые потери и справедливо условие

$$p_{\tau,6} = H^2_{\pi} F_{0\pi} / \gamma_0 \Delta_0. \quad (4)$$

Для устойчивой плавки в гарниссаже необходимо сохранение определенной толщины его, что обеспечивается поддержанием определенного перепада температуры на нем:

$$\Delta t_r = t_n - t_{\pi}, \quad (5)$$

где t_{π} — температура кристаллизации расплава.

Перепад температур в расплаве равен

$$\Delta t_p = \Delta t_n - \Delta t_r. \quad (6)$$

Выражения (3) — (6) показывают, что обеспечение нужного температурного режима садки, определяемого

температурами t_{π} и t_n (или перепадами Δt_p и Δt_r), принципиально возможно при варьировании в необходимых пределах частоты, напряженности магнитного поля и условий теплоотвода (значения R_{τ}), определяющих соотношение между величинами $p_{\tau,6}$ и $t_n - t_0$. Для создания различной интенсивности сьема тепла с боковой поверхности садки возможно использование излучения, естественной и искусственной конвекции или контактного теплоотвода. Случай теплоотвода излучением

исследован в [Л. 30]. Перепады температур по сечению для частного случая частоты 150 Гц приведены для некоторых тугоплавких металлов на рис. 14. На рис. 15 представлены результаты расчета нестационарного режима первичного расплавления болванки титана. Расчеты показывают, что при теплоотдаче с поверхности излучением применимы частоты порядка десятков и сотен герц,

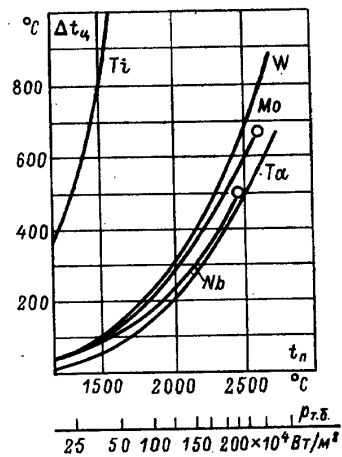


Рис. 14. Значения перепада температур между центром и поверхностью садки Δt_n при теплоотдаче излучением в зависимости от температуры поверхности садки [Л. 30].

Режим стационарный, частота 150 Гц; $p_{\tau,6}$ — плотность потока тепловых потерь; кружками обозначены предельные режимы, соответствующие плавлению поверхности.

41

В частности 50 и 150 Гц. В случае повышенных частот (тысячи герц) тепловой баланс на поверхности слитка достигается только при температурах, превышающих температуру плавления. Расчетный расход энергии при плавлении титана в гарниссаже радиусом 0,125 и высотой 0,5 м при частоте 50 Гц, удельной поверхностной мощности $40 \cdot 10^4$ Вт/м² и длительности процесса 40 мин составляет с учетом электрического к. п. д. 430 МДж. Масса жидкого металла достигает 85 кг при общей массе садки 110 кг, а расход энергии 5 МДж/кг расплава

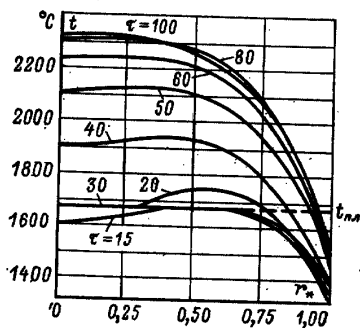


Рис. 15. Распределение температуры t по сечению садки при плавке титана.
 τ — время, мин; $r_0 = r/r_0$; $t_{пл}$ — температура плавления.

сивным. В этих условиях толщины гарниссажа потребуются большая интенсивность теплосъема по сравнению с расчетной. Соответственно повысится температура поверхности, обеспечивающая баланс энергии в поверхностном слое.

Технологический процесс индукционной гарниссажной плавки возможен как в нестационарном (периодическом) режиме, так и в стационарном (последовательном). В первом случае его назначением может быть накопление жидкого металла для единовременной заливки в формы, во втором — непрерывная подача струи металла в кристаллизатор или формы.

Данные о результатах практического использования индукционной гарниссажной плавки с боковым нагревом пока отсутствуют.

4. ПЛАВКА В ХОЛОДНОМ ТИГЛЕ

Под индукционной плавкой в холодном тигле условимся понимать разновидность индукционной плавки, при которой энергия передается расплаву электромагнитным полем сквозь проводящий тигель. Температура этого тигля поддерживается низкой для ограничения нежелательных процессов химического взаимодействия между ним и расплавом.

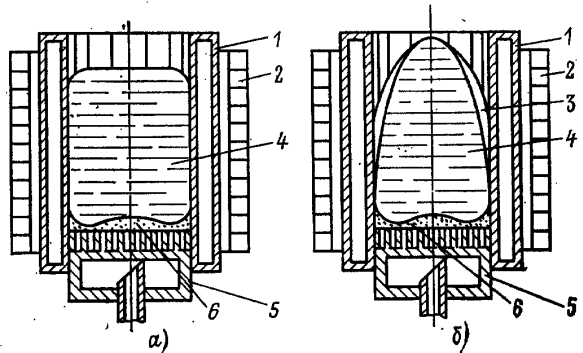


Рис. 16. Плавильное устройство индукционной печи с холодным тиглем.
а, б — при отсутствии и наличии электромагнитного отжигания металла от тигля; 1 — секция охлаждаемого тигля; 2 — индуктор; 3 — риф; 4 — расплав; 5 — охлаждаемое основание; 6 — гарниссаж.

При плавке металлов между холодным тиглем и расплавом обычно образуется промежуточный слой толщиной в доли миллиметра — микрогарниссаж (структура этого промежуточного слоя пока мало изучена). В то же время часть внутренней поверхности тигля во многих случаях покрывается обычным металлическим гарниссажем, толщина которого составляет несколько миллиметров. Еще более четко выражен периферийный слой гарниссажа при плавке тугоплавких окислов и полупроводниковых материалов. Таким образом, плавку в холодном тигле можно рассматривать также как разновидность гарниссажной плавки (см. § 3), закономерности которой накладывают свой отпечаток на работу индукционной печи с холодным тиглем (ИПХТ). Верхняя часть расплава в холодном тигле во многих случаях отжимается магнитным полем от стенок тигля

(рис. 16,б) (при наличии значительных рифов). В этом случае процесс приобретает некоторые общие черты с плавкой при электромагнитном удержании расплава (см. § 5).

Передача энергии электромагнитным полем сквозь проводящий тигель принципиально возможна в двух случаях: при выполнении тигля относительно тонким (соизмеримым по толщине с глубиной проникновения

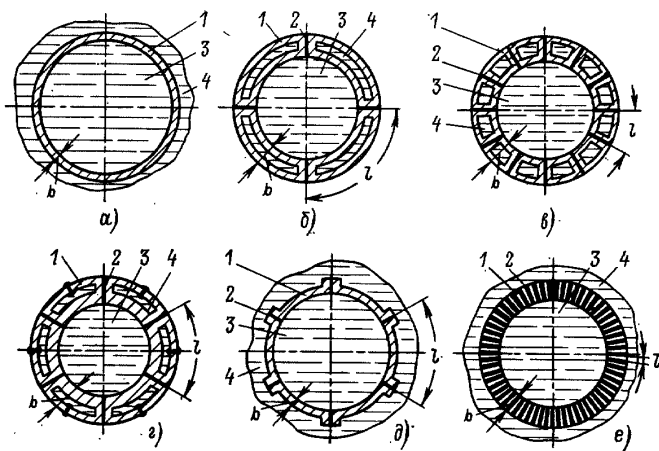


Рис. 17. Конструкции охлаждаемых тиглей. а — неразрезные; б—е — разрезные; б, е — с замкнутыми секциями, мало- и многосекционные соответственно; г, д — с разомкнутыми секциями; е — пластинчатые; 1 — секция; 2 — изоляционный слой; 3 — расплав; 4 — охлаждающая среда.

тока в материал тигля) либо при выполнении его разрезным. Практическое применение имеют только разрезные тигли.

Исследования по плавке в ИПХТ различных металлов и полупроводников показали, что большинство этих материалов не смачивает холодную стенку тигля, выполненную из меди или серебра. При этом в сплаве не удается обнаружить следов материалов стенки даже с помощью радиохимических методов анализа [Л. 31].

Впервые плавка металла в индукционной печи с холодным тиглем была предложена в 1926 г. фирмой Сименс Гальске. Основные положения этого предложения находят отражение и в современных конструкциях, в том

числе деление тигля на секции, выполнение его из материалов с высокой электрической проводимостью (медь, серебро), внутреннее водяное охлаждение секций, металлический водоохлаждаемый под, нанесение на внутреннюю сторону тигля тонкого слоя окислов переплавляемого материала. Несмотря на наличие этого предложения, реальные попытки создания печей с холодным тиглем начаты были лишь в 60-е годы.

В 1957 г. была предложена конструкция холодного тигля, отличающаяся способом охлаждения его секций [Л. 32]. Секции не имели полостей и охлаждались водой, омывающей их наружную поверхность (рис. 17,д). Предложили также выполнять дно тигля подвижным для получения слитка методом вытягивания (вниз). В последние годы был опубликован ряд сообщений об успешных экспериментах по использованию ИПХТ, а также об отдельных усовершенствованиях конструкции [Л. 33—44]. В Советском Союзе основные работы по разработке и исследованию ИПХТ для плавки металлов велись во ВНИИЭТО [Л. 34—37]. Ряд работ по ИПХТ для плавки металлов и тугоплавких окислов был выполнен другими организациями [Л. 38—41].

Плавка металлов

А. Технологические свойства

Индукционные печи с холодным тиглем обладают рядом принципиальных особенностей, отличающих их от печей других типов для плавки чистых металлов. Это: а) выделение тепла по всей боковой поверхности расплава; б) развитая и не заэкранированная электродом свободная поверхность металла; в) интенсивная электромагнитная циркуляция металла. Эти особенности позволяют обеспечить максимальную интенсивность технологических процессов, реализуемых на поверхности расплава с участием объемного массообмена (дегазация, обработка флюсами и пр.) при минимальном перегреве поверхности. Большая равномерность температуры в объеме расплава и малый процент металла в гарнисаже создают благоприятные условия для выполнения плавки точных химического состава и массы. Это особенно важно в случае выплавки сложных сплавов с компонентами, резко различающимися по плотности и температуре плавления.

Необходимо отметить также следующие существенные технологические и эксплуатационные свойства ИПХТ: а) независимость подачи энергии в ванну от поступления в нее шихтового материала; это в отличие от дуговых вакуумных печей с расходуемым электродом позволяет произвольно регулировать длительность пребывания расплава в печи при заданной температуре; в) возможность плавить шихтовые материалы в любом виде (слитки, куски, порошки); г) возможность применения в печи вакуума и любой искусственной атмосферы, в том числе при повышенном давлении; это, в частности, позволяет плавить в ИПХТ материалы с высокой упругостью пара, например хром; д) отсутствие короны, характерной для вакуумной дуговой плавки, и, следовательно, связанной с нею неоднородности поверхностного слоя слитков (при получении слитка в тигле-кристаллизаторе); е) отсутствие дуги, рентгеновских излучений или особо высоких напряжений, усложняющих обеспечение безопасности процесса в печах других типов для плавки чистых металлов; ж) макроструктура слитка, закристаллизованного в холодном тигле, подобна получаемой в вакуумной дуговой печи.

Таким образом, ИПХТ обладает специфическим сочетанием технологических и эксплуатационных свойств, отсутствующих у печей других типов для плавки чистых металлов. В ряде технологических процессов это сочетание может быть весьма ценным.

Б. Физические особенности электромагнитных и тепловых процессов

При обычной конструкции тигля переменное электромагнитное поле, распространяющееся от индуктора к садке, наводит в его стенках кольцевые токи, создающие поле противоположного направления. Для сведения экранирующего действия этих токов к удовлетворительным пределам пришлось бы использовать медные тигли со стенкой толщиной в доли миллиметра, что не позволило бы создать достаточно надежную конструкцию. Поэтому холодный тигель выполняется с разрезами, препятствующими замыканию в нем кольцевых токов, охватывающих садку (рис. 17). Рассмотрим вначале случай, когда электрический контакт между расплавом и металлом тигля можно не учитывать (тигель с изоли-

рованной внутренней поверхностью, наличие большого переходного сопротивления между расплавом и стенкой или плавка с обжатием металла магнитным полем). При высоком уровне расплава экранирующее действие разрезного тигля можно не учитывать и напряженность поля у поверхности садки H_z будет равна напряженности поля на внутренней поверхности индуктора H_n . В случае низкого уровня расплава тигель выполняет функцию концентратора тока, что может даже несколько увеличить отношение H_z/H_n , которое в системе индуктор — садка малой высоты всегда менее 1 из-за рассеяния поля индуктора.

Во всех случаях тигель, находящийся в поле индуктора, является потребителем энергии, выделяющейся в нем в виде джоулевых потерь. Для простейшего случая (отсутствие электрического контакта с расплавом, большая высота системы, малое число секций тигля и одинаковая толщина Δ всех стенок этих секций) зависимость потерь в тигле от относительной толщины стенки получена Д. Г. Ратниковым в [Л. 39]. Практически разрезные тигли выполняются с толщиной стенки, обращенной к расплаву, равной 6—10 мм.

Обычно у холодного тигля, не покрытого специальной электрической изоляцией, на значительной части внутренней поверхности имеет место электрический контакт секций с расплавом. На рис. 18 представлена идеализированная схема протекания тока в зоне электрического контакта тигля с расплавом, которую следует рассматривать как рабочую гипотезу, удовлетворительно согласующуюся с явлениями, наблюдаемыми экспериментально в тигле, и данными энергетического баланса.

Вблизи щелей между секциями тигля на расплав действуют силы взаимодействия между протекающими в нем токами и магнитным полем. Эти силы направлены по внутренней нормали к поверхности расплава и стремятся вдавить поверхность металла внутрь. Давление сил поля уравновешивается поверхностным натяжением расплава и металлостатическим давлением; в результате в зоне

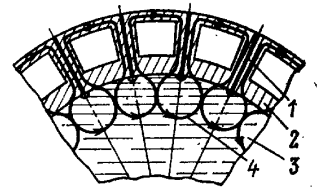


Рис. 18. Идеализированная схема протекания токов в расплаве и секциях тигля при наличии электрического контакта. 1 — изоляция; 2 — секция тигля; 3 — расплав; 4 — путь тока.

разрезов тигля образуются характерные желобки, радиусы которых увеличиваются по мере приближения к верхушке расплава, где желобки сливаются в единый выпуклый мениск.

Обращаясь к рис. 18, легко видеть, что мощность, которая выделяется в расплаве, находящемся в контакте с неизолированной стенкой металлического тигля, должна зависеть от числа его секций n_c . Она весьма мала при наличии всего лишь одного-двух

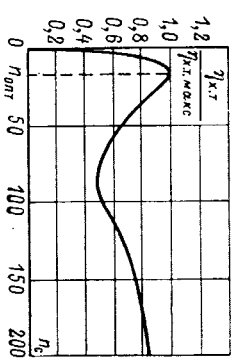


Рис. 19. Характер зависимости к. п. д. секционированного холодного тигля $\eta_{х.т.}$ от числа секций n_c (расчет).

Плавка жаропрочной стали в тигле диаметром 100 мм при частоте 2500 Гц, толщине стенок секций 2 мм, зазоре между ними 0,5 мм и радиальном размере секций 20 мм.

Выбор числа секций тигля в значительной степени предопределяет энергетические показатели ИПХТ [Л. 36]. (Исследования [Л. 32, 42] выполнены при $n_c \leq n_{c.огр.}$).

Закономерности теплопередачи от расплава к стенке холодного тигля определяются наличием на этой стенке слоя гарниссажа (в ряде случаев тончайшего микрогарниссажа). Поскольку граница фаз данного материала имеет вполне определенную температуру, равную температуре кристаллизации ($t_{кр}$), удельные тепловые потери (плотность потока тепловых потерь) от расплава к стенке определяются лишь перегревом жидкого металла (по отношению к $t_{кр}$) и гидродинамической обстановкой в слое расплава, прилегающем к фазовой границе. Особенностью процесса является то, что тепловые сопротивления стенки тигля, переходных слоев и гарниссажа не влияют на тепловые потери (пока гарниссаж существует), причем сумма их автоматическим регулируется за счет изменения толщины гарниссажа таким образом, чтобы соответствовать указанной плотности потока тепловых потерь и разности температур расплава и охлаждающей воды. Данные экспериментального определения

удельных тепловых потерь в условиях плавки ряда металлов в холодном тигле приведены в табл. 1.

Таблица 1
Удельные тепловые потери от расплава к стенке холодного тигля

Металл	Атмосфера печи	Температура металла, °С	Частота, Гц	Настил, кв. д. см	Удельные потери, Вт/см²
Сплав олова и свинца	Аргон, дав. 1,2 · 10³ Па	300	8000	980	90
			1600	2500	140
Сталь 1Х18Н9Т	Вакуум: 0,25 Па	1600	2020	1330	300
			Хром	Аргон, дав. 1,2 · 10³ Па	2020

В. Конструктивное исполнение

Разрезные тигли целесообразно подразделять на мадросекционные с длиной секции (вдоль наружного периметра тигля) l , значительно большей, чем радиальный размер стенок секции b , и многосекционные (грубчатые), у которых l и b примерно одинаковы.

Тигли, предложенные в [Л. 32] (рис. 17, д), имеют тот существенный недостаток, что в них прокладки между секциями совмещают функции электрической, гидравлической и вакуумной изоляции, что снижает надежность конструкции. Учитывая это обстоятельство и описанные ранее энергетические и конструктивные соображения, применяют, как правило, многосекционные разрезные тигли с замкнутыми секциями.

Разработаны конструкции ИПХТ для трех видов рабочего процесса: а) наливка в гдухой тигель-кристаллизатор; б) вытягивание из проходного тигля-кристаллизатора; в) накопление расплава в тигле с последующей разливкой его.

В печах для наливки слитка тигель-кристаллизатор представляет собой цилиндр, собранный из значительного количества массивных медных водоохлаждаемых трубок специального профиля 4—64

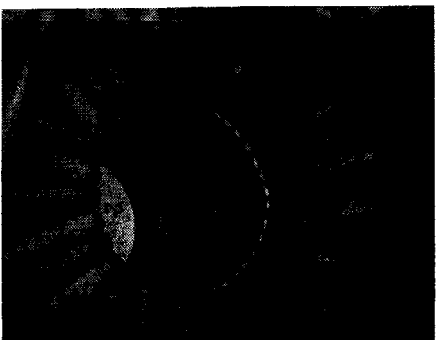


Рис. 20. Холодный тигель для наливки слитка (конструкция ВНИИЭТО). 1 — секция тигля; 2 — под; 3 — несущее кольцо; 4 — изоляция.

(рис. 20) и снабженный полым водоохлаждаемым основанием для наплавления слитка. С целью облегчения отделения слитка от тигля последний выполняется разборным не менее чем на три сектора.

Для дистанционной выдачи слитка применяют также механизированное разведение секторов тигля и дополнительное вертикальное перемещение основания.

Каждый из секторов тигля состоит из нескольких трубок, объединенных в верхней и нижней частях пайкой или сваркой. Применяется также заливка сектора в компаунд. Необходимый профиль трубок получают обычно фрезерованием из нормализованной неравностенной медной трубки. Готовый тигель обычно дополнительно обрабатывают изнутри для получения достаточно гладкой цилиндрической поверхности.

В печах для вытягивания слитка можно применять тигликристаллизаторы, изготовленные из толстостенных трубок или массивных фрезерованных медных секций.

Тигли для накопления расплава и разливки его обычно собираются из массивных медных секций и имеют цилиндрическую или коническую форму с отъемным подом. Применяются главным образом конструкции с донным сливом. Такой способ выдачи расплава имеет, кроме своих обычных достоинств (меньшая длина струи,

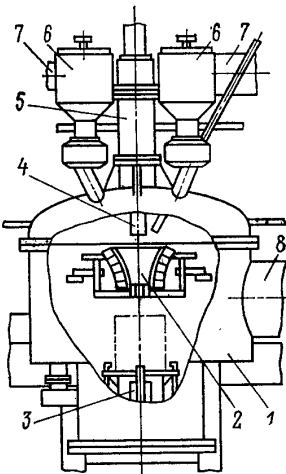


Рис. 21. Индукционно-дуговая вакуумная печь с холодным тиглем типа ИКВ-0,01ПИ.

1 — вакуумная камера; 2 — индукционное плавильное устройство; 3 — центробежный стол с формой; 4 — электрод; 5 — устройство подачи электрода; 6 — дозаторы шихты; 7, 8 — вакуумные трубопроводы.

Ряд опытных индукционных плавильных устройств с холодным тиглем разработан ВНИИЭТО. Основные технические данные некоторых из этих устройств приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические данные опытных плавильных устройств с холодным тиглем ВНИИЭТО

Тип устройства	Назначение	Частота, Гц	Мощность преобразователей, кВт	Емкость, кг	Размеры слитка, мм		Максимальная разливная температура, °С
					Диаметр	Длина	
ИТ-340	Наплавка слитка	8000	500	—	100	700	1900
ИИСВ-0,01ПК	То же	8000	300	—	100	250	1750
ИТ-389	То же	8000	300	—	120	500	2000
ИИКВ-0,01ПИ	Разливка	8000	560	10	—	—	1950
ИТ-459	То же	8000	300	11	—	—	2000

Примечание. Устройство ИИКВ-0,01ПИ снабжено дополнительным источником дугового нагрева и конструктивно оформлено в виде вакуумной печи (рис. 21).

Г. Энергетические соотношения

Энергия, поступающая в индуктор, $P_{\text{и}}$ расходуется на электрические потери (в самом индукторе $P_{\text{эл.и}}$ в стенках холодного тигля $P_{\text{эл.т}}$ и в поду $P_{\text{эл.п}}$) и на выделение тепла в садке $P_{\text{с}}$. Это тепло идет на нагрев садки $P_{\text{пол}}$ и тепловые потери $P_{\text{т}}$ от садки: к поду $P_{\text{п}}$, к кожуху печи (излучением) $P''_{\text{из}}$ и к стенкам холодного тигля: в зоне гарниссажа $P_{\text{т}}$, в зоне контакта расплава с тиглем $P_{\text{к}}$ и излучением $P'_{\text{из}}$.

Энергетические показатели ИПХТ зависят от ее размеров. Экспериментальные материалы имеются только по малым печам (получены в лабораторных условиях) [Л. 35]. Ниже приводятся данные, относящиеся к печи с диаметром и высотой индуктора 195 и 235 мм соответственно при диаметре тигля 100 мм, высоте расплава 200 мм, его температуре 1600 °С (материал — жаропрочная сталь), частоте тока 2400 Гц и вакууме 1—0,1 Па. Тигель печи не изолирован от расплава. На рис. 22 приведены характеристики для периода расплавления при работе такой печи в садочном режиме. Представлены составляющие энергетического баланса, а также следующие показатели работы печи: к. п. д. η , удельный рас-

ход электроэнергии ω (кВт·ч/кг) и производительность печи g (кг/ч). Значения $P_{\text{и}}$, $P_{\text{пол}}$, $P_{\text{эл.и}}$, $P_{\Sigma} = P_{\text{л}} + P_{\text{эл.л}}$, $P_{\text{эл.пр}}$, $P_{\text{эл.х.т}}$ получены экспериментально [здесь $P_{\text{эл.пр}}$ — электрические потери в прочих элементах установки (токопровод, конденсаторы, кожух и пр.)] Значение $P_{\text{эл.х.т}}$

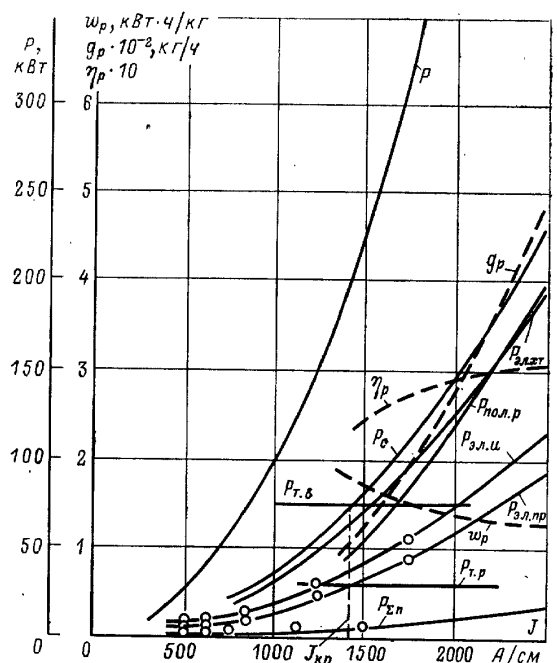


Рис. 22. Зависимость энергетических характеристик опытной печи в садочном режиме от настила тока в индукторе J .

измерено в печи без садки и скорректировано на основе упомянутой ранее рабочей гипотезы о перераспределении токов в зоне контакта расплава с тиглем. По значениям перечисленных выше величин рассчитаны остальные параметры, представленные на рис. 22. При построении зависимостей на рис. 22-24 мы пренебрегли изменениями геометрической формы расплава в функции настила тока. Для мощности печи P и параметров η и ω

приводятся значения на выводах преобразователя. В садочном режиме мощность тепловых потерь $P_{\text{т}}$ переменна; она изменяется от нуля до максимального значения $P_{\text{т.в}}$, имеющего место при полном расплавлении садки и достижении ею температуры выдержки. Отношение среднего за период расплавления значения $P_{\text{т}}$ к $P_{\text{т.в}}$ зависит от темпа процесса, графика введения шихты в тигель, теплофизических свойств металла, частоты тока и ряда

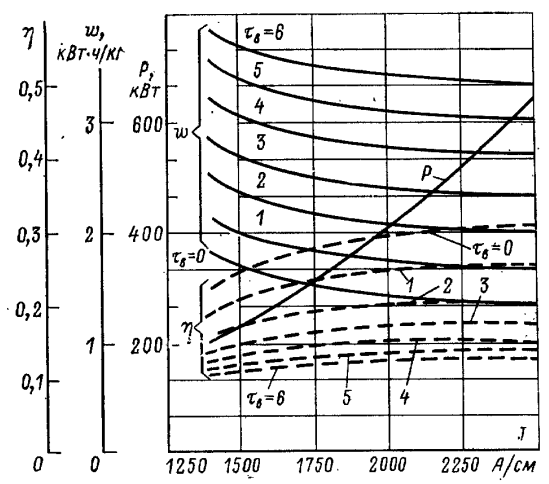


Рис. 23. Энергетические характеристики опытной печи при садочном процессе и различном времени выдержки расплава $\tau_{\text{в}}$ мин.

других факторов. При расчете характеристик, приведенных на рис. 22, это отношение принято равным 0,4. Величины, изменяющиеся в течение периода расплавления, представлены средними значениями и обозначены индексом «р».

Садочный процесс может быть завершён только при достаточной интенсивности выделения энергии, характеризуемой условием $P_{\text{с}} > P_{\text{т.в}}$, т. е. при $J > J_{\text{кр}}$, где $J_{\text{кр}}$ — критическое значение настила тока, соответствующее равенству мощностей $P_{\text{с}}$ и $P_{\text{т.в}}$ (рис. 22). Это же условие определяет возможность ведения непрерывно-последовательного процесса плавления в ИПХТ.

Энергетические характеристики рассматриваемой печи при дополнительной выдержке расплавленного металла показаны на рис. 23. Показатели непрерывно-последовательного процесса наплавления слитка в холодный тигель-кристаллизатор диаметром 100 мм при высоте расплавленной зоны 200 мм и тех же прочих геометрических и теплофизических параметрах, что и у рассмотренной садочной печи, представлены на рис. 24.

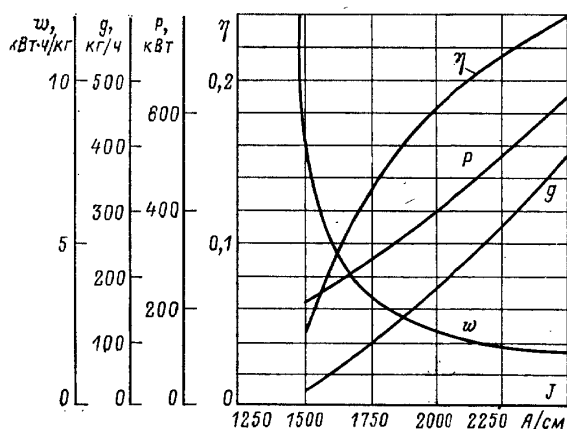


Рис. 24. Энергетические характеристики опытной печи при непрерывно-последовательном процессе.

В дальнейшем при испытании опытных печей с диаметрами тигля до 120 мм на плавке жаропрочной стали были достигнуты несколько более высокие показатели за счет улучшения магнитной связи и электромагнитного отжата расплава [Л. 37]. Так, например, на одной из печей для непрерывно-последовательного процесса были получены¹ значения $\eta=0,30$ и $w=1,4$ кВт·ч/кг.

По мере совершенствования конструкций энергетические показатели ИПХТ могут быть значительно улучшены. Эти показатели определяются электрическим к. п. д. η_0 , который практически не зависит от темпа процесса, и тепловым к. п. д. η_t , который, наоборот, непосредственно зависит от интенсивности плавления, а для печей с на-

¹ Данные по мощности на выводах преобразователя.

коплением расплава — также и от длительности выдержки.

При непрерывно-последовательном процессе к. п. д. η_t близок к нулю в случае если $J/J_{кр} \approx 1$, однако быстро возрастает с увеличением этого отношения, стремясь к единице при больших значениях $J/J_{кр}$. При $J/J_{кр}=2$ и сохранении тех же тепловых потерь, что и в случае $J=J_{кр}$, $\eta_t=0,75$. Таким образом, увеличение темпа процесса является действенным средством повышения η_t . Однако последнее лимитируется технической возможностью увеличения удельных мощностей ИПХТ, что зависит от используемой частоты, высоты жидкой ванны, режима обжата расплава магнитным полем, условий охлаждения холодного тигля и некоторых конструктивных факторов, а также от технологических условий кристаллизации слитка. По мере совершенствования методов плавки и конструкции ИПХТ удельные мощности будут увеличиваться. Максимально допустимые значения мощности, вводимой в садку, существенно возрастают также при улучшении электрического к. п. д. системы «холодный тигель — садка» $\eta_{эл.х.т.}$ так как звеном, лимитирующим интенсивность ведения процесса, является обычно предельная плотность потока тепла, отводимого водой от обращенной к расплаву стенки холодного тигля. С повышением $\eta_{эл.х.т.}$ предельное значение P_c увеличивается.

При плавке с накоплением металла для последующей разливки большое влияние на к. п. д. оказывает длительность выдержки, необходимой для технологических операций легирования, рафинирования и пр. Это влияние весьма различно у печей разной емкости. В тиглях малого диаметра (100 мм) ухудшение энергетических показателей с увеличением времени выдержки иллюстрируется рис. 23 и, как видно из кривых, весьма значительно. Однако с ростом диаметра тигля влияние длительности выдержки на показатели печи должно резко уменьшаться и, как показывают расчеты, например, при диаметре тигля 0,5 м, выдержке 4 мин и $\eta_t=0,50$ в период расплавления усредненное значение его за цикл составляет 0,45, а при исходном значении 0,30 снижается лишь до 0,28.

Весьма существенное значение для повышения η_t (и при непрерывно-последовательном и при садочном процессах) имеет улучшение обжата расплава электромагнитным полем (§ 5). Как видно из рис. 22, в опытных конструкциях мощность $P_{эл.х.т.}$ составляет около половины всех электрических потерь печи, причем по мере усовершенствования конструкций принципиально возможно сокращение этой величины до весьма малых значений. Резервы для повышения η_0 имеются также в улучшении магнитной связи системы «индуктор — садка» по мере увеличения масштабов печи.

Представляет также интерес промышленная проверка возможности применения изоляционных покрытий внутренней поверхности холодного тигля, предложенного А. В. Донским и Д. Г. Ратниковым [Л. 40] (с точки зрения стойкости покрытий и их влияния на чистоту расплава). Применение таких покрытий улучшает тепловой к. п. д. на несколько процентов, а главное позволяет при соответствующем выборе числа секций тигля существенно повысить электрический к. п. д.

Расчеты показывают, что в будущем по мере введения усовершенствований в конструкции, при большой

производительности ИПХТ и при технологических процессах с минимальной выдержкой, можно ожидать у печей этого типа к. п. д., приближающиеся к к. п. д. индукционных печей с керамическим тиглем [Л. 34].

Наиболее высокие энергетические показатели можно достичь введением в расплав части энергии минуя холодный тигель, например, с помощью дополнительного верхнего источника тепла (рис. 21) или подавая в тигель предварительно подогретую садку.

В зависимости от реализации возможностей повышения к. п. д. ИПХТ определится сфера их применения.

В заключение следует упомянуть об успешных опытах по плавке металла (титана) в ИПХТ под слоем шлака. При плавке со шлаком тонкий слой его осаждается на внутренней поверхности холодного тигля и изолирует последний от расплава в тепловом и электрическом отношении [Л. 42].

Плавка огнеупорных материалов и полупроводников

Полупроводники обладают электронной проводимостью, слабой при комнатной температуре, но сильно возрастающей с ростом температуры. Огнеупорные материалы (окислы, нитриды) характеризуются очень слабой проводимостью (удельное электрическое сопротивление около 10^4 Ом·м) до 1000°C . Выше этой температуры проявляется ионная проводимость; у некоторых материалов она становится значительной еще до плавления, у других — только в жидком состоянии.

Некоторые особенности индукционной плавки огнеупорных материалов. Индукционная плавка огнеупорных материалов невозможна до тех пор, пока материал не нагрет до некоторой критической температуры, при которой его электрическая проводимость становится достаточной для того, чтобы глубина проникновения тока в материал стала соизмеримой с поперечными размерами расплавляемой заготовки. Предварительный нагрев до указанной температуры называют стартовым нагревом.

Огнеупорные материалы по характеру проводимости условно можно разделить на две группы: окислы с сильной ионной проводимостью (например, окислы урана, магния), для которых критическая температура лежит в интервале $1000\text{--}1400^\circ\text{C}$, и окислы со слабой ионной проводимостью (окись алюминия, окись кальция, окись

бериллия), индукционный нагрев которых возможен только в жидком состоянии.

На рис. 25 приведены зависимости удельного электрического сопротивления некоторых окислов от температуры. Для определения критического значения температуры, т. е. значения, при котором возможен индукцион-

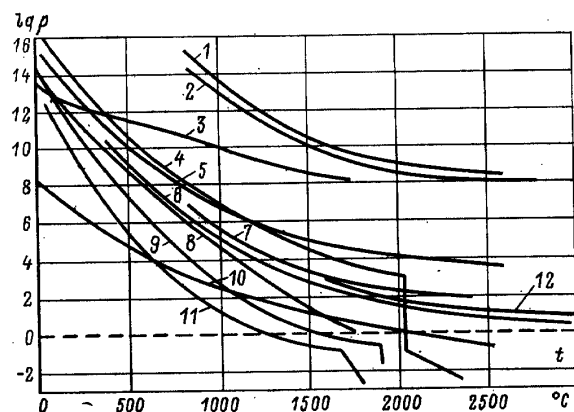


Рис. 25. Зависимость удельного сопротивления некоторых окислов от температуры.

1 — BeO ; 2 — MgO ; 3 — ThO_2 ; 4 — Al_2O_3 ; 5 — CaO ; 6 — ThO ; 7 — Y_2O_3 ; 8 — SiO_2 ; 9 — TiO_2 ; 10 — ZrO_2 ; 11 — ферриты; 12 — MgO .

ный нагрев, находят критическое значение удельного электрического сопротивления по формуле [Л. 40]

$$\rho_{\text{кр}} = D_{\text{т}}^2 f / 10^8, \quad (7)$$

где $D_{\text{т}}$ — диаметр тигля, а затем по кривым на рис. 25 находят критическую температуру нагрева соответствующего материала.

Для стартового нагрева могут быть использованы следующие методы: 1) передача тепла теплопроводностью от металлического тела, погружаемого в шихту и разогреваемого полем индуктора; 2) пропускание электрического тока через садку; 3) индукционный нагрев электропроводной составляющей многокомпонентных систем с последующим добавлением в тигель неэлектропроводных компонентов; 4) применение дополнительного внешнего источника нагрева; 5) нагрев теплом экзотермической реакции окисления металла.

Первые четыре метода не нуждаются в пояснениях. Метод нагрева за счет тепла экзотермической реакции окисления металла отличается простотой и обеспечивает чистоту продуктов реакции. Скорость протекания реакции зависит от степени дисперсности металлической фазы. Для «запуска» реакции металл должен быть нагрет до некоторой температуры (например, алюминий — до 1600 °С).

Требования к конструкции холодного тигля. При плавке полупроводящих и диэлектрических материалов и наличии неэлектропроводного гарниссажа картина протекания индуцированного тока в расплаве не отличается от таковой при плавке металла в индукционной печи с керамическим тиглем. Поскольку при этом электрическая проводимость расплава значительно меньше электрической проводимости материала тигля и индуктора, электрический к. п. д. ИПХТ при плавке оксидных материалов может быть очень высоким (превышающим 90%).

Если расплав не оказывает шунтирующего действия, число секций тигля выбирают, исходя из соображений электрической прочности зазоров. Последняя определяется следующими факторами: а) размером зазора; б) качеством изоляции в межсекционном зазоре; в) электрической прочностью газовой среды; г) конфигурацией и состоянием поверхности секций; д) температурой наружной поверхности гарниссажа.

Допустимое значение напряженности электрического поля в зазоре составляет 10^5 В/м [Л. 40]. С энергетической точки зрения целесообразнее использовать малосекционные тигли либо индукторы-тигли. Единственным преимуществом многосекционных тиглей при плавке огнеупорных материалов является уменьшение вероятности возникновения электрического пробоя.

При плавке диэлектриков удельное электрическое сопротивление твердой фазы, образующей гарниссаж, значительно больше, чем сопротивление расплава. В этих условиях слой гарниссажа прозрачен для электромагнитного поля, что способствует устойчивости гарниссажа и обеспечивает достаточную электрическую прочность межсекционных зазоров. Низкая теплопроводность гарниссажа ограничивает тепловые потери от расплава к стенке тигля. В области высоких температур (более 2500 °С), имеющих место при плавке огнеупоров, теп-

ловые потери через гарниссаж могут оказаться меньше потерь на излучение. Так, при плавке Al_2O_3 потери через гарниссаж составляют $1,4 \cdot 10^6$, а излучением $1,6 \cdot 10^6$ Вт/м² [Л. 40].

Тигли для плавки огнеупорных материалов. Названные выше особенности дают возможность использовать для индукционной плавки огнеупорных материалов трубчатые тигли, а также малосекционные холодные тигли без дополнительного изоляционного слоя.

Процесс непрерывной плавки в проходном вертикальном тигле [Л. 43] идет следующим образом (рис. 26, а). Поверх зоны плавления В, полученной внутри индуктора 3 методами стартового нагрева, из воронки 1 подается сырье в виде порошка.

Индуктор постепенно перемещается вверх, и процесс плавления захватывает слой порошка А, находящийся над жидкой ванной. Материал В, расположенный ниже зоны плавления, твердеет. В процессе плавки между расплавом и стенками тигля 2 остается слой порошка 4, что способствует извлечению готового материала из печи.

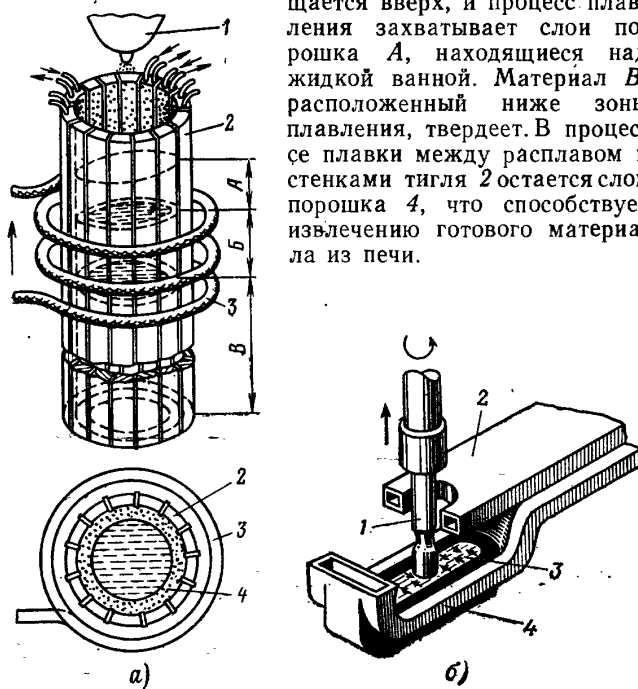


Рис. 26. Тигли для плавки огнеупоров. а — трубчатый тигель для непрерывной плавки; б — индуктор-тигель с вертикальным витком для выращивания монокристаллов из расплава.

Полное отсутствие эффекта экранирования садки тиглем может быть достигнуто при конструировании совмещении индуктора и тигля, когда индуктор выполняет одновременно функции плавильного тигля. Известно несколько вариантов выполнения индуктора-тигля. Ю. Б. Петров и А. С. Васильев [Л. 41] предложили конструкцию индуктора-тигля, показанную на рис. 26, б. Индуктор-тигель выполнен в виде установленного в вертикальной плоскости индупцирующего витка, нижний полувиток 4 которого имеет форму дюлочки, а верхний 2 снабжен отверстиями для загрузки шихты и вытягивания кристалла 1. Расплава 3 не подает в зазор между подводящими шинами, поэтому отсутствует угроза короткого замыкания индуктора.

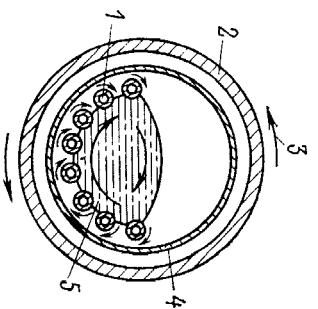


Рис. 27. Горизонтальный контейнер-дюлочка для солевой плавки подпружиненной. 1 — охлаждаемая серебряная трубка; 2 — индуктор; 3 — направление тока в индукторе; 4 — кварцевая труба; 5 — расплава.

Такая конструкция позволила применить частоты до 100 МГц. На частоте 40 МГц авторы использовали тигель для плавки ферритов (итрий-железнодорожного граната Y_3FeO_5). Были получены монокристаллы ряда ферритов. Недостатком индуктора является малый объем садки.

Метод плавки в индукторе-тигле с успехом применяется для получения промышленных огнеупоров с температурой плавления до 2600 °С. При этом для материалов с удельным электрическим сопротивлением в жидком состоянии около 10^{-2} Ом·м применяют частоты 400—500 кГц при удельной мощности 50—140 Вт/см². Диаметр полученных слитков доходит до 0,3 м. Для ванн диаметром 100 мм применялись следующие частоты: двуокись урана UO_2 —500 кГц, чистая окись алюминия Al_2O_3 —3,0 МГц, окись кальция СаО—5,0 МГц. Удельный расход электроэнергии при индукционной плавке огнеупорных материалов с температурой плавления 2000—2800 °С составляет 10—20 кВт·ч/кг.

Идея для плавки подпружиненной. Идея обработки подпружиненных материалов в холодном тигле

с целью зонной очистки и получения монокристаллов наиболее развитые получили в последние десятилетия в работах Стерлинга и его сотрудников [Л. 44]. Для этой цели используют холодные тигли вертикального и горизонтального типов, выполненные из трубок малого диаметра. Горизонтальный тигель-контейнер изображен на рис. 27.

Для выращивания монокристаллов целесообразно вертикальное исполнение холодного тигля. Тигель, имеющий форму корзинки, составленный из профилированных трубок, согнутых к узким концам для образования дна, показан на рис. 28. В таком тигле были выращены по методу Чохральского монокристаллы диаметром до 37 мм на частоте 400 кГц.

Стерлинг и Раймонд предложили осуществлять в холодном тигле получение Ge или Si термическим разложением газообразного гидроксида этих элементов при пропускании его через расплавленную загрузку Ge или Si. Исследования [Л. 44] показали, что с точки зренияצרанияний расплава наиболее подходящим материалом для тиглей, предназначенных для переплава кремния и сурьмы, является серебро. Допускается также изготовление тиглей из меди.

5. ПЛАВКА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ РАСПЛАВА НА ОПОРЕ

При плавке, кристаллизации расплавленного металла и некоторых процессах технологической обработки, а также исследованиях расплава применим метод элект-

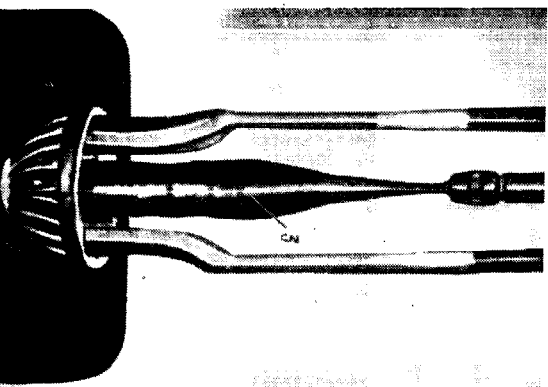


Рис. 28. Трубочатый тигель для выращивания монокристаллов. 1 — охлаждаемая трубка; 2 — дно тигля; 3 — монокристалл.

магнитного удержания расплава на опоре (ЭМУР). Сущностью этого метода является создание на боковой поверхности расплава, находящегося на твердой опоре, электромагнитных сил, направленных в глубь металла и препятствующих его стеканию с опоры. В зависимости от характера технологического процесса в качестве опоры может фигурировать шихта, расплавляемая заготовка, кристаллизующийся слиток, гарниссаж или конструкция из инородного материала, поддерживаемая при температуре достаточно низкой, чтобы исключить активное взаимодействие ее с расплавом.

Обжатие металла силами электромагнитного поля в индукционных тигельных печах, придающее верхней поверхности расплава вид выпуклого мениска, — естественный физический процесс, наблюдающийся при плавке с большими токами в индукторе. В 1952 г. было впервые предложено использовать это явление для удержания капли расплава при оплавлении в индукторе верхнего конца металлического стержня с целью испарения металла [Л. 45]. В 1961 г. во ВНИИЭТО были начаты исследования по использованию ЭМУР в индукционных печах с холодным тиглем [Л. 34], а в 1962 г. предложено было выполнение печей с различными видами электронагрева, снабженных дополнительным индуктором для ЭМУР [Л. 6]. В 1963 г. использование ЭМУР в индукционных печах было предложено также в США [Л. 46]. Разработка печей с ЭМУР для плавки промышленного характера проводилась позднее во ВНИИЭТО, а работа по созданию лабораторных устройств для физико-химических исследований с ЭМУР — с 1967 г. в Институте металлургии им. А. А. Байкова АН СССР [Л. 47].

Электромагнитное удержание расплава, аналогичное применяемому при плавке малых количеств металла, используется в последние годы для создания так называемых электромагнитных кристаллизаторов, в которых в процессе формирования слитка расплав не соприкасается с ограничивающими его телами. Работа по созданию метода и устройств ЭМУР этого назначения велась З. М. Гецелевым и др. на Куйбышевском металлургическом заводе им. В. И. Ленина [Л. 48].

Основное отличие процесса плавки с ЭМУР от плавки во взвешенном состоянии состоит в допущении контролируемого контакта расплава с определенными, ограничен-

ными по размеру поверхностями твердых тел при условиях, не вызывающих нежелательного изменения химического состава расплава. При плавке большинства металлов и сплавов в контакте с водоохлаждаемыми медными элементами конструкций загрязнение расплава практически отсутствует (см. § 4). Еще более безвредно наличие стабилизированной границы жидкого сплава с твердой фазой того же состава. Таким образом, плавильные устройства с ЭМУР, в которых предусмотрен контакт с упомянутыми материалами, приближаются по чистоте процесса к устройствам для плавки во взвешенном состоянии.

В то же время наличие опоры под расплавом позволило исключить при этом методе магнитной поддержки так называемую нижнюю особую точку, в которой расплав удерживается только силами поверхностного натяжения и являющуюся основным препятствием к увеличению массы металла, расплавляемого во взвешенном состоянии.

В ряде случаев при наличии между металлом и индуктором защитного водоохлаждаемого тигля, кристаллизатора или экрана оказывается целесообразным допустить также соприкосновение с этой конструкцией выступающих складок боковой поверхности расплава, что существенно облегчает задачу стабилизации положения расплава в тигле и позволяет значительно увеличить количество металла, удерживаемого в жидком состоянии.

В результате масса металла, удерживаемого в магнитном поле этим методом, может превышать массу взвешенной садки на несколько порядков.

В принципе не исключено применение электромагнитного обжатия металла и в случае защитного тигля из горячих керамических или иных материалов, если вызванное отрывом металла от стенок уменьшение загрязнения или сокращение тепловых потерь окажется более существенным, чем усиление этих явлений из-за сопровождающего электромагнитное обжатие усиления циркуляции.

А. Технологические особенности и области применения ЭМУР

Плавка металла с ЭМУР обладает всеми достоинствами плавки в ИПХТ (см. § 4), обеспечивает одинаковую или большую чистоту процесса и обладает следующими

дополнительными достоинствами. Поверхность расплава, контактирующая с атмосферой печи, значительно увеличивается, что ускоряет дегазацию металла при вакуумном рафинировании, а в некоторых технологических процессах может быть использовано для интенсификации активной обработки металла шлаками. Тепловые потери от расплава значительно сокращаются (иногда в несколько раз).

Области технологического применения ЭМУР еще не вполне определены. Однако в качестве наиболее перспективных можно назвать следующие: а) использование в сочетании с ИПХТ для плавки и рафинирования металлов и сплавов повышенной чистоты, а также высокорекреационных металлов и сплавов, в первую очередь — для получения мелких слитков труднодеформируемых сплавов и точного литья; б) расплавление и выдержка без загрязнения металлов и сплавов в лабораторных устройствах для высокотемпературных физико-химических исследований (см. § 9); в) кристаллизация слитков без соприкосновения жидкой фазы с твердым кристаллизатором-охладителем [Л. 48].

Б. Физические особенности процессов с ЭМУР

Мениск расплава, находящегося в сильном магнитном поле, принимает такую конфигурацию, при которой в каждой точке его объема достигается динамическое равновесие сил электромагнитного взаимодействия, гравитационных, инерции, вязкого и турбулентного трения, а также внутреннего напряжения жидкости [Л. 49]. На наружных границах расплава в балансе участвуют также поверхностные силы, создаваемые по-

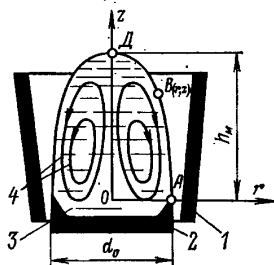


Рис. 29. Положение расплава при обжиге его магнитным полем (схема).

1 — индуктор; 2 — основание; 3 — расплав; 4 — вероятные траектории движения.

Обжиг жидкого металла магнитным полем протекает устойчиво только при четко выраженном поверхностном эффекте, т. е. при относительно высокой (для данного объема) частоте, что соблюдается практически во всех устройствах с ЭМУР. В этих условиях и при гидростатическом приближении, т. е. без учета движения металла, форма мениска определяется главным образом внешним по отношению к расплаву магнитным полем. Это поле зависит от параметров индуктора и тока в нем, а также от количества, расположения и физических свойств расплава. Связь между координатами поверхности мениска и напряженностью магнитного поля описывается с некоторыми дополнительными допущениями следующим выражением:

$$z = h_m - \frac{1}{\rho g} \left(\frac{H_{0\mu}^2}{2} \varphi_0 - p_\alpha \right), \quad (8)$$

где

$$\varphi_0 = 1 - \frac{1}{\text{ber}^2 \alpha_0 + \text{bei}^2 \alpha_0}; \quad (9)$$

ρ — плотность расплава; g — ускорение свободного падения; p_α — разность внешних давлений на поверхность расплава в точках D и B (рис. 29); μ — абсолютная магнитная проницаемость; $\alpha_0 = r_0 \sqrt{2/\Delta_0}$ — относительная частота.

Напряженность поля в точках поверхности мениска с координатами r, z при высоте мениска h_m , которую нужно обеспечить для поддержания заданной формы его, приближенно (пренебрегая влиянием разности давлений, создаваемой поверхностным натяжением, окислами и т. п.) запишется следующим образом:

$$H_{\pi} = 1,260 \sqrt{\rho g (h_m - z) / \varphi_0}. \quad (10)$$

Здесь φ_0 изменяется в зависимости от z по выражению (9) в соответствии с уравнением образующей мениска¹.

Получение необходимого распределения напряженности поля на поверхности расплава возможно в индукторах различных конструкций и размеров. На рис. 30 показаны цилиндрические столбики расплава, полученные при распределении H_0 на поверхности металла, соответствующем условию (10). В эксперименте, показанном на рис. 30,а, для удобства обзора расплава (олово) использован индуктор большого диаметра (с пониженным к. п. д.) [Л. 36]; на рис. 30,б отжаты столб расплава (алюминий) имеет диаметр 80 мм при высоте 300 мм.

Высота мениска расплава h_m (см. рис. 29) при обычном расположении его в индукторе удовлетворительно описывается выражением

$$h_m = H_{\pi A}^2 \mu \varphi_0 (2\rho g), \quad (11)$$

где $H_{\pi A}$ — значение H_{π} в точке A .

При изменении настила тока в индукторе J высота мениска изменяется пропорционально J^2 , однако лишь до тех пор, пока рост мениска не изменяет существенно геометрические соотношения в системе индуктор — расплав.

¹ Частные случаи изложены в [Л. 36, 50].

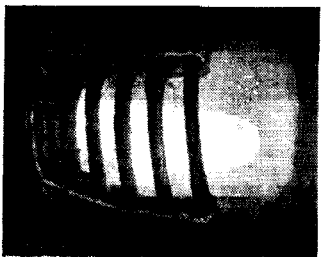


Рис. 30. Цилиндрический стержень жидкого алюминия.
а, б — при широком коническом и концентрированном индукторах соответственно.

Зависимость высоты мениска от частоты определяется характером функции φ_0 , причем в диапазоне значений относительной частоты $\alpha \geq 60$ высота мениска практически постоянна.

При ЭМУР используется вихревое поле объемных электромагнитных сил, что неизбежно вызывает циркуляцию металла, причем максимальная скорость внутри расплава примерно пропорциональна $\sqrt{I_m}$ и существенно зависит от частоты. Траектории движения расплава лежат в вертикальных плоскостях и обычно имеют одно-контурный характер (см. рис. 29), хотя при глубокой дунке не исключено образование и второго контура движения в нижней части объема.

Циркуляция расплава весьма существенна как с магнитогидродинамической, так и с технологической точек зрения. Так, поток металла, стекая по поверхности мениска от его вершины к основанию, препятствует образованию вытекающих из объема расплава струек, обособленных от него и в силу малого сечения не поддающихся воздействию магнитного поля (что вызывает существенные трудности при плавке во взвешенном состоянии). Кроме того, стекающий вниз поверхностный слой металла необходимо в районе точки А (рис. 29) направить внутрь этого объема, что при обычно применяемых частотах не может быть осуществлено одними электромагнитными силами и требует устройства механических препятствий (бортик или откос у основания и т. п.). При кристаллизации металла (формировании слитка) в плавильном устройстве с ЭМУР, а также в электромагнитном кристаллизаторе роль такого пре-

пятствия играет край конической дунки формирующегося слитка.

В некоторой степени движение металла сказывается и на форме мениска, увеличивая пологость его склонов. Интенсивная циркуляция расплава оказывает специфическое воздействие также на границу фаз при кристаллизации: она способствует уменьшению глубины дунки и устранению рыхлости сердцевинной слитка, однако в некоторых случаях может способствовать нежелательному развитию кристаллизации.

Важной характеристикой качества устройств ЭМУР являются геометрическая правильность и стабильность формы поверхности мениска. Силловому обжатию жидкого металла свойственна гидродинамическая неустойчивость, которая проявляется в возникновении нестационарных складок поверхности металла, так называемых «рифов». Эти рифы периодически появляются и исчезают, перемещаются, изменяют свою форму. Склонность к появлению рифов увеличивается с повышением напряженности магнитного поля. Поэтому образование рифов начинается с нижней кромки мениска, где H_0 больше, причем кверху глубина складок обычно уменьшается и они постепенно сходят на нет. Стабильность поверхности мениска ухудшается с понижением частоты: количество рифов увеличивается, на поверхности расплава в зоне вершины мениска появляются перемещающиеся бугры, являющиеся, видимо, результатом гидродинамического напора струй, вырасыаемых: вверх электромагнитными силами из нижней части ванны (рис. 31).

Стабильность и правильность поверхности мениска зависят при прочих равных условиях от наличия пологотельной радиальной компоненты градиента силового поля. В длинных индукторах с однородным полем обжимающие электромагнитные силы не центрируют рас-

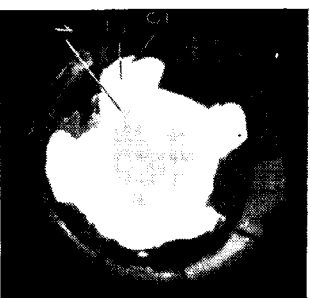


Рис. 31. Вид сверху на обжатый магнитным полем расплав с рифами (в защитном водоохлаждаемом типле).
1 — основной мениск расплава;
2 — верхушка рифа; 3 — основная рифа, соприкасающаяся с типлом.

плав, и осуществление в них ЭМУР практически невозможно. В коротких индукторах необходимая компонента градиента сил имеется, что обеспечивает некоторую центровку мениска и способствует уменьшению рифов. Для дальнейшего ослабления неустойчивости процесса возможно применение ряда средств: индукторов с неравномерными шагом и конусностью, использование остроконечной геометрии расплава [Л. 51], скрещенных полей, перемещающегося поля [Л. 52] и других методов. Вызывают значительный интерес поисковые исследования по удержанию расплавленного металла в системе распределенных проводников, каждый из которых несет функцию измерения возмущений поля и управления этим полем в своей зоне [Л. 53]. Возможности улучшения формы поверхности расплава и повышения ее стабильности еще далеко не исчерпаны.

В зависимости от технологического назначения ЭМУР требования к качеству поверхности мениска совершенно различны. Соответственно различна допустимая высота мениска (a , следовательно, и максимальная напряженность магнитного поля) и неодинаковы средства стабилизации поверхности.

В случае использования ЭМУР при плавке металла в холодном тигле, а также при обжиге металла в устройствах для высокотемпературных исследований, не требующих стабильной свободной поверхности расплава, допускается наличие рифов, а высота отжатого мениска h_m достигает 10—13 см. При выполнении защитного тигля необходимой высоты и достаточном диаметре расплава нет принципиальных препятствий к дальнейшему значительному (в 2 раза и более) увеличению высоты мениска (в процессе экспериментов при определенной геометрической конфигурации системы «индуктор—садка» наблюдалось отжатие больших масс жидкого металла с высотой мениска около 30 см).

В электромагнитных кристаллизаторах, а также в устройствах для высокотемпературных исследований, требующих постоянства свободной поверхности металла, принимают значительно меньшую высоту отжатого мениска (обычно менее 5 см) и используют средства стабилизации поверхности металла. В этих условиях рифов не допускают, защитный тигель может потребоваться только в случае аварийного нарушения режима и зачастую не применяется.

68

В. Конструктивные особенности устройств с ЭМУР.

Устройства, предназначенные непосредственно для удержания металла, встраиваются в плавильную печь или испытательную установку и сводятся к индуктирующей системе и элементам схемы ее питания. В тех случаях, когда необходимы плавление или подогрев металла, функции нагрева садки и удержания расплава возлагаются обычно на один и тот же индуктор. Если требуется независимое регулирование нагрева и силового воздействия, можно применять самостоятельные индукторы с питанием двумя разными частотами (более высокая частота — для нагрева, более низкая — для удержания) либо использовать схемы независимого питания одного индуктора токами двух частот (с соответствующими разделительными фильтрами на входе).

В электромагнитном кристаллизаторе устройство ЭМУР является основой конструкции кристаллизатора и обычно конструктивно объединяется с элементами поддачи охлаждающей среды на формируемый слиток.

Индукторы для ЭМУР весьма разнообразны по конструкции. При высоте мениска до 50 мм применимы как многовитковые, так и одновитковые цилиндрические или конические индукторы. Одновитковые индукторы выполняются с прямоугольным или овальным сечением трубки. При большей высоте мениска применяются обычно многовитковые индукторы.

Необходимое снижение напряженности поля в вертикальном направлении у поверхности расплава осуществляется в многовитковых индукторах двумя путями: за счет выполнения переменного шага витков (различная высота витков или разная ширина зазоров между ними) или за счет саморегулирующегося переменного по высоте промежутка между индуктором и расплавом. Для получения цилиндрической формы мениска многовитковые индукторы выполняются расширяющимися кверху (обычно коническими). В одновитковых индукторах происходит некоторое саморегулирование распределения тока по сечению витка, при котором в нижней части сечения, отделенной меньшим зазором от

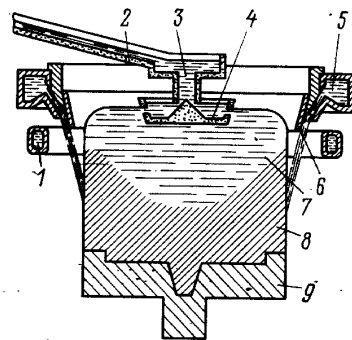


Рис. 32. Электромагнитный кристаллизатор.

1 — индуктор; 2 — подводящий лоток; 3 — емкость; 4 — плавающая чаша; 5 — коллектор; 6 — направляющий конус; 7 — расплавленный металл; 8 — слиток; 9 — поддон.

69

ссадки, концентрируется большая часть тока, а в верхней — меньшая. Это облегчает получение формы мениска, близкой к цилиндрической, но способствует возникновению автоколебаний в системе. Применяются также более сложные индуктирующие системы, в частности состоящие из нескольких индукторов с раздельным регулируемым питанием через понизительные трансформаторы. Для более тонкого регулирования распределения магнитного поля возможно применение также водоохлаждаемых экранов и разомкнутых магнитопроводов.

Индукционные вакуумные и вакуумно-дуговое плавильные устройства, указанные в табл. 2 (см. § 4), выпонены в ЭМУР.

Конструктивное исполнение кристаллизатора с ЭМУР показано на рис. 32.

Г. Энергетические соотношения

Выбор частоты магнитного поля определяет соотношение между его силовым и тепловым воздействиями на садку, а выбор напряженности этого поля — общий уровень этих воздействий.

Для устройства ЭМУР с одним индуктором в наиболее типичном случае расплава цилиндрической формы можно теоретически описать связь между высотой мениска расплава, выделением тепла и частотой следующей приближенной формулой:

$$h_m = \frac{6,41 \cdot 10^{-5} \sqrt{\gamma_0}}{\rho} \cdot \frac{1}{F_{\text{од}} \sqrt{f}} k_{\text{т.п}} P'_{\text{из}} \quad (12)$$

где $k_{\text{т.п}} = P/P'_{\text{из}}$; $P'_{\text{из}}$ и $P'_{\text{из}}$ — соответственно мощность и поверхностная плотность потока тепловых потерь с боковой поверхности мениска (излучением и конвекцией); f — частота; ρ и γ_0 — плотность и коэффициент электропроводности расплава соответственно; P — мощность (активная), передаваемая садке электромагнитным полем и расходуемая на нагрев садки и все виды тепловых потерь (излучением вбок и вверх, теплопроводностью в зонах контакта расплава с подом и стенками);

$$F_{\text{од}} = \sqrt{2} (\text{ber}'\alpha_0 \text{ber}\alpha_0 + \text{bei}'\alpha_0 \text{bei}\alpha_0) / (\text{ber}^2\alpha_0 + \text{bei}^2\alpha_0) \quad (13)$$

В выражении (12) не учитываются гидродинамические воздействия на высоту мениска, а также влияние рифов и скругления вершины мениска на выделение энергии в расплаве.

Для частного случая $k_{\text{т.п}} = 2$ при отсутствии на пути теплового потока $P'_{\text{из}}$ экранов и теплоизоляции приближенная зависимость (полагая $F_{\text{од}} \approx 1$, что допустимо при $\alpha > 6$) представлена для ряда металлов на рис. 33. Крайние кривые (для жаропрочной стали и хрома) повторены также для случая $k_{\text{т.п}} = 1$. Пользуясь рис. 33, следует обратить внимание на линейную зависимость h_m от $k_{\text{т.п}}$ в уравнении (12).

Из рис. 33 видно, что при справедливости принятых допущений при высоте мениска до 0,13 м и частоте не выше 8000 Гц плавка стали оказывается возможной при $k_{\text{т.п}} \leq 6$. В то же время плавка хрома возможна только при значении $k_{\text{т.п}}$, близком к 1. Большое

количество опытных плавов, выполненных ВНИИЭТО, показало возможность устойчивой плавки хрома при одном источнике питания с частотой 8000 Гц и $h_m \leq 130$ мм, что свидетельствует о некотором завышении значений h_m на рис. 33, складывающемся, видимо, в силу принятых выше допущений.

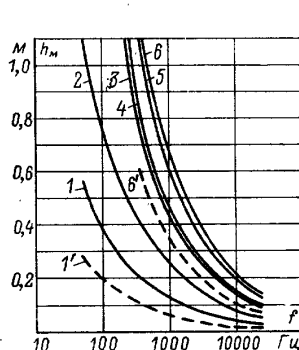


Рис. 33. Зависимость высоты металла над температурой плавления на 100 °С. 1, 1' — жаропрочная сталь; 2 — титан; 3 — цирконий; 4 — вольфрам; 5 — молибден; 6, 6' — хром; 1-6 — при $k_{\text{т.п}} = 2$; 1'-6' — при $k_{\text{т.п}} = 1$.

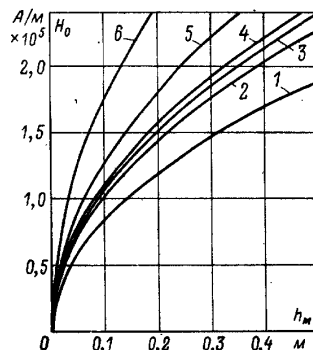


Рис. 34. Теоретические значения напряженности магнитного поля у основания мениска H_0 в зависимости от требуемой высоты мениска h_m .

1 — титан; 2 — цирконий; 3 — хром; 4 — жаропрочная сталь; 5 — молибден; 6 — вольфрам.

Тем не менее на основании рассмотренных данных можно сделать вывод о целесообразности для ЭМУР плавильного назначения применять при плавке ряда металлов (а при особо большой производительности — для всех металлов, указанных на рис. 33) частоту выше 8000 Гц или дополнительный источник энергии. В качестве такого источника можно использовать магнитное поле высокой частоты или другой вид электронагрева. По такому принципу выполнена опытная индукционно-дуговая печь типа ИКВ-0,01П1.

При удержании расплава в электромагнитном кристаллизаторе обычно не требуется подогрев расплава. В этом случае целесообразна наиболее низкая частота, допустимая с точки зрения ограничения волнистости и нестабильности поверхности расплава.

Значения напряженности магнитного поля у основания мениска расплава, необходимые для его удержания,

показаны на графиках на рис. 34 (в гидростатическом приближении).

При удержании расплава электромагнитным полем зазоры между индуктором и садкой могут быть больше обычных во избежание прикосновения расплава к индуктору или в связи с размещением внутри последнего защитного тигля. Для оценки электрического к. п. д. систем «индуктор — садка» ($\eta_{э.п.с.}$) и «индуктор—холодный тигель — садка» ($\eta_{э.п.х.т.с.}$) при повышенном зазоре ниже приводятся значения этих коэффициентов, полученные применительно к плавке жаропрочной стали при диаметре индуктора $d_{ин}$, превышающем вдвое диаметр садки d_c , и различной высоте садки h_c :

h_c/d_c	$\eta_{э.п.с.}, \%$	$\eta_{э.п.х.т.с.}, \%$
1,0	25—30	20—22
2,2	68—70	40—44

При плавке титана электрический к. п. д. несколько выше, а при плавке металлов и сплавов с большей, чем у стали, удельной электрической проводимостью, соответственно ниже указанного.

В заключение упомянем зарождающееся новое направление по использованию электромагнитного обжата расплава при выращивании профильных кристаллов кремния с так называемого «пьедестала» по методу проф. Степанова. При этом методе выращивания кристаллов можно использовать электромагнитное поле для получения жидкой зоны на вершине пьедестала и формирования вытягнутого профиля.

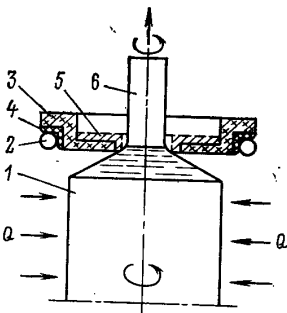


Рис. 35. Схема устройства для выращивания профильных кристаллов кремния с пьедестала.

1 — кремниевый пьедестал цилиндрической формы; 2 — индуктор; 3 — электромагнитный концентратор; 4 — изоляция; 5 — контактный формообразователь; 6 — кристалл; Q — дополнительный тепловой поток.

не фронта кристаллизации расплав отделяется от него с помощью сил электромагнитного поля.

6. СТРУЙНАЯ БЕСТИГЕЛЬНАЯ ПЛАВКА

В этом методе плавки исходный материал в виде чушек, губки, порошка или гранул прессуется в заготовки-стержни, которые затем перемещаются с определенной скоростью сквозь индуктор. В индукторе происходит оплавление конца стержня, и жидкий металл каплями или при достаточной мощности индуктора непрерывной струей стекает в изложницу или охлаждаемый кристаллизатор, образуя слиток нужного размера. Такой метод переплава может быть назван индукционным струйным (иногда его называют кафельным) бестигельным переплавом (ИСП). По назначению и схеме осуществления он полностью идентичен широко используемому в промышленности вакуумному дуговому переплаву. Однако в отличие от ВДП здесь возможна разновидность метода, когда расплавленная капля удерживается на конце электрода в течение определенного времени, необходимого для проведения соответствующих операций (например, измерений при физико-химических исследованиях). При этом должны быть обеспечены соответствующие температурные условия в оплавленном стержне (интенсивное охлаждение верхнего торца).

А. Физические особенности процесса

Нагрев и расплавление заготовки при ИСП происходит благодаря протеканию кольцевого тока по боковой поверхности заготовки на глубине, равной глубине проникновения. Поэтому оплавление стержня, перемещаемого сквозь индуктор, происходит также по боковой поверхности в отличие от ВДП, где расходуемый электрод оплавляется с торца. По мере оплавления жидкий металл стекает по заготовке и отрывается под действием силы тяжести. При этом проплавление сердцевин стержня осуществляется как за счет «размывания» ее стекающим жидким металлом, так и за счет того, что при этом оголяется сердцевина стержня и в ней наводятся кольцевые токи.

Важное значение имеет вопрос о выборе оптимальной частоты при ИСП. Использование слишком высокой частоты затрудняет проплавление сердцевин, а применение

ние низкой частоты приводит к образованию на оплавленной заготовке продольных рифов с поперечными размерами, не превышающими глубины проникновения, которые не плавятся в поле данной частоты. Оптимальное значение частоты должно определяться экспериментально в каждом конкретном случае. На практике используются частоты в диапазоне 2,5-150 кГц.

Не менее важное значение имеет соотношение мощности, вводимой в расплавляемую заготовку, и скорости перемещения заготовки в индукторе. Мощность определяется производительностью процесса, уровнем тепловых потерь излучением с боковой поверхности и потерь теплопроводностью через торец слитка. Тепловые потери излучением при ИСП могут быть уменьшены за счет применения тепловых экранов, изготовленных, например, из металлической фольги, а потери теплопроводностью можно уменьшить благодаря увеличению длины штока. Эти меры, как показывает расчет, позволяют поднять значение теплового к. п. д. подобного устройства до 0,9—0,95. Электрический к. п. д. может достигать 0,75—0,85.

Таким образом, общий к. п. д. установки для струйного переплава может иметь максимально возможное для индукционного нагрева значение, более высокое, чем при любом другом методе индукционной плавки.

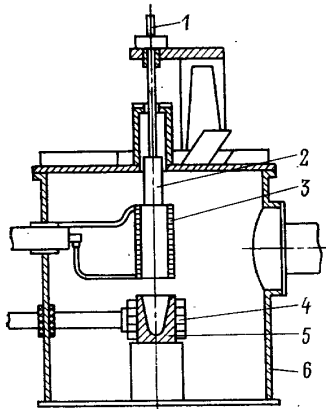


Рис. 36. Вакуумная печь для индукционного струйного переплава литого электрода.

Существенную роль при ИСП играют электромагнитные силы. Соотношение между мощностью, подводимой к индуктору, и скоростью подачи оплавленной заготовки необходимо подобрать таким образом, чтобы жидкий металл образовывался в нижней половине индуктора, результирующая аксиальная сила направлена вниз и способствует отрыву капель металла от электрода. При образовании жидкой ванны электроде в верхней половине индуктора резу-

тирующая сила направлена вверх. Это дает большие возможности для перегрева металла за счет увеличения времени пребывания жидкой ванны в индукторе. Однако при значительных градиентах напряженности магнитного поля (плавка в коротких индукторах) аксиальные силы могут приводить к выбросу расплава из индуктора. Этот эффект может быть устранен благодаря применению высоких индукторов с относительно равномерным распределением магнитного поля

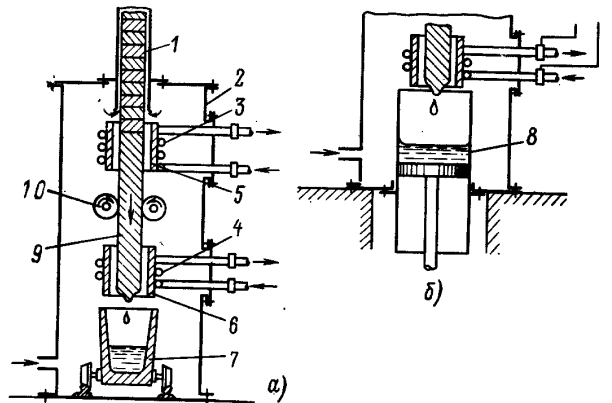


Рис. 37. Схема печи для получения слитков титана.

а - в изложнице; б - в кристаллизаторе; 1 - направляющая для брикетов; 2 - герметичная камера; 3 - верхний индуктор; 4 - нижний индуктор; 5 и 6 - защитные экраны; 7 - изложница; 8 - кристаллизатор; 9 - электрод; 10 - тянущие валки.

либо благодаря использованию более высоких частот. Электромагнитные силы вызывают циркуляцию расплава на оплавленной заготовке, что способствует рафинированию металла и ускоряет процесс ее плавления.

Б. Конструктивное оформление метода

В [Л. 55] предложена конструкция вакуумной печи для индукционного струйного переплава литого электрода (рис. 36). Печь состоит из вакуумной камеры 6 со съемной крышкой, на которой смонтирован механизм 1 подачи расходуемого электрода 2. Внутри камеры размещены плавильный индуктор 3 и индуктор 4 для перемешивания расплава при затвердевании отливки. Плавильный индуктор питается током повышенной частоты, а индуктор 4 - током промышленной частоты. Электрод 2, предварительно выплавленный в тигельной открытой или вакуумной печи, подается автоматически с заданной скоростью в индуктор 3, где происходит его оплавление.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА В СПЕЦИАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЛИ ОЧИСТКИ МАТЕРИАЛОВ

7. ПЛАВКА ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ

Наибольшую чистоту процесса обеспечивает плавка в специальном индуктирующем устройстве, в котором жидкий металл свободно висит в пространстве, удерживаемый электромагнитными силами.

Рассматриваемый метод был предложен в 1923 г. (патент Германии № 422004). Практическое развитие метод получил в результате исследований, выполненных в 60-е годы за рубежом и в СССР [Л. 57, 58].

А. Условия удержания расплавленного металла во взвешенном состоянии

Суть метода индукционной плавки во взвешенном состоянии (иначе — плавки в «электромагнитном тигле») состоит в следующем. В индуктор или систему индукторов, создающих переменное магнитное поле определенной конфигурации, помещают кусок металла, подлежащий плавлению. При достаточно большой силе взаимодействия между токами, индуцированными в металле, и магнитным полем индуктора возникает состояние парения металла в пространстве. При этом металл стремится занять зону с минимальной напряженностью магнитного поля (эту зону принято называть «потенциальной ямой»). Если мощность, подводимая к индуктору, достаточна, металл расплавляется в высокочастотном поле и продолжает парить в «потенциальной яме» без соприкосновения с какими-либо поддерживающими конструкциями.

Для устойчивого удержания расплава в магнитном поле необходимо, чтобы вертикальная составляющая результирующей электромагнитной силы была равна силе тяжести металла, а напряженность поля увеличивалась в радиальном направлении от центра к периферии.

Исследование индуктирующей системы, состоящей из двух коаксиальных витков, показало, что подъемная сила при одинаковых направлениях токов в витках значительно больше (рис. 39,а). Однако из рис. 39,а (кривая 1) видно, что в случае одинаковых направлений

Жидкий металл поступает в форму 5, в которой он подвергается воздействию поля индуктора 4.

Совмещение в одном агрегате струйной бестигельной плавки в вакууме с электромагнитным перемешиванием расплава в форме позволяет получать сплавы с однородной и мелкозернистой структурой. В результате переплава сталей в такой печи заметно повышается их пластичность и резко уменьшается содержание газов и неметаллических включений.

В [Л. 56] предложен способ производства высокорекреационных металлов, в частности титана, из прессованных брикетов путем последовательного пропускания брикетированного стержня через два индуктора, один из которых предназначен для предварительного разогрева и сваривания брикетов, а второй — для непрерывного сплавления конца стержня (рис. 37). Авторы сообщили об удачных опытах по расплавлению брикетов титана, спрессованных из губки диаметром до 45 мм при мощности каждого из индукторов 30 кВт. Жидкий металл попадает либо в изложницу (рис. 37,а), либо в кристаллизатор (рис. 37,б) с непрерывным вытягиванием слитка.

Во ВНИИЭТО был изготовлен и испытан макетный образец индукционной печи, предназначенной для струйного переплава заготовки с промежуточным холодным тиглем (рис. 38). Печь позволяет провести дополнительное легирование и дегазацию металла, получить равномерное распределение компонентов сплава в слитке благодаря мощному перемешиванию в промежуточном тигле, а также расплавить не проплавившиеся куски заготовки.

Успешное осуществление метода индукционного струйного переплава по любой из описанных выше схем требует автоматического регулирования процесса плавки. Такой регулятор создан во ВНИИЭТО.

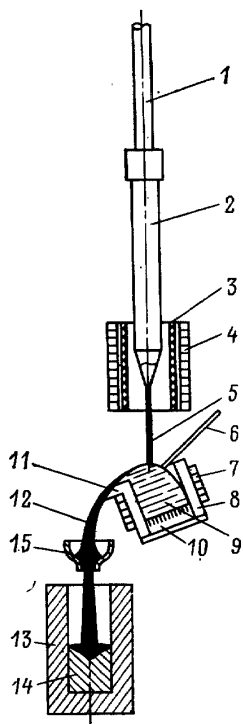


Рис. 38. Схема индукционной печи для струйной плавки с промежуточным холодным тиглем.

1 — шток; 2 — заготовка; 3 — электрокорундовая труба; 4 — плавящий индуктор; 5 — струя расплава; 6 — пруток лигатуры; 7 — индуктор; 8 — холодный тигель; 9 — столб расплавленного металла; 10 — холодное основание; 11 — сливной носок; 12 — струя расплава; 13 — изложница или водоохлаждаемый кристаллизатор; 14 — слиток; 15 — керамическая воронка.

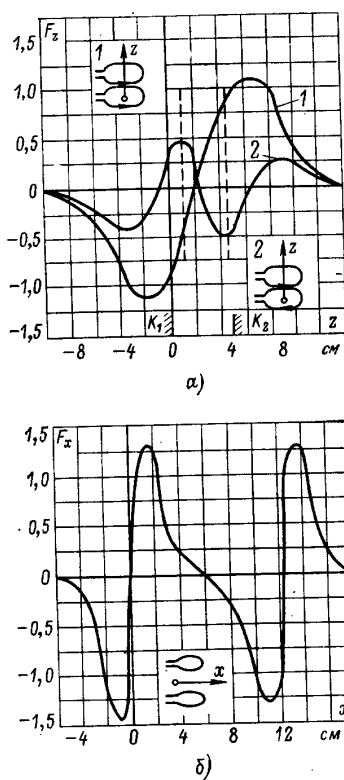


Рис. 39. Распределение относительной подъемной силы по вертикали (а) и относительной радиальной силы от местоположения сферы в горизонтальной плоскости (б).

силам поверхностного натяжения сплава. Наибольшую стабильность имеет система, обладающая свойством, что центры кривизны поверхностей раздела лежат не в проводящей среде, а в пространстве за ее пределами [Л. 52]. При этом расплав принимает форму звезды с сужающимися к концу лучами (рис. 40).

токов равновесие неустойчиво. В случае противоположных направлений токов в катушках имеет место устойчивое равновесие, так как в этом случае при выходе металла из положения равновесия вверх или вниз возрастает электромагнитная сила, направленная в противоположную сторону и стремящаяся вернуть расплав в исходное положение. Из рассмотрения рис. 39, б видно, что в горизонтальной плоскости подвеска также устойчива.

В силу вихревого характера поля независимо от конструкции индуктора существуют зоны ослабленного поля, а также так называемые «особые линии» или точки, в которых сила тяжести жидкого металла не может быть уравновешена электромагнитным давлением. При этом невозможно избежать «щелей» в нижней части электромагнитного тигля. Жидкий металл удерживается в взвешенном состоянии не выливается через «щели» лишь благодаря

Экспериментальные исследования [Л. 57] показали, что жидкий металл будет висеть, если глубина проникновения поля Δ , меньше или равняется радиусу кривизны поверхности в нижней точке его объема r_n , определенному из выражения

$$\rho gh = 2\sigma(1/r_n - 1/r_v). \quad (14)$$

Минимальную частоту, обеспечивающую висение жидкого металла в индукторе, $f_{\text{мин}}$ можно определить из выражения

$$f_{\text{мин}} = \rho \gamma^2 h^2 / 4\pi \sigma^2 \quad (15)$$

В выражениях (14) и (15) введены дополнительно следующие обозначения: σ — коэффициент поверхностного натяжения расплава; h , r_n , r_v — высота и радиусы кривизны в нижней и верхней точках расплава соответственно.

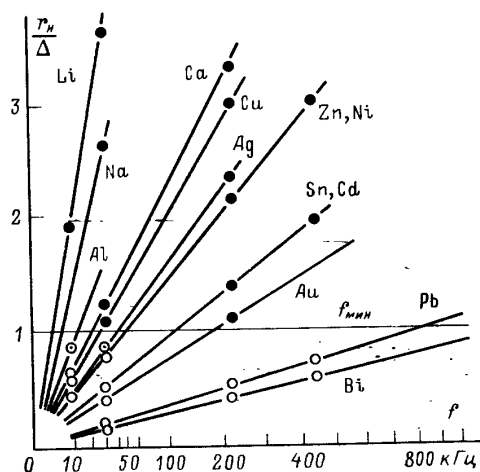


Рис. 41. К возможности удержания металла во взвешенном состоянии в полях разных частот.

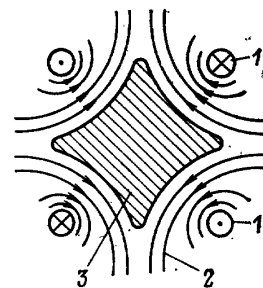


Рис. 40. Остроконечная геометрия жидкого металла в магнитном поле.

1 — индуктирующие витки; 2 — силовые линии; 3 — жидкий металл.

Возможность удержания различных металлов в жидком состоянии в полях разных частот иллюстрируется рис. 41. Ниже горизонтали $r_H/\Delta=1,0$ удержание возможно, выше — металл не висит.

Б. Выделение тепловой энергии в садке

Взаимосвязь между взвешивающей силой и мощностью, передаваемой в расплав, P_c для случая поверхностного проникновения электромагнитной волны получена в [Л. 57]:

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu \gamma_0}{\pi f}} A P_0. \quad (16)$$

Безразмерный коэффициент A характеризует обжатию расплава полем: чем больше обжатие, тем меньше коэффициент A , и наоборот. Для металла, не обжатого полем (только поддерживаемого полем снизу) он максимален и равен единице. Для тела, сильно обжатого полем, коэффициент A может стремиться к нулю (практически не удается получить его меньшим 0,2). При бесстигельной плавке изменение подводимой к индуктору мощности приводит к изменению положения тела в индукторе, что в свою очередь изменяет конфигурацию поля, взвешивающую силу и мощность выделяющуюся в теле. Тем не менее, поскольку в реальных рабочих индукторах положение взвешенного тела задано условиями работы, для каждого конкретного типа индуктора коэффициент A можно считать постоянным. Для некоторых типов индукторов значения этого коэффициента приведены в [Л. 57].

Одной из основных особенностей, ограничивающих область применения метода, является органическая связь между условиями удержания расплавленного металла во взвешенном состоянии и установившимся значением температуры.

В установившемся режиме мощность, передаваемая в расплав, равна мощности, теряемой поверхностью металла за счет излучения и конвекции. Таким образом, при заданных температуре и массе садки однозначно определяется необходимое значение коэффициента A . При $A=0,2 \div 0,4$ рекомендуется применять индуктор с обратным витком, а при $A=0,6 \div 0,95$ — индуктор-лодочку [Л. 57]. Для ряда металлов с относительно низкой температурой плавления, например таких, как Na, Cd,

80

Zn, Sn, Pb, не удается подобрать параметры поля, обеспечивающие получение температуры, близкой к температуре плавления, так как в поле, способном удержать эти металлы в жидком состоянии, $t_{уст} \gg t_{пл}$. Кроме того, на стандартных частотах серийных генераторов и для ряда других металлов не всегда удается получить температуру, близкую к температуре плавления.

В принципе существует возможность разделения силового и теплового воздействия магнитного поля благодаря применению для питания индуктора двух различных частот: высокой (греющей) и более низкой (держатель). При плавке относительно легкоплавких металлов двухчастотное питание неприменимо, так как уже держательное поле перегревает эти металлы выше температуры плавления. Для более тугоплавких металлов, таких, как Mn, Ni, Ca, Fe, Ti, V, Zr, Nb, Mo, при объеме жидкого металла около $0,3 \text{ см}^3$ рекомендуется в качестве держатель использовать частоту 70 кГц. Тогда нижний предел регулирования температуры будет $1000-1400^\circ \text{C}$. Для Ta и W рекомендуется использовать держатель частоту 220 кГц. Практическое применение двухчастотного питания затруднено из-за малых габаритов индуктирующих систем, необходимости фильтрации различных частот, а также из-за опасности возникновения бийений, снижающих устойчивость парения жидкой капли.

В ряде случаев для тугоплавких металлов необходимая температура может быть получена за счет введения дополнительного обогрева садки электронным лучом [Л. 58].

Снижение температуры металла до $t_{уст} \approx t_{пл}$ в некоторых случаях может быть достигнуто путем интенсивного обдувания его инертным газом.

В. Конструктивное исполнение устройств

В результате теоретических и экспериментальных работ было установлено, что взвешенную каплю удается стабилизировать в индуктирующей системе, состоящей из двух коаксиальных катушек, расположенных одна над другой, причем направления токов в катушках противоположны. Эта система подвески (рис. 42,а) оказалась весьма эффективной.

Известно большое количество конструкций индукторов для электромагнитной подвески металла, например в виде прямого или изогнутого по дуге соленоида

6-64

81

(рис. 42, б), система катушек, которая обеспечивает, помимо подвески, вращение тела (рис. 42, а), катушек с сердечником из немагнитного металла (рис. 42, в) и пр. В [Д. 57] описаны типы индукторов с минимальным количеством витков, питаемых большим током при низком напряжении, что обеспечило им значительно более вы-

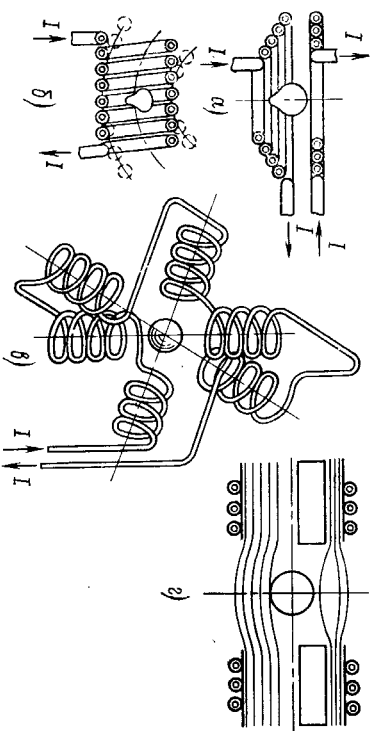


Рис. 42. Индукторы для взвешенной плавки металла. а — система соленоидов, обеспечивающих вращение металла; б — катушка с немагнитным сердечником.

сокую надежность в условиях вакуума. Это индуктор-лодочка (рис. 43, а), индуктор с обратным витком (рис. 43, б) и индуктор с короткозамкнутым витком.

Индуктор-лодочка представляет собой систему из двух витков, поставленных рядом друг с другом на ребро, причем направление тока в одних витках противоположно как одинаково. В индукторе с обратным витком в лодках двух соседних проводниках текут противоположно

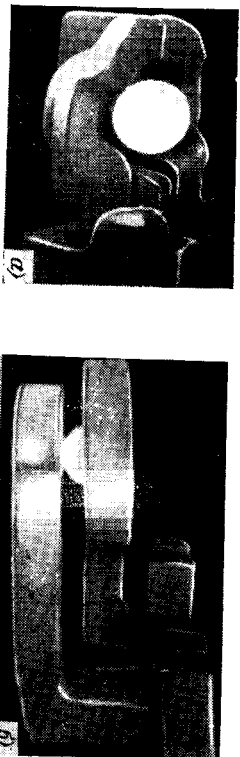


Рис. 43. Взвешенная плавка в индукторе-лодочке (а) и индукторе с обратным витком (б).

направленные токи. Конструктивно он может быть выполнен из двух отдельных витков, расположенных друг над другом и включенных параллельно (индуктор с параллельным обратным витком) или последовательно (индуктор с последовательным обратным витком).

В практике часто применяется аналогичный индуктор, у которого верхний виток заменен короткозамкнутым витком, в котором течет индуцированный ток.

Г. Установки для плавки металлов во взвешенном состоянии

Установки, разрабатываемые в СССР лабораторией высоко-частотной электротермии ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР и находящиеся в эксплуатации, позволяют плавить во взвешенном в электромагнитном поле состоянии различные металлы в количестве 8—15 г и получать слитки диаметром 6 и длиной до 50 мм или замораживать металл во взвешенном состоянии. Используя индукторы различных конструкций, можно плавить металлы с температурой плавления до 3000 °С. Во многих случаях указанные количества удовлетворяют исследователей — физиков и металлургов. Одна из последних разработок этой лаборатории — 27-позиционная установка позволяет быстро получать материал, необходимый для построения диаграмм состояния, так как допускает выполнение большого количества плавок без перезарядки камеры. Плавка производится в вакууме, в защитной атмосфере, в окислительной или восстановительной среде. Объем плавильной камеры 30 л. В установке может быть использована любой из описанных выше типов индукторов. На рис. 44 показаны внутренняя часть плавильной камеры с индуктором с обратным витком.

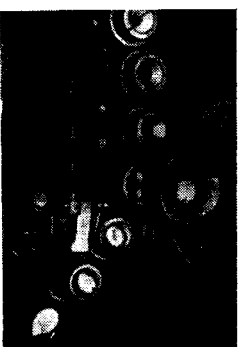


Рис. 44. Внутренняя часть плавильной камеры 27-позиционной установки для плавки во взвешенном состоянии.

При некоторых физико-химических исследованиях, особенно в тех случаях, когда необходимо иметь минимальный объем плавильной камеры, в качестве последней используют кварцевые колбы или кварцевые трубы, помещаемые внутрь индуктора. При этом образуются условия работы индуктора, расположенного вне вакуума. Такие установки очень просты и могут быть изготовлены исследователями лабораториями своими силами.

В заключение отметим, что трудности увеличения массы жидкого металла, удерживаемого во взвешенном состоянии, принципиальны, и пока не видно рациональных путей их устранения. Однако это не препятствует развитию этого метода как нового лабораторного инструмента. В этом отношении метод достаточно хорошо разработан

и может быть рекомендован к широкому использованию в лабораториях, изучающих новые сплавы.

8. ЗОННАЯ ПЛАВКА

А. Основные технологические процессы

Понятие «зонная плавка» охватывает совокупность методов, позволяющих перераспределять растворимые добавки или примеси в кристаллических веществах.

Важнейшей областью применения зонной плавки является очистка материалов. При зонной очистке через образец перемещаются одна или несколько расплавленных зон. Примеси движутся либо вместе с зонами, либо в противоположном направлении. При этом они концентрируются на одном конце образца, а другой конец его очищается. Степень очистки тем выше, чем больше число проходов, и при увеличении числа проходов приближается к пределу. Зонная очистка может быть использована как для удаления из образца вредных примесей, так и для концентрирования нужных примесей.

Кроме того, важной операцией, выполняемой методами зонной плавки, является регулируемое введение требуемой примеси в кристалл. Зонное выравнивание позволяет почти полностью устранить сегрегацию примесей в обработанном материале. Часто оба метода — зонной очистки и зонного выравнивания — используются совместно, например в производстве полупроводниковых (в частности монокристаллических) материалов, поскольку от последних нередко требуется, чтобы они обладали совершенным кристаллическим строением и наряду с этим содержали заданное количество примесей. Процесс зонного выравнивания известен меньше, чем зонная очистка, однако он также находит промышленное применение.

Существует еще одна разновидность зонной плавки, получившая название зонной плавки с градиентом температуры. Жидкая зона здесь имеет форму листочка, проволоочки или точки с минимальными размерами порядка сотых долей миллиметра. Примесь в зоне содержится в очень высокой концентрации, так что зона становится жидкой при температуре гораздо ниже температуры плавления твердого вещества. Перемещение зон создается не движением нагревателя, а действием постоянного градиента температуры, создающегося в сечении загруз-

ки. Эта разновидность зонной плавки используется для бестигельного выращивания монокристаллов, изучения диффузии в жидкостях и измерения ее скорости, для получения *p-n* и *n-p-n* переходов в полупроводниках. Она уникальна в том отношении, что позволяет создавать области проводимости ничтожных размеров или самой сложной формы внутри полупроводящего кристалла.

Во многих случаях процессы зонной плавки совмещаются с получением заданной кристаллической структуры слитка, в том числе монокристаллической.

Использование метода для глубокой очистки различных металлов оказалось также весьма успешным.

Б. Физические особенности метода

Способность зоны перераспределять примеси обусловлена главным образом процессами на затвердевающей поверхности.

Если примесь понижает температуру плавления растворителя, то ее концентрация в затвердевшей части будет меньше, чем в жидкой. В этом случае примесь будет отгесняться затвердевающим веществом и собираться в жидкой зоне. Если примесь повышает температуру плавления растворителя, то ее концентрация в затвердевшей части будет больше, чем в жидкой, а сама жидкость будет обедняться примесью.

Эффективность процессов зонной плавки определяется двумя факторами: характеристиками используемой аппаратуры (длина и количество зон, число проходов, методы нагрева и охлаждения и т. п.) и характеристиками обрабатываемого вещества. Важнейшей характеристикой материала является эффективный коэффициент распределения-примесей $k = c_{тв}/c_{ж}$, который представляет собой отношение концентрации примеси в затвердевающей фазе $c_{тв}$ к ее концентрации в расплаве $c_{ж}$. Коэффициент k может быть больше или меньше единицы в зависимости от того, повышает или понижает примесь температуру плавления растворителя.

Задача создания и сохранения жидкой зоны при зонной плавке сводится к установлению на узком участке стержня максимальной температуры, превышающей температуру плавления твердой фазы, и сохранению холодных участков с температурой ниже температуры плавления твердой фазы по обе стороны от этого участка. Исключение составляет зонная плавка с гра-

диентом температуры, при которой в зоне не устанавливается максимальная температура.

Наиболее универсальным методом получения расплавленной зоны при зонной плавке металлов и полупроводников является индукционный метод нагрева. Он позволяет проводить очистку как в вакууме, так и в любой защитной атмосфере и позволяет исключить загрязнение обрабатываемого материала, обеспечивает высокую концентрацию подводимой мощности.

Как правило, для зонной плавки используются высокие частоты: 200 кГц — 5 МГц. Минимальная электрическая проводимость обрабатываемого материала составляет приблизительно $10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

При индукционном методе нагрева существует по крайней мере три способа осуществления зонной плавки: 1) в неохлаждаемом контейнере; 2) в охлаждаемом контейнере; 3) бестигельный.

Первый способ пригоден лишь для веществ с низкой температурой плавления. Плавка в охлаждаемом контейнере рассмотрена в § 4. Ниже рассматривается третий из упомянутых методов зонной плавки. Он осуществим в двух видах: при вертикальном и горизонтальном перемещении жидкой зоны.

В. Вертикальная бестигельная плавка

Метод вертикальной бестигельной зонной плавки, или, иначе, метод плавающей зоны, был впервые описан в 1953 г. В этом методе кольцевой нагреватель или индуктор создает расплавленную зону, которая удерживается на месте силами поверхностного натяжения (рис. 45, а). Этот метод широко применяется при получении и обработке кремния и часто используется в лабораторных исследованиях тугоплавких металлов, полупроводниковых материалов и различных неорганических соединений [Л. 62].

Если формирование жидкой зоны при вертикальной бестигельной зонной плавке происходит без участия электромагнитных сил, то жидкий металл под действием сил поверхностного натяжения принимает форму, показанную на рис. 45, б—г, а максимальная высота устойчиво удерживаемой зоны определяется выражением

$$l_{\text{макс}} \approx 2,8 \sqrt{\sigma/\rho g}, \quad (17)$$

где σ — поверхностное натяжение расплава; ρ — плотность; g — ускорение свободного падения.

Верхнего предела диаметра зоны теоретически не существует, однако при увеличении диаметра возникают серьезные трудности, связанные с неустойчивостью жидкой зоны.

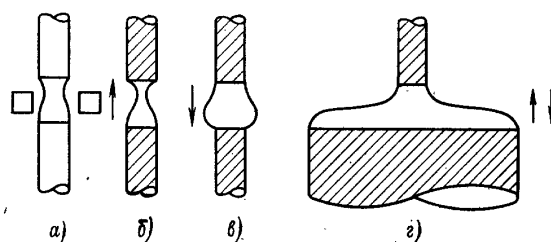


Рис. 45. Схема вертикальной бестигельной зонной плавки (а) и устойчивые формы расплавленных зон: при движении вверх (б), при движении вниз (в), при движении вверх и вниз (г).

При индукционном методе нагрева используется электродинамическое взаимодействие между током, подводимым в жидкой зоне, и магнитным полем индуктора, что позволяет снять ограничение (17) по высоте зоны и увеличить диаметр обрабатываемого материала, не снижая устойчивости зоны.

Для концентрации энергии на небольшом участке вертикального стержня применяют обычно следующие типы индуктирующих систем: низкий индуктор с минимальным количеством витков; плоский многовитковый индуктор-спираль (рис. 46, а); индуктор с противовитками или короткозамкнутыми витками, расположенными над и под индуктором; многовитковый индуктор 1 в сочетании с разрезным концентратором магнитного поля 2 (рис. 46, б).

Неравномерность нагрева, вызываемая несимметричностью конструкции индуктора, устраняется вращением заготовки вокруг вертикальной оси.

Экспериментальное исследование на моделях некоторых индукторов, используемых при зонной плавке при условии ярко выраженного поверхностного эффекта, описано в [Л. 60].

Некоторые результаты исследований приведены на рис. 47. По оси ординат отложены значения настила тока в относительных единицах, по оси абсцисс — относительные расстояния по образующей цилиндра $\xi = z/[2b(a-1)]$, где z — расстояние по образующей от центра витка; b — диаметр стержня; a — отношение диаметров индуктора и стержня.

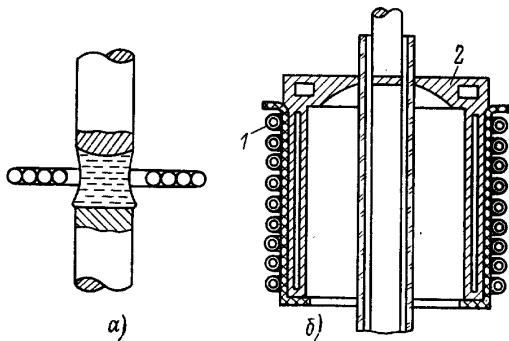


Рис. 46. Индуцирующие системы для вертикальной бестигельной зонной плавки.
а — плоский многovitковый индуктор; б — многovitковый индуктор с концентратором.

Анализ кривых на рис. 47 показывает, что с точки зрения создания минимальной высоты зоны оптимальным является одновитковый индуктор минимального диаметра ($a \rightarrow 1$) с минимальным сечением индуктирующего витка. Тот же эффект может быть достигнут в системе с короткозамкнутым и обратными витками, но они обладают существенно меньшим к. п. д.

В настоящее время предложен ряд методов, позволяющих значительно повысить устойчивость расплавленной зоны благодаря использованию силового воздействия электромагнитного поля на расплав. На практике используются следующие методы:

Применение подпорного индуктора [Л. 61]. Метод заключается в использовании, помимо основного (плавильного) индуктора, дополнительного («подпорного») индуктора, расположенного непосредственно под основным. Электромагнитные силы, создаваемые подпорным индуктором, должны уравновешивать внутреннее металлостатическое давление. Требования к такому индуктору идентичны требованиям, предъявляемым к индукторам для электр-

магнитного удержания расплава на опоре (см. § 5). Практика показывает, что для большинства полупроводниковых и металлических материалов при диаметре образца в несколько сантиметров наиболее подходящими для питания подпорного индуктора являются частоты звукового и ультразвукового диапазонов.

Подбор конфигурации плавильного индуктора. Усилить стабилизирующее действие индуктора можно и на основной (плавильной) частоте, если выполнить его таким образом, что будут удовлетворены перечисленные в § 5 требования. В [Л. 59] предложено выполнять плавильный индуктор в виде многovitковой

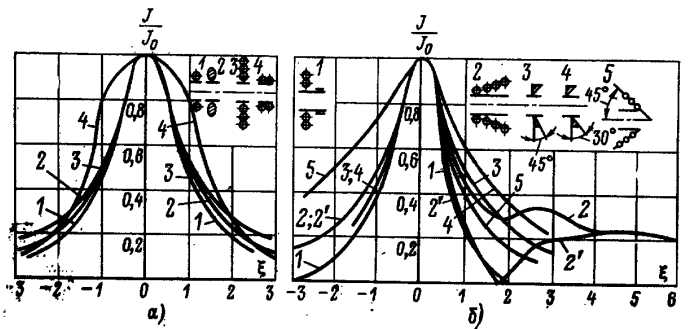


Рис. 47. Результаты экспериментального исследования распределения настила тока в цилиндре для симметричных (а) и несимметричных (б) индуктирующих систем (кривая 2 — для согласного, 2' — для встречного включения одновиткового и трехвиткового индукторов).

катушки, витки которой расширяются кверху с целью создания необходимого градиента магнитного поля по высоте. Однако применение таких индукторов в установках для зонной плавки затруднено, тем более что это ведет к увеличению высоты зоны.

Применение бегущего магнитного поля. Для увеличения устойчивости расплавленной зоны при зонной плавке слитков больших сечений Ю. Э. Недзвецкий и В. И. Добровольская (ВНИИТВЧ) предложили использовать бегущее магнитное поле. В этом случае между двумя или более силовыми индукторами, создающими бегущее магнитное поле в стержне, располагается нагревательное устройство, например плавильный индуктор, питаемый от другого генератора. Для получения оптимальных режимов можно регулировать соотношение между токами и угол сдвига между ними.

Комбинированный метод. Целесообразно использовать систему, в которой подпорный индуктор осуществляет силовой подпор, а его сочетание с плавильным индуктором создает бегущее поле. В этом случае для создания бегущего поля к плавильному индуктору подводят питание от двух генераторов, используя развязывающий фильтр.

Использование продольного пинч-эффекта. Дополнительные силы сжатия, содействующие устойчивому удержанию

растопленной зоны, могут быть получены путем пропускания тока (постоянного или переменного) через стержень. Взаимодействие тока, протекающего через стержень, с собственным магнитным полем создает обжимающее электромагнитное давление, так называемый «продольный пинч». При значительной плотности тока (порядка сотен ампер на квадратный сантиметр) это давление может превышать давление, обусловленное поверхностным натяжением. Предельный ток ограничен значением, при котором температура стержня несколько ниже температуры плавления. Этот метод позволяет увеличить длину зоны примерно в 1,5 раза.

Г. Горизонтальная бестигельная зонная плавка

Суть этого метода состоит в следующем. Образец, жестко закрепленный в держателях, размещен горизонтально. Вдоль образца пропускают постоянный ток. В месте создания расплавленной зоны накладывают постоянное магнитное поле, направленное горизонтально и перпендикулярно оси образца (рис. 48,а). Подбирая

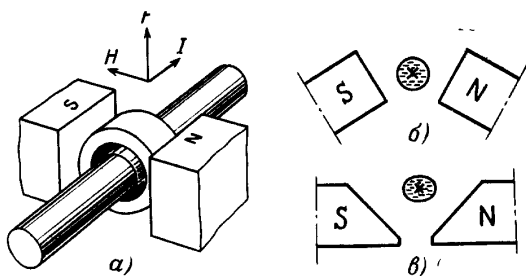


Рис. 48. Магнитная поддержка зоны при горизонтальной бестигельной плавке.
а — с горизонтальными; б — расположенными под углом; в — со скошенными полюсами.

ток I и напряженность магнитного поля H , можно полностью уравновесить силу тяжести. Расплавление рабочей зоны осуществляют при помощи специального независимого нагревателя. Трудность обеспечения устойчивости расплавленной зоны при этом методе сохраняется. Установлено, что устойчивость зоны можно увеличить путем создания магнитного поля, напряженность которого уменьшается в вертикальном направлении. Такое поле можно получить между двумя полюсами магнита, расположенными ниже оси стержня и под углом друг к другу (рис. 48,б), или между скошенными

полюсами (рис. 48,в). В этом случае расплав принимает в поперечном сечении форму овала и устойчив в вертикальном направлении.

Эксперименты [Л. 82] показали, что при повышении чистоты процесса (устранение окисных плен) устойчивости зоны ухудшается. Так, при зонной плавке жидкой олова диаметром 8 мм длина устойчивости жидкой зоны оказалась равной: на воздухе — 60 мм, в среде азота 20 мм, в вакууме 0,1 Па — 13 мм. Описанный метод пока не нашел широкого применения.

Д. Перемешивание расплава в зоне

Эффективность процесса зонной очистки в значительной степени зависит от перемешивания расплава в зоне. Конвективные потоки в жидкости значительно уменьшают толщину диффузионного слоя у фронта кристаллизации. Это увеличивает допустимую скорость перемещения зон в некоторых случаях на порядок.

Можно выделить следующие характерные виды перемещения:

1. Под действием магнитного поля плавильного индуктора имеет место естественная двухконтурная циркуляция с плоскостью симметрии, проходящей через середину индуктора, однако интенсивность ее обычно недостаточна.

2. При наличии подпорного индуктора, который всегда смещен относительно плоскости симметрии зоны и питается более низкой частотой, чем греющий индуктор, преимущественно выражен верхний контур движения, причем общая интенсивность движения повышается.

3. При наличии бегущего поля управление интенсивностью и характером циркуляции обеспечивается в максимальной степени; изменяя соотношение между токами в индукторах и угол сдвига фаз между ними, можно управлять не только скоростью движения, но и его направлением; циркуляция металла в зоне одноконтурная.

4. При горизонтальной очистке цилиндрического слитка Пфафном и Дорси предложено создавать циркуляцию за счет взаимодействия постоянного тока, пропускаемого вдоль слитка, с внешним магнитным полем; накладываемым перпендикулярно оси слитка на конце зоны. Для зонной очистки алюминия применялось также перемешивание вращающимся магнитным полем при частотах 50 и 400 Гц.

Е. Установки для вертикальной бестигельной зонной плавки

Во ВНИИТВЧ разработан ряд установок для индукционной бестигельной плавки полупроводников.

Серийно выпускается установка типа «Кристалл ЕМ» («Кристалл-105»), предназначенная для бестигельной зонной плавки кремниевых стержней диаметром до 30—35 мм с целью очистки и выращивания монокристаллов в вакууме или газовой среде. Установка снабжена

системой задания и автоматического поддержания заданного диаметра слитка с точностью $\pm 0,1$ мм и видео-контрольным устройством, а также автоматической системой стабилизации напряжения на индукторе, обеспечивающей точность $\pm 0,2\%$ при колебаниях напряжения в сети $\pm 10\%$.

В последнее время разработана и выпускается серийно установка типа «Кристалл-106».

9. ПЛАВКА ПРИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В физико-химическом эксперименте надежные и хорошо воспроизводимые результаты могут быть получены лишь при обеспечении условий его проведения, исключающих влияние побочных факторов на его результаты; в частности при исследованиях расплавленных металлов — загрязнений металла футеровочными материалами.

Индукционные тигельные печи как открытые, так и вакуумные находят широкое применение в лабораторной практике при исследовании металлов с температурой плавления до 1500°C . Однако при 1600°C и выше практически все известные материалы в той или иной степени взаимодействуют с расплавом, оказывая значительное и трудно учитываемое влияние на изучаемые свойства.

Метод зонной плавки используется в производстве чистых веществ и прецизионных сплавов, а также для получения образцов с заданным распределением компонентов, для выравнивания состава монокристаллических образцов, разделения близких по свойствам компонентов для концентрирования малых количеств примесей в аналитических целях и пр. Зонная плавка используется в качестве метода физико-химического анализа [Л. 62] с целью определения равновесных коэффициентов распределения, построения линий ликвидуса и солидуса, определения предельной растворимости, составов эвтектик и перитектик, фазового состава многокомпонентных систем, давления диссоциации разлагающихся соединений, построения диаграмм состояний и пр.

Такие исследования, как раскисление, определение активностей компонентов в жидких металлах путем установления равновесия с газовой фазой и вообще исследования, связанные со взаимодействием металла с газом

целесообразно проводить методом плавки во взвешенном состоянии или плавки с удержанием расплава электромагнитным полем (ЭМУР), так как эти методы обеспечивают максимальную реакционную поверхность.

Метод холодного тигля может быть применен для переплава тугоплавких и агрессивных металлов и приготовления образцов для физико-химических исследований при температурах, близких к температуре плавления металла, для приготовления компактного металла из порошков, для зонной перекристаллизации, для вытягивания монокристаллов, для физико-химических исследований в системах металл — газ и металл — шлак, для изучения фазовых переходов и пр.

Применение холодного тигля позволит проводить исследования в области кристаллизации металлов, а также исследования процессов развития химической неоднородности в слитке при различных внешних условиях. Метод холодного тигля может быть применен при исследовании различных физических воздействий (тепловых, электромагнитных и т. п.) на процессы кристаллизации слитка, т. е. в тех конструкциях, где холодный тигель может выполнять функции кристаллизатора.

Наибольшее применение в высокотемпературных физико-химических исследованиях нашел метод взвешенной плавки.

А. Применение плавки во взвешенном состоянии

В [Л. 63] описана опытная установка, на которой были измерены упругость пара железа чистотой 99,9, содержащего 0,002% кислорода и 0,003% азота, и растворимость в нем азота при 2000°C . Использовались образцы железа массой 2,8—3,5 г. Работу проводили на ламповом генераторе ЛГЗ-30 с частотой 230 кГц и мощностью 30 кВт. Аналогичная установка [Л. 64] применена для исследования физико-химических реакций процессов, протекающих в системе металл — шлак, по методу последовательного насыщения. Однако количества шлака в системе [всего $(5-10) \cdot 10^{-4}$ кг] не хватает для определения состава химическим путем. Поэтому в таком виде метод может быть применен, если для анализа состава фаз будут использованы радиоактивные изотопы.

В [Л. 65] определяли растворимость водорода в жидком железе, алюминии и ряде других металлов с использованием взвешенной плавки. Авторы отмечают, что преимуществом этого метода являются доступность всей поверхности металла для газа и интенсивное перемешивание жидкой ванны, что способствует быстрому достижению равновесия в системе. Недостатком метода является ограниченная возможность регулирования температуры расплава (всего на $50-70^\circ\text{C}$). Известен также ряд других исследований с использованием плавки во взвешенном состоянии.

В [Л. 66] изложен метод определения растворимости кислорода в жидких тугоплавких металлах, использующий индукционную капельную плавку (с удержанием капли расплавленного металла на тонком слое твердого гарниссажа). Метод был применен для плавления вольфрама и молибдена в атмосфере с парциальным давлением кислорода до 10^4 Па. Авторы считают, что этот метод исследования взаимодействия газов с металлами имеет ряд преимуществ перед плавкой во взвешенном состоянии.

Б. Установки для физико-химических исследований с ЭМУР

Метод плавки с удержанием расплава электромагнитным полем в значительной степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к плавильным устройствам для высокотемпературных исследований металлических расплавов. Результаты предварительных исследований позволяют рекомендовать этот метод для использования в металлургическом эксперименте, в частности в следующих случаях [Л. 47].

Измерение упругости пара жидких металлов. Для этих измерений применяется ряд методов, в частности метод испарения с открытой поверхности в вакууме — метод Лэнгмюра и диффузионный метод Кнудсена. Использование в первом методе ЭМУР позволяет увеличить точность измерений и сократить время эксперимента благодаря значительному количеству конденсата, обеспечиваемому развитой поверхностью и интенсивным перемешиванием расплава. Использование ЭМУР в методе Кнудсена исключает влияние упругости пара материала тигля на результат измерений, а также значительно ускоряет достижение равновесия в системе.

Исследование растворимости газов в металлах при высоких температурах. В этом случае необходимо обеспечить отсутствие газообразования в зоне контакта расплава с другими материалами и минимальное газовыделение из элементов. Эти условия наилучшим образом удовлетворяются при плавке во взвешенном состоянии и с ЭМУР.

Исследование взаимодействия металлов с газами. Печь для горячей экстракции должна обеспечивать минимальное газоотделение от ее внутренних частей при рабочих температурах. С этой точки зрения наиболее приемлемы индукционные печи с ЭМУР с вынесенным индуктором, которые позволяют умень-

шить так называемую «холостую» поправку на 1—2 порядка. Достоинством метода являются также доступность всей свободной поверхности металла для газа и быстрое достижение равновесия в системе. Метод ЭМУР является предпочтительным также при анализе образцов с малым содержанием газов и трудно экстрагируемыми газами.

Исследование физико-химических процессов в системе металл—шлак. Сочетание ЭМУР с разрезным охлаждаемым тиглем создает условия для длительного удержания металла в жидком шлаке при развитой реакционной поверхности и отсутствии взаимодействия металла и шлака с тиглем. Метод позволяет иметь значительное количество шлака в системе, достаточное для проведения химического анализа. Большое количество расплава позволяет организовать отбор проб и изучать кинетику процесса на одной загрузке.

Для изучения некоторых свойств расплавленных металлов разработаны лабораторные установки с использованием метода плавки с электромагнитным удержанием расплава.

Установка для анализа газов, растворенных в металлах. Основным недостатком устройств для анализа газов в металлах, использующих метод взвешенной плавки, является необходимость использования масс-спектрометра, который является дорогостоящим прибором и требует значительных затрат времени при работе с ним. (Количества газов, выделяющихся при плавлении образца ограниченной массы во взвешенном состоянии, недостаточно для их определения более простыми методами). Устройство, показанное на рис. 49, устраняет указанный недостаток и позволяет использовать хроматографический метод анализа газов. Устройство работает следующим образом. Отросток 2 прозрачной камеры 1 загружают образцами, на опору 5 также помещают образец, всю систему герметизируют и откачивают до давления порядка $0,01$ Па, после чего ее изолируют от вакуумного поста. Затем образец расплавляют с помощью индуктора 6 и обдувают расплав 7 из сопла 10 потоком газа-носителя, что в комбинации с интенсивным электромагнитным перемешиванием металла создает хорошие условия для экстракции из него газов. После обдува газовую смесь направляют на

анализ, а опору 5 с помощью сильфонного узла 4 медленно опускают, индуктор выключают и механизмами перемещения 8 переводят остывший образец в отросток 3, а из отростка 2 на опору перемещают очередной образец.

Установка для измерения поверхностного натяжения металлических расплавов. При использовании ЭМУР удается повысить точность измерений при высоких температурах благодаря обеспечению равномерного температурного поля в исследуемом объеме металла, а также обеспечить возможность введения добавок и отбора

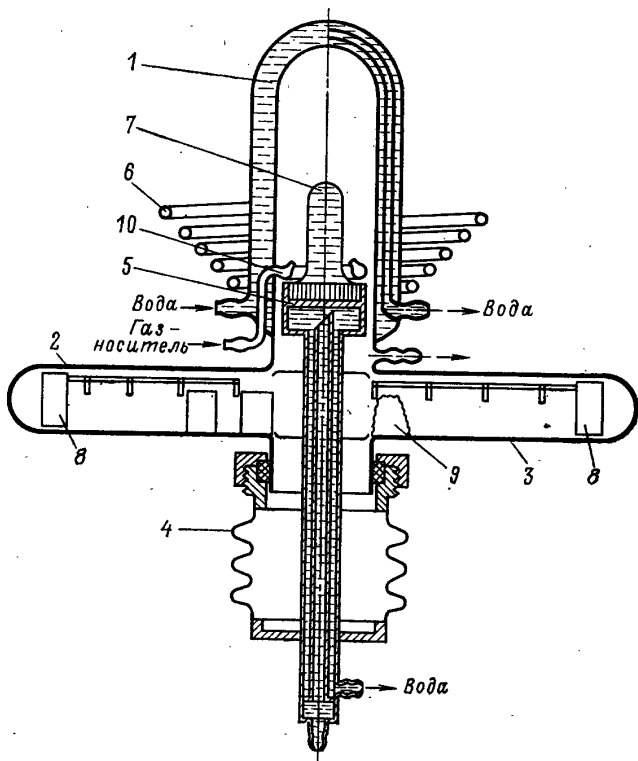


Рис. 49. Лабораторная установка для анализа газов, растворенных в металлах.

проб в процессе эксперимента. Установка схематически показана на рис. 50. Изучаемый металл, сплав или компоненты сплава произвольной формы загружают на водоохлаждаемую подставку 1, камеру 3 вакуумируют и создают в ней контролируемую атмосферу. С помощью индуктора 2 расплавляют металл и формируют расплав 7 в виде цилиндрического столба. Соответствующим расположением экрана 5 устраняют влияние электромаг-

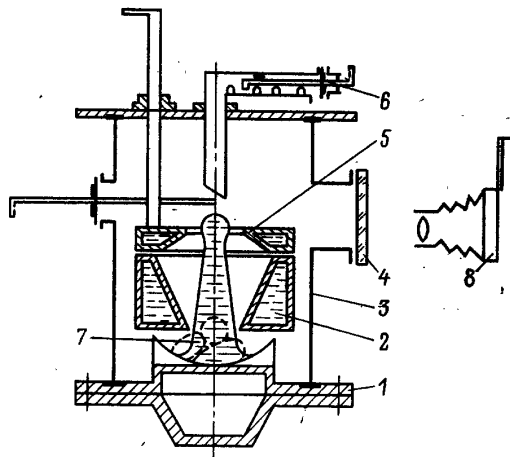


Рис. 50. Установка для измерения поверхностного натяжения металлических расплавов.

нитных сил на верхнюю часть жидкого столба. Фиксируют изображение мениска столба через стекло 4 фиксатором изображения 2 и рассчитывают поверхностное натяжение по известной методике. Для получения концентрации зависимости из дозатора 6 в расплав вводят соответствующие добавки и измерения повторяют.

Установка для измерения скорости ультразвука в расплавах металлов. Используемые в настоящее время устройства для измерения скорости ультразвука (УЗ) в металлических расплавах имеют ряд недостатков, в частности ненадежность акустического контакта между расплавом и волноводами по причине плохого

смачивания расплавом материала волноводов и коррозия волноводов в металлах, обусловленная агрессивностью последних при высоких температурах.

В установке с использованием ЭМУР (рис. 51) исследуемый металл или сплав 1 удерживают в виде столба на охлаждаемой опоре 3, имеющей тот же химический состав, что и исследуемый расплав. Нагрев расплава обеспечивается индуктором 2. Опора имеет водяное охлаждение 6 и выполняет функции волновода. На

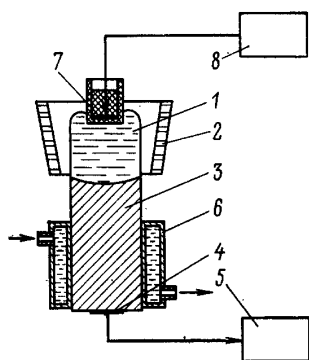


Рис. 51. Устройство для измерения скорости ультразвука в расплавах.

ее нижнем торце укреплена пьезопластина 4, предназначенная для регистрации времени прохождения УЗ-импульса через расплав. Для возбуждения УЗ-колебаний в расплаве устройство имеет плоскую катушку индуктивности, выполненную из тугоплавкого металла, закрепленную в стаканчике 7 из тугоплавкого диэлектрика (алунда). Стаканчик погружен в верхнюю часть столбика расплава. К катушке подводят высоковольтные импульсы УЗ-частоты от генератора 8 в результате чего в поверхностном слое расплава непосредственно под катушкой создается переменное электромагнитное поле той же частоты и индуцируются вихревые токи. Взаимодействие вихревых токов с полем катушки приводит к возбуждению в поверхностном слое расплава упругого импульса сжатия. Импульс УЗ продольной волны распространяется в глубь металла, проходит через нижний волновод — опору и вновь преобразуется в электрический импульс с помощью укрепленной на ней пьезопластины 4. Этот импульс регистрирует электронная аппаратура 5. Показания измерителя времени прохождения УЗ-импульса вдоль акустического тракта получают при различной глубине погружения в металл стаканчика с катушкой индуктивности. Скорость УЗ определяют как отношение перемещения катушки индуктивности к изменению времени прохождения УЗ-сигнала.

Для бесконтактного измерения скорости УЗ расплавленный металл удерживают электромагнитным полем на водоохлаждаемой опоре в виде плоского столба (параллелепипеда) между двумя катушками индуктивности. С помощью высоковольтного генератора создают в одной из катушек индуктивности импульсы тока УЗ-частоты. Взаимодействие вихревых токов с полем первичного тока и обжимающим полем силового индуктора приводит к возбуждению упругих импульсов сжатия в поверхностном слое металла. Импульсы УЗ продольной волны распространяются вглубь перпендикулярно поверхности металла. На противоположной стороне столба благодаря взаимодействию с аксиальным полем индуктора УЗ-импульс преобразуется в электрический в приемной катушке индуктивности. Электронная аппаратура регистрирует время прохождения импульса через исследуемый расплав, а фоторегистратор фиксирует толщину металлического столба в момент озвучивания, что позволяет определить скорость УЗ. С целью получения максимального сигнала при бесконтактном возбуждении высоковольтный импульс на генерирующую катушку подают в тот момент, когда напряженность основного магнитного поля, возбуждаемого индуктором, имеет амплитудное значение.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПЛАВКА С КОМБИНИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ НАГРЕВА

Иногда использование лишь одного метода нагрева не может полностью удовлетворить все требования технологии. В этих случаях оказывается целесообразным применение комбинированных источников нагрева. К настоящему времени наметились различные варианты использования комбинированных методов и установок; некоторые из них описаны ниже.

Индукционно-дуговой нагрев. Комбинация индукционного капельного и последующего вакуумного дугового переплава предложена в печи [Л. 67], показанной на рис. 52.

Из мелкой шихты, поступающей из бункера 1, непосредственно в печи прессуется электрод (заготовка) 2, который затем оплавляется в индукторе 3. Закристал-

лизовавшийся в промежуточном устройстве 4 слиток 5 переплавляется в кристаллизаторе 6 с помощью электрической дуги.

Индукционно-дуговая электропечь с холодным тиглем и расходным электродом объединяет определен-

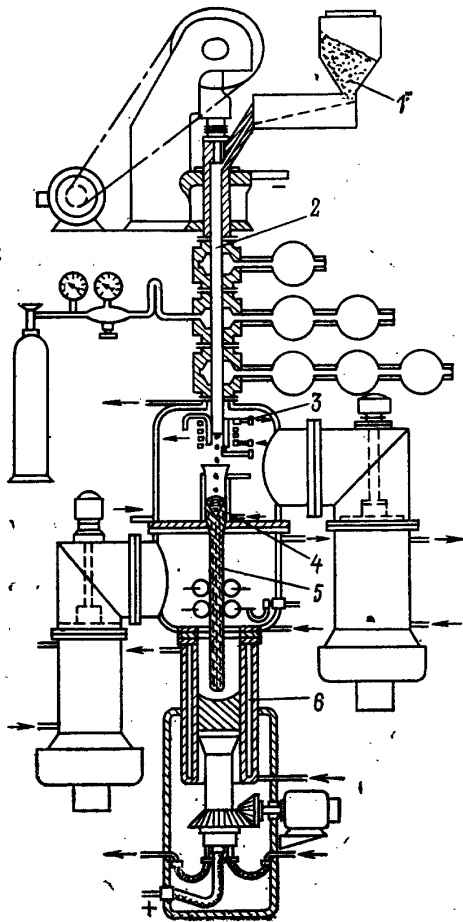


Рис. 52. Печь для индукционно-дугового переплава мелкой шихты.

ные положительные качества как индукционного, так и дугового методов нагрева.

Работа печи такого типа исследована во ВНИИЭТО на действующей модели с емкостью тигля 5 кг. Эксперименты на стали и хrome показали, что столб расплава, обжатый электромагнитным полем плавильного индуктора, не теряет устойчивости при воздействии на него электрической дуги (в опытах ток дуги составлял 2000 А). В то же время показана возможность устойчивого горения дуги на вершину столба расплава при наличии сильного магнитного поля.

Результаты экспериментальных исследований позволили создать опытно-промышленную вакуумную индукционно-дуговую печь с холодным тиглем типа ИКВ-0,01ПИ (см. рис. 22).

Индукционно-плазменный нагрев. С целью снижения продолжительности расплавления металла, а также для интенсификации обработки расплава рафинирующими шлаками при индукционной плавке был опробован способ выплавки стали в герметизированной индукционной печи, заполненной инертным газом с дополнительным нагревом поверхности металла плазменной горелкой [Л. 68]. Емкость печи 250 кг, диаметр тигля 250 мм, высота 780 мм, мощность, подаваемая на индуктор, 130 кВт, мощность плазмотрона 70 кВт, несущий газ — аргон. Качество металла, полученного в такой печи, сравнимо с качеством металла, выплавляемого в вакуумных печах.

Индукционно-электрошлаковый нагрев. Значительно интенсифицировать процесс очистки металла от вредных примесей в индукционных печах промышленной частоты позволяет использование электрошлаковой обработки чугуна. При этом на зеркало металлической ванны наводится флюс, который расплавляется и перегревается за счет выделения тепла при прохождении электрического тока через жидкий шлак. Ток подводится с помощью нерасходуемых электродов, один из которых вставляется в днище при набивке тигля, а другой опускается сверху на расплав, либо оба электрода устанавливаются в верхней части тигля над расплавом.

Описанная схема, сочетающая плавку и перегрев металла с его обработкой высокоосновным перегретым до 1600—1800°C шлаком, была опробована, в частности, на печи ИЧТ-1 [Л. 3]. В результате интенсивного пере-

мешивания металла время обработки минимально. Изменяя напряжение, подаваемое на шлаковую ванну, можно регулировать температуру шлака в широких пределах, обеспечивая тем самым оптимальные условия для рафинирования чугуна.

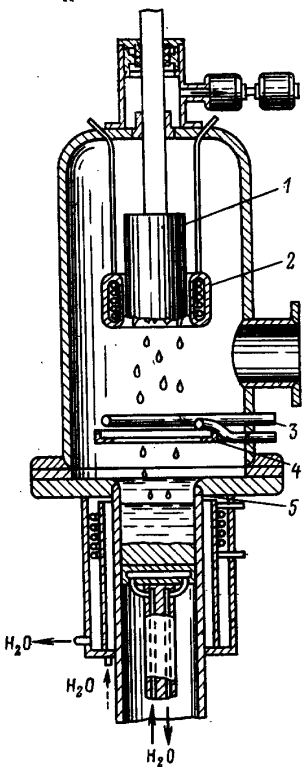


Рис. 53. Вакуумная печь для индукционного переплава заготовки с электронно-лучевым подогревом металла в кристаллизаторе.

Индукционно-электронный нагрев. В ряде случаев оказывается целесообразным совмещение индукционного и электронного методов нагрева в активной зоне при одновременной работе обоих источников. При этом может превалировать тот или другой вид нагрева. Так, при индукционной плавке в охлаждаемом тигле большую часть мощности можно вводить с помощью электронного нагрева, оставив за индукционным методом в основном функции перемешивающего устройства. Это позволяет поднять к. п. д. печи с холодным тиглем. При плавке металла в печи с керамическим тиглем может превалировать индукционный нагрев, а электронный луч при этом используется для интенсификации процессов рафинирования переплавляемого металла.

Электронно-лучевой нагрев используют при плавке во взвешенном состоянии тугоплавких металлов. Использование магнитного поля только для удержания образца в жидком и твердом виде в сочетании с нагревом его электронным лучом дает возможность увеличить интервал непрерывного регулирования температуры переплавляемого образца.

Схема печи, сочетающей два последовательных процесса: индукционный струйный переплав заготовки и электронно-лучевой подогрев жидкого металла в кристаллизаторе, показана на рис. 53 [Л. 69]. Заготовку 1 подают непрерывно с постоянной скоростью в плавильный индуктор 2, где происходит оплавление ее торца. Расплавленный металл поступает в виде капель в кристаллизатор 5. Над кристаллизатором установлен кольцевой катод 3, эмиттирующий электроны, которые с помощью специального устройства 4 фокусируются на поверхности металла.

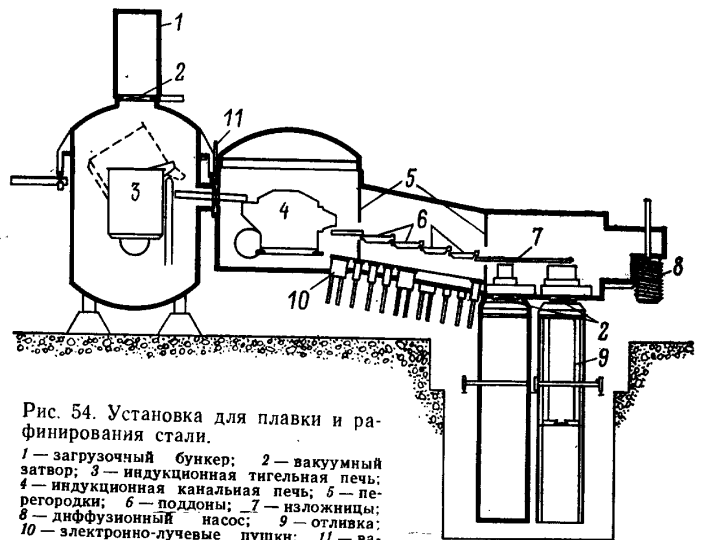


Рис. 54. Установка для плавки и рафинирования стали.

1 — загрузочный бункер; 2 — вакуумный затвор; 3 — индукционная тигельная печь; 4 — индукционная каналная печь; 5 — перегордки; 6 — поддоны; 7 — изложницы; 8 — диффузионный насос; 9 — отливка; 10 — электронно-лучевые пушки; 11 — вакуумный затвор.

На заводе фирмы Эрке Темескол (США) смонтирована комбинированная промышленная установка для плавки и рафинирования стали (рис. 54), которая может работать в непрерывном режиме [Л. 70].

Индукционная плавильная печь мощностью 4 800 кВт на частоту 60/180 Гц размещена в цилиндрической камере. При непрерывной работе в печи оставляют «болото» 5 т и вводят еще 10 т металла. По окончании обработки (длительность 2 ч) расплав по желобу переливается в печь выдержки, установленную в смежной камере.

Печь выдержки индукционная канальная, емкость 16,5 т, мощность 300 кВт, частота 60 Гц. Как и плавильная печь, она снабжена датчиком массы. Из этой печи расплав переливается в устройство рафинирования. Начиная с этого устройства, для поддержания температуры используется электронно-лучевой нагрев.

Устройство рафинирования выполнено в виде каскада из пяти поддонов, изготовленных из меди. Длина каждого поддона 1200 мм, ширина 500 мм. При передвижении металла по каскаду из него удаляется большая часть газов, тяжелые включения оседают на дно поддонов, а легкие нерастворимые вещества поднимаются на поверхность, где задерживаются заслонками. Толщина перемещающегося слоя расплава около 25 мм, скорость движения 24 м/ч.

Под поддонами размещены 18 электронно-лучевых пушек мощностью 150 кВт с отклонением луча на 270°, которые для поддержания заданной температуры расплава должны иметь поверхностную мощность по ванне металла около 833 кВт/м². При рафинировании металла в установке можно производить отбор проб. Наличие вакуумного спектрометра, позволяет производить анализ 25 элементов в течение 1,5 мин.

Пройдя по поддонам, металл поступает в последнюю камеру, где выливается в литниковые чаши, а оттуда — в изложницы непрерывной разливки. Медленно и непрерывно стекающий металл подогревается двумя электронно-лучевыми пушками мощностью 150 кВт, что предотвращает образование в верхней части слитка усадочных раковин и ликвации. Вакуум, поддерживаемый в зонах рафинирования и разливки, равен 0,7—1,3 и 0,01—0,1 Па соответственно. Установка позволяет выплавлять слитки массой 9 т и диаметром 625 мм, а также заготовки квадратного сечения размером 600×600 мм со скругленными углами. Кроме того, таким способом можно будет получать слябы сечением 155×900 мм массой 7,2 т. Предварительные исследования показали, что происходит эффективное удаление растворенных в металле газов, улучшаются такие характеристики металла, как вязкость и коррозионная устойчивость, улучшаются механическая прочность, свариваемость, пригодность к холодной штамповке.

Использование индукционных печей в полунепрерывных и непрерывных процессах будет расширяться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. М., «Энергия», 1967. 415 с.
2. К. Брокмайер. Индукционные плавильные печи. М., «Энергия», 1972. 303 с.
3. Шумихин В. С., Лузан П. П., Жельнис М. В. Синтетический чугун. Киев: «Наукова думка», 1971. 150 с.
4. Мильман Б. С., Бложко Н. К., Горшенков А. Н. Металлургические возможности плавки чугуна в индукционных электропечах промышленной частоты. Научно-техн. информация о работах ЦНИИТмаш № 315, ОНТИ ЦНИИТмаш, 1970. 4 с.
5. Antoine J., Sauvage F., Bonis P. Principaux resultats du four a induction a canal d'acieric. — «Methode et construction mecanique», 1971, vol. 103, № 4, p. 192—197.
6. Тир Л. Л. Электропечь для плавки металлов. А. С. № 309957 (СССР). Опул. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1971, № 23.
7. Тир Л. Л. Основные положения теории оптимизации режимов движения для серий индукционных тигельных печей. — Труды ВНИИЭТО. «Исследования в области промышленного электронагрева». М., «Энергия», 1972, вып. 5, с. 98—108.
8. Continuous melting in horizontal induction furnace. — «Electrical Review», 1971, vol. 188, № 9, p. 273—274.
9. Schlatte R. Fortschritte im Vakuumschmelzen von Werkstoffen für die Luft- und Raumfahrt. — «Vacuum-Technik», 1969, v. 18, № 2, S. 31—40.
10. Столов М. Я. Исследование и разработка устройств электромагнитного управления движением металла в индукционных тигельных печах. Автореф. дис. на соиск. учен. степени кандидата техн. наук. М., 1970. 25 с. (ВНИИЭТО).
11. Производство стали и сплавов в вакуумных индукционных печах. М., «Металлургия», 1972. 192 с. Авт.: Г. Н. Окоороков, А. Г. Шалимов, В. М. Антипов и др.
12. Hegewaldt F. Der Induktionstiegelofen, ein umwelt — und betriebsfreundliches Schmelzaggregate. — «Elektrowärme-Kongress Warschau 72», Brown Boveri, F. R. G., 1972.
13. Тир Л. Л. Методика исследования магнитогидродинамических и массообменных характеристик индукционных тигельных электропечей. — Труды ВНИИЭТО, «Исследования в области промышленного электронагрева». М., «Энергия», 1972, вып. 5, с. 81—92.
14. Aymard J. P. Emploi du four a arc UPH en fonderie. — «Journal Du Four Electrique», 1970, № 8, p. 206—208.
15. Трофимов М. Т. Футеровка индукционных печей. М., «Металлургия», 1968, 285 с.

16. Лейканд М. С. Вакуумные электрические печи. М., «Энергия», 1968. 228 с.
17. Простяков А. А. Индукционные нагревательные установки. М., «Энергия», 1970, 119 с.
18. Гитгарц Д. А., Иоффе Ю. С. Новые источники питания и автоматика индукционных установок для нагрева и плавки. М., «Энергия», 1972. 100 с.
19. Брокмайер К., Хинц М. Самая крупная германская плавильная установка повышенной частоты. — «VBC-Nachrichten», 1961, v. 43, № 7—8, S. 413—420.
20. Оуэн. Современные способы автоматического регулирования электропечей. Доклад № 151 на VI Международном конгрессе по электротермии. Брайтон, 1968.
21. Вакуумная индукционная электропечь СКБ-6087 для рафинирования олова. — «Электротермия», 1969, вып. 90, с. 5—6. Авт.: В. С. Чердиченко, Ю. Н. Новиков, А. С. Микулинский и др.
22. Тир Л. Л., Кочеткова Г. Я. Движение расплавленного металла в индукционной тигельной плавильной печи. — «Электротермия», 1964, вып. 40, с. 21—23.
23. Mikelonis P. J. Cupola-channel induction furnace duplexing for ductile iron production. — «Modern Casting», 1970, v. 57, № 4, p. 59—61.
24. Dean F. Iron melting... a proper perspective. — «Foundry», 1969, vol. 97, № 6, p. 174—177.
25. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1968. 496 с.
26. Полншук В. П. и др. Магнитодинамическая установка для заливки алюминиевых сплавов. — «Литейное производство», 1971, № 4, с. 17—19.
27. Tama M., Shearman W. E. Submerged resistor type induction furnace and methods and process therefore. Патент США № 3.092.623, 1963.
28. Severs M. J. Electric melting in iron foundries. — «The British Foundryman», 1970, vol. 63, № 1, p. 15—22.
29. Gayet B. Induction melting process of central core portion of cylindrical shaped refractory materials. Патент США № 3.351.686, 1964.
30. Коган М. Г. Индукционная плавка в гарниссаже. — «Теплофизика высоких температур», 5, 1967, № 3, с. 485—491.
31. Mühlbauer A. Materialfragen beim rüchten hochreinen, einkristallinen Siliziums aus «kalten» Tiegeln. — «Elektrowärme», 1966, Bd. 24, № 10, S. 367—374.
32. Schipperleit G. H. Induction furnace. Патент США № 3.223.519, 1957.
33. Сюре. Вакуумные и электроннолучевые печи. — Доклад № 161 на V Международном конгрессе по электротермии, г. Стреза, 1963.
34. Тир Л. Л., Чайкин П. М., Никольский Л. Е. Индукционные плавильные печи с холодным тиглем. — «Электротермия», 1968, вып. 73—74, с. 68—71; 1969, вып. 79, с. 33.
35. Тир Л. Л., Фомин Н. И., Чайкин П. М., Никольский Л. Е. Экспериментальное исследование энергетических характеристик индукционных печей с холодным тиглем. — Труды ВНИИЭТО, «Исследования в области промышленного электронагрева». М., «Энергия», 1968, вып. 3, с. 110—118.

36. Фомин Н. И. Исследование и разработка индукционных печей с холодным тиглем для плавки металлов и высокотемпературных физико-химических исследований. Автореф. дис. на соиск. учен. степени кандидата техн. наук. М., 1971 (ВНИИЭТО).
37. Результаты работ по созданию индукционных печей с холодным тиглем и электромагнитным обжатием расплава. — В кн.: VI Всесоюзное научно-техническое совещание по электротермии и электротермическому оборудованию. Индукционный нагрев. М., Информ-электро, 1973, с. 42—43. Авт.: Л. Л. Тир, А. Л. Губченко, Н. И. Фомин и др.
38. Донской А. В., Ратников Д. Г. Об использовании охлаждаемых тиглей в индукционных печах. — «Электротермия», 1963, вып. 3, с. 3—6.
39. Ратников Д. Г. Индукционный нагрев полых разностенных тел. — «Электричество», 1963, № 6, с. 50.
40. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. Холодные тигли. М., «Металлургия», 1972. 112 с.
41. Петров Ю. Б., Васильев А. С. Тигель-индуктор. А. С. № 185492 (СССР). Опубл. в бюлл. «Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1966, № 17.
42. Schwartz N. B., Irving B. R. Why the sudden surge in refining? — «Iron Age», 1969, vol. 204, № 23, p. 67—78.
43. Reboux J. High frequency induction currents and their utilization in the field of very high temperatures. — «Steel», 1965, vol. 156, № 8, p. 38—42.
44. Sterling H. F., Warren R. W. High temperature melting without contamination in cold crucibles. — «Metallurgia», 1963, vol. 67, № 404, p. 301—307.
45. Bancraft G. H. Vacuum coating process and apparatus therefore. Патент США № 2.584.660, 1952.
46. Bunshah K. F. Method and apparatus for induction melting. Патент США № 3.243.493, 1966.
47. Фомин Н. И., Тир Л. Л., Вертман А. А. Использование индукционных плавильных устройств с холодными тиглями и электромагнитным обжатием расплава для высокотемпературных физико-химических исследований. — «Электротермия», 1971, вып. 110, с. 20—22.
48. Непрерывное литье с формированием слитка электромагнитным полем. Науч. техн. бюлл. «Технология легких сплавов», 1970, № 4, с. 3—5.
49. Тир Л. Л. Обжатие расплава электромагнитным полем в плавильных электропечах. — «Магнитная гидродинамика», 1971, № 1, с. 138—144.
50. Фомин Н. И., Тир Л. Л. Обеспечение заданной конфигурации расплава, удерживаемого магнитным полем на опоре. — В кн.: Материалы 7-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике. Рига, «Зинатне», 1972, с. 178—175.
51. Найденов А. Ф. Проблема увеличения количества тяжелой проводящей жидкости, удерживаемой в электромагнитном тигле. — В кн.: Вопросы магнитной гидродинамики, т. III. Рига, «Зинатне», 1963, с. 327—338.
52. Жежерин Р. П. Проблема «электромагнитного тигля». — В кн.: Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы. Рига, Изд-во АН Латв. ССР, 1959, с. 279—287.

53. Губарев В. Ф., Паславский Е. С. Устойчивое удержание жидкого металла при помощи распределенной системы автоматического управления. — В кн.: Материалы 7-го Рижского совещания по магнитной гидродинамике. Рига, «Зинатне», 1972, с. 176—180.

54. Артышевский П. П., Кравецкий Д. Я., Затуловский Л. М. Исследование процесса выращивания профильных кристаллов кремния с пьедестала. — Изв. АН СССР, Сер. физич., 1971, т. 35, № 3, с. 469—472.

55. Орешников З. А., Гречин В. П., Мняев Б. Ф., Сальников Г. Д. Бестигельное вакуумное индукционное устройство». А. С. № 133593 (СССР), 1960. Оpubл. в «Бюлл. изобретений и товарных знаков», 1960, № 22.

56. Bohnet W. Y., Begly G. D. Drip-melting of refractory metals. Патент США № 2.866.700, 1954.

57. Фогель А. А. и др. Оптимальные параметры устройства для плавки металлов во взвешенном состоянии. — «Изв. АН СССР. Металлы», 1968, № 2, с. 138—145.

58. Фогель А. А., Коркин И. В. Плавка металлов во взвешенном состоянии при электроннолучевом нагреве. — «Изв. АН СССР. Металлы», 1969, № 3, с. 67—71.

59. Rummel T. Vorrichtung zum tiegellosen Zonenschmelzen von Halbleiterstäben und Verfahren zu deren Betrieb. Pat., № 1.212.495, (ФРГ).

60. Ратников Д. Г., Добровольская В. И. Исследование некоторых индукционных систем полупроводниковой металлургии. — В кн.: Промышленное применение токов высокой частоты. Л., «Машиностроение», 1969, с. 70—80.

61. Недзвецкий Ю. Э. Способы увеличения сечения стержня при бестигельной зонной плавке. — В кн.: Промышленное применение токов высокой частоты. М., Машгиз, 1961, с. 118—123.

62. Вигдорович В. Н., Вольян А. Е., Курдюмов Г. М. Применение зонной перекристаллизации для физико-химического анализа. — «Заводская лаборатория», 1969, № 11, с. 1350—1356.

63. Свяжин А. Г., Вишкарев А. Ф., Явойский В. И. Измерение давления пара жидкого железа с использованием плавки во взвешенном состоянии. — «Изв. АН СССР. Металлы», 1968, № 5, с. 67—73.

64. Применение электромагнитного тигля для изучения равновесия реакции в системе металл—шлак. — «Труды Центрального научн. исслед. ин-та черной металлургии», 1965, вып. 10, с. 105—112. Авт.: М. Л. Сазонов и др.

65. Григоренко Г. М., Лакомский В. И. Растворимость водорода в алюминии до температуры кипения металла. — В кн.: Методы определения и исследования газов в металлах. М., «Наука», 1968, с. 246—249.

66. Ревякин А. В., Самарин А. М. Метод определения растворимости кислорода в жидких тугоплавких металлах. — В кн.: Методы определения и исследования состояния газов в металлах. М., «Наука», 1968, с. 215—221, 1955.

67. Gruber H. Verfahren zum Eischmelzen duktiler Metalle. Pat. № 1.041.255 (ФРГ).

68. Ryszke E., Matula E. Piecze plasmowe do wytapienia stali. — «Hutnik», 1969, № 7—8, S. 410—419.

69. Bussard A., Gruber H., Stephan H. Method and apparatus for melting metals by inductive heating and electron bombardment. Pat. № 3.226.223 (США), 1961.

70. Hunt C., Harrison G. Airco's facility for steel refining and casting with induction furnaces and electron beams. — «Iron and Steel Eng.» 1971, vol. 48, № 8, p. 85—88.

71. Простяков А. А., Френкель П. Г., Фомин Н. И. Характер движения расплава в индукционных миксерах и печах для плавки чугуна емкостью 6 и 10 т. — В кн.: VI Всесоюзное научно-техническое совещание по электротермии и электротермическому оборудованию. Индукционный нагрев. М., Информэлектро, 1973, с. 36—38.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава первая. Индукционная плавка в печи с футерованной ванной	10
1. Плавка в тигельных печах	10
2. Плавка в канальных печах	29
Глава вторая. Индукционная плавка без соприкосновения расплава с футеровкой	38
3. Гариссажная плавка	38
4. Плавка в холодном тигле	43
5. Плавка с электромагнитным удержанием расплава на опоре	61
6. Струйная бестигельная плавка	73
Глава третья. Индукционная плавка в специальных устройствах для исследования или очистки материалов	77
7. Плавка во взвешенном состоянии	77
8. Зонная плавка	84
9. Плавка при физико-химических исследованиях	92
Глава четвертая. Плавка с комбинированными источниками нагрева	99
Список литературы	105

ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ:

Розенберг В. Л., Вальдберг А. Ю. Рудовосстановительные электропечи. Энергетические показатели и очистка газов. 1974, 104 с. с ил. (Б-ка электротермиста). 30 к.

Сапко А. И. Устройство и расчет узлов печей электрошлакового переплава электроннолучевых и плазменнотуговых. 1974. 120 с. с ил. (Б-ка электротермиста). 35 к.

Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. 1974. 264 с. с ил. 1 р. 23 к.

Перечисленные книги Вы можете приобрести во всех книжных магазинах, распространяющих техническую литературу.

В случае отсутствия книг в местных магазинах заказы можно направлять по адресу: 103031. Москва, ул. Петровка, 15. Магазин Москниги № 8, отдел «Книга — почтой».

Заказанные книги будут высланы по почте наложенным платежом без задатка.