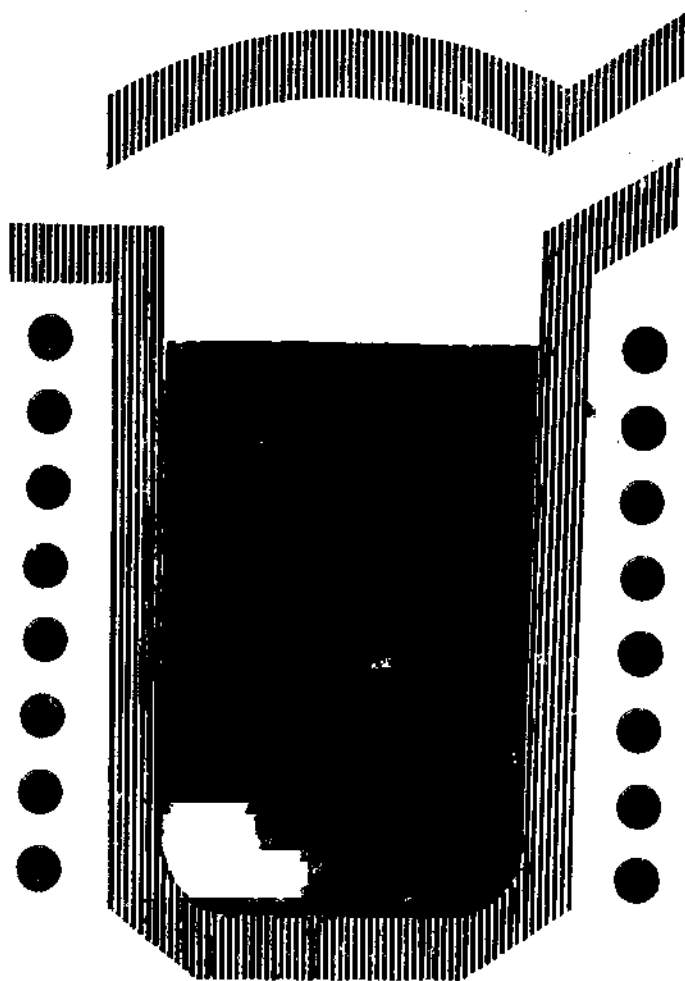


621.36

476 Н. И. ФОМИН, Л. М. ЗАТУЛОВСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА



Н. И. ФОМИН, Л. М. ЗАТУЛОВСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Допущено Министерством электротехнической
промышленности в качестве учебника
для электромеханических техникумов



МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1979

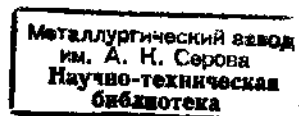
Рецензенты: канд. техн. наук *И. П. Евтюкова*, канд. техн. наук
А. Б. Кувалдин, *Э. И. Нарышкина*

УДК 621.365.5

Электрические печи и установки индукционного нагрева. Фоми́н Н. И., За-
туловский Л. М. М., «Металлургия», 1979. 247 с.

В книге изложены основы физики и теории индукционного нагрева, а также методы расчета и конструирования индукционных электропечей и установок. Рассмотрены электромагнитные явления и физические законы, лежащие в основе индукционного метода нагрева. Описаны конструкции и методы расчета индукционных канальных и тигельных плавильных печей, установок для сквозного нагрева и поверхностной закалки. Приводятся сведения о новых областях применения индукционного нагрева и плавки.

Книга предназначена для учащихся техникумов по специальности «Производство электротермических установок» и может быть полезна инженерно-техническим работникам предприятий, занятых разработкой и эксплуатацией индукционных нагревательных и плавильных установок. Ил. 123. Табл. 9. Библиогр. список: 16 назв.



130379

Ф 31011—186 146—79 2601000000
040(01)—79

© Издательство «Металлургия», 1979

ПРЕДИСЛОВИЕ

Индукционный нагрев является одной из самых молодых и в то же время самых прогрессивных областей электротермии. Получив промышленное развитие с начала XX столетия, этот вид нагрева к настоящему времени завоевал прочное место в самых разнообразных отраслях промышленности.

В индукционных электропечах и установках плавят металлы и осуществляют термообработку изделий, нагревают заготовки перед штамповкой и выращивают монокристаллы. Число технологических процессов, в которых используется индукционный метод нагрева, непрерывно растет. Это обусловлено многими достоинствами индукционных печей и установок, среди которых надо отметить их высокую производительность, легкость автоматизации, более высокое качество получаемых материалов и изделий.

Современные индукционные электропечи и установки индукционного нагрева представляют собой сложные комплексные агрегаты, при разработке которых приходится решать целый ряд задач из различных областей техники (электротехники, теплотехники, автоматического регулирования, механики, вакуумной техники и др.). Необходимым условием создания совершенного оборудования является также понимание особенностей технологического процесса, который на нем проводится.

Курс «Электрические печи и установки индукционного нагрева» базируется на знаниях, полученных учащимися при изучении теоретических основ электротехники, теории теплопередачи и тепловых расчетов электрических печей, промышленной электротехники, технологии металлов и конструкционных материалов.

Книга состоит из двух частей. В первой части излагаются основы физики и теории индукционного нагрева, без понимания которых невозможно решать практические задачи, связанные с созданием и эксплуатацией этого вида электротермического оборудования. Вторая часть посвящена практическим вопросам расчета, проектирования и эксплуатации индукционных нагревательных и плавильных установок. В книге приведены методы расчетов и конструктивные решения, проверенные многолетней практикой и соответствующие современному уровню техники в данной области. Одновременно авторы стремились отразить последние достижения и перспективы развития электротермического оборудования для индукционного нагрева и плавки.

Содержание книги соответствует утвержденной учебной программе одноименного курса для средних специальных учебных заведений по специальности № 0623 «Производство электротермических установок».

ВВЕДЕНИЕ

Возникновение индукционного электронагрева было подготовлено бурным развитием электротехники во второй половине XIX в.

В 1831 г. английский ученый Майкл Фарадей открывает закон электромагнитной индукции. Затем француз Леон Фуко подробно исследует частный случай этого явления: наведение токов в сплошных металлических телах. В середине XIX в. англичанин Джеймс Максвелл разрабатывает общую электромагнитную теорию, позволяющую рассчитывать силы токов, индуцированных в массивных проводящих телах.

В 1878 г. русский изобретатель П. Н. Яблочков впервые применяет на практике трансформатор — один из важнейших электроаппаратов, в котором использован закон электромагнитной индукции. Именно принцип действия трансформатора лежит в основе работы любой индукционной электропечи и установки.

Однако от открытия принципа индукционного метода электронагрева до его практического применения прошло значительное время, что объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, для этого оказался недостаточным общий уровень развития электротехники в XIX в. В частности, как мы увидим в дальнейшем, для эффективного индукционного нагрева в большинстве случаев требуется применение тока повышенной частоты. Надежных и достаточно мощных преобразователей частоты в то время еще не было. Во-вторых, в XIX в. еще отсутствовала и сама необходимость в таком технологическом приеме, каким является индукционный электронагрев. К этому были не готовы металлургическое производство и машиностроение того времени.

Поэтому обнаруженное явление нагрева металлов индуцированными (вихревыми) токами вначале рассматривалось лишь как вредный побочный эффект, сопутствующий работе электрических машин и аппаратов.

Впервые индукционный метод электронагрева был применен в плавильных печах.

В 1900 г. Келли разрабатывает первую промышленную индукционную канальную электропечь, называемую печью с открытым плавильным каналом. В 1916 г. Уайт предлагает конструкцию индукционной электропечи с закрытым каналом, которая является наиболее распространенной и по настоящее время.

Первая индукционная тигельная электропечь изготовлена фирмой «Моренц» в 1913 г. Вскоре промышленные печи этого типа начала выпускать фирма «Аякс» (США).

В 1918 г. русские ученые М. А. Бонч-Бруевич и В. П. Вологдин применили индукционный нагрев деталей электронных ламп для дегазации при откачке.

Дальнейшее совершенствование индукционных тигельных печей и расширение областей применения индукционного нагрева

во многом зависело от успехов в разработке преобразователей частоты.

Для получения токов высокой частоты последовательно использовали дуговые, искровые, машинные и ламповые генераторы. Наиболее перспективными оказались два последних типа преобразователей.

Большая заслуга в разработке промышленных машинных индукторных генераторов повышенной частоты принадлежит В. П. Вологдину. В период с 1910 по 1935 г. им создан ряд генераторов этого типа.

Этап наиболее бурного развития индукционного нагрева относится к 30-м годам XX столетия.

В 1935 г. под руководством В. П. Вологодина впервые осуществлена индукционная поверхностная закалка деталей. Через два-три года этот прогрессивный процесс уже широко внедряется во всех передовых промышленно развитых странах.

В этот период столь же быстрыми темпами создаются индукционные установки для сквозного нагрева, пайки, сварки и др., а также установки диэлектрического нагрева.

Значительный вклад в развитие теории и практики индукционного нагрева внесен советскими учеными В. П. Вологдиным, Г. И. Бабатом, М. Г. Лозинским, А. Е. Слухоцким, А. В. Донским, К. З. Шенеляковским, А. М. Вайнбергом и др.

За годы пятилеток индукционный нагрев получил широкое распространение на отечественных машиностроительных, металлообрабатывающих, металлургических заводах.

Созданы крупные научные центры (ВНИИ электротермического оборудования, ВНИИ токов высокой частоты им. В. П. Вологодина), где ведутся исследования и проектирование всех видов электропечей и установок индукционного нагрева.

Широкое внедрение в промышленность оборудования для индукционного нагрева способствует решению важнейших народнохозяйственных задач по созданию высокопроизводительных, эффективных технологических процессов, повышению автоматизации производства, увеличению производительности труда.

Процесс интенсивного совершенствования и расширения областей применения индукционных установок продолжается и по сей день. Для активного участия в этом процессе необходимо овладение современными знаниями в данной области.

ЧАСТЬ I

ОСНОВЫ ФИЗИКИ И ТЕОРИИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

ГЛАВА I

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

§ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Под индукционным нагревом понимают нагрев тел в электромагнитном поле за счет теплового действия электрического тока, протекающего непосредственно по нагреваемому телу и возбуждаемого в нем благодаря явлению электромагнитной индукции. При этом ток в нагреваемом изделии называют индуктированным или наведенным током.

Индукционными установками называют электротермические устройства, предназначенные для индукционного нагрева или плавки тех или иных материалов. Под индукционной установкой понимают весь комплекс устройств, обеспечивающих осуществление электротермического процесса (включая источники питания, устройства автоматики и управления, комплектующее оборудование, токоподводы, некоторые вспомогательные устройства и т. п.). Под индукционной печью обычно понимают часть индукционной установки, включающую индуктор, каркас, камеру для нагрева или плавки, вакуумную систему, механизмы наклона печи или перемещения нагреваемых изделий в пространстве и т. п.

Индукционной плавильной установкой называют индукционную установку, в которой нагреваемый материал (металл, полупроводник, огнеупорный материал) доводится до плавления, т. е. меняет свое агрегатное состояние в процессе нагрева. В индукционной нагревательной установке конечная температура нагрева всегда ниже температуры плавления материала.

Важнейшим элементом любой индукционной печи является индуктор, представляющий собой проводник или систему проводников определенной конфигурации, подключаемый к внешнему источнику переменного тока и предназначенный для дистанционного (бесконтактного) наведения в нагреваемом изделии переменного электромагнитного поля и электрического тока, разогревающего изделие. Индуктор обычно навивается из провода в виде одно- или многовитковой катушки, поперечное сечение которой

определяется размерами и конфигурацией нагреваемых изделий. Само изделие, помещенное в индуктор и подвергаемое индукционному нагреву, принято называть загрузкой.

В некоторых случаях загрузку целесообразно нагревать, возбуждая электрический ток не непосредственно в ней, а в каком-либо промежуточном устройстве (например, в муфеле или в электропроводном тигле). Такой вид нагрева загрузки называют косвенным индукционным нагревом, а печь, служащую для его реализации, называют индукционной печью косвенного нагрева.

На практике используется также понятие индукционный нагреватель. В состав его входят все элементы индукционной установки, кроме источников питания и токоподводов.

Для компенсации реактивной мощности индуктора используют группу силовых конденсаторов, соединенных между собой, как правило, параллельно, и оформленных в отдельный конструктивный узел, который принято называть конденсаторной батареей.

Индуктор, соединенный токоподводом с конденсаторной батареей, образует силовой колебательный контур индукционной установки. Упомянутый токоподвод, выполняемый обычно в виде пакета шин и кабелей (контурные токи могут составлять несколько десятков тысяч ампер), иногда называют короткой сетью установки, по аналогии с короткой сетью дуговых печей.

Важное значение в практике индукционного нагрева имеют также понятия потребляемой и установленной мощности установки, а также настила тока в индукторе.

Потребляемая активная мощность индукционной установки представляет собой сумму активных мощностей, потребляемых из сети всеми агрегатами, аппаратами и приборами, входящими в комплект индукционной установки, для обеспечения нормального технологического процесса.

Установленная полная мощность индукционной установки есть сумма полных мощностей, обозначенных в паспортах или на щитках всех агрегатов, аппаратов и приборов, входящих в состав установки и потребляющих энергию из сети. Настила тока означает величину полного тока, протекающего на единице длины (соответственно индуктора или загрузки), отложенной вдоль силовых линий поля (измеряется в амперах на метр—А/м).

Другие понятия и определения будут вводиться по мере необходимости в соответствующих разделах книги.

§ 2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА ИНДУКЦИОННЫХ МЕТОДОВ НАГРЕВА

Индукционный нагрев основан на преобразовании электрической энергии в тепловую. В электромагнитное поле, создаваемое током индуктора, вносят нагреваемое тело. Благодаря явлению

электромагнитной индукции в нем возникает электродвижущая сила и появляется электрический ток, который и приводит к разогреву загрузки.

Индукционный метод нагрева наиболее широко применяется для нагрева и плавки металлов и сплавов, однако он весьма универсален и может использоваться для нагрева практически любых веществ: а) металлов и сплавов; б) полупроводниковых материалов; в) диэлектриков; г) газов; д) шлаков и е) электролитов. Нагрев газов оказывается возможным благодаря тому, что при определенных условиях атомы газов теряют электроны и газ становится ионизированным. Ионизированный газ является проводником электрического тока; его проводимость обусловлена движением ионов и свободных электронов. Что же касается диэлектриков, то их нагрев возможен благодаря тому, что при наложении на них высокочастотного электрического поля заряженные частицы диэлектрика начинают смещаться: диэлектрик поляризуется. Поляризация может вызывать нагрев непроводящих тел (так называемый диэлектрический нагрев). Кроме того, при определенных условиях (при очень высоких температурах) удельное сопротивление многих диэлектриков падает настолько, что их индукционный нагрев становится возможным уже на средних частотах. Это позволяет использовать индукционные методы плавки для получения особо чистых огнеупорных материалов.

Преимущества индукционного нагрева по сравнению с другими методами нагрева заключаются в следующем:

1. Передача электрической энергии непосредственно в нагреваемое тело позволяет осуществить прямой («глубинный») нагрев материалов, и значительно увеличить его скорость по сравнению с печами косвенного нагрева, где изделия нагреваются только через поверхностный слой («поверхностный» нагрев).

2. Максимальный уровень температур может быть весьма высоким, лимитируется в основном только применяемыми огнеупорными материалами.

3. При передаче электрической энергии в нагреваемое тело не нужны контактные устройства, что значительно упрощает конструкцию и позволяет применить индукционный метод в условиях автоматизированного поточного производства, а также осуществлять нагрев в вакууме и в защитных средах.

4. Благодаря явлению поверхностного эффекта на высоких частотах максимальная мощность выделяется в поверхностном слое нагреваемого изделия, и тем самым индукционный метод при закалке обеспечивает быстрый нагрев поверхности изделия, позволяя получить ее высокую твердость, при сохранении относительно вязкой сердцевины. Поверхностная индукционная закалка быстрее и экономичнее других методов поверхностного упрочнения изделий.

5. В индукционных плавильных печах возникающие при передаче энергии в расплав электродинамические усилия спо-

собствуют циркуляции расплава в объеме тигля. Это ускоряет процесс плавки и позволяет получать металл со стабильными и однородными свойствами.

6. Источник нагрева (индуктор), являясь «холодным» (его собственная температура не превышает обычно 50—70° С) и осуществляя нагрев загрузки бесконтактно (в некоторых случаях он вообще может быть вынесен из рабочего пространства печи), не вносит никаких загрязнений в атмосферу печи, что позволяет осуществлять прецизионные и особо чистые технологические процессы.

7. Индукционный метод нагрева и плавки в большинстве случаев позволяет повысить производительность труда, значительно улучшить санитарно-гигиенические условия производства и исключить загрязнение воздушного бассейна.

§ 3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА И ПЛАВКИ

Все индукционные установки можно разбить на три большие группы:

- I. Установки для индукционного нагрева.
- II. Установки для диэлектрического нагрева.
- III. Индукционные плавильные установки.

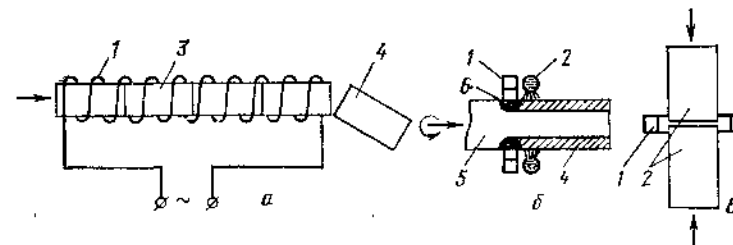


Рис. 1. Установки для индукционного нагрева: а — сквозной нагрев под пластическую деформацию и термообработку (1 — индуктор; 3 — нагреваемая заготовка; 4 — нагретая заготовка); б — поверхностная закалка (1 — индуктор; 2 — спрей; 4 — закаленная зона; 5 — закаливаемая деталь; 6 — нагреваемый участок); в — сварка прутков астык (1 — индуктор; 2 — свариваемые прутки)

Ниже приведена классификация установок каждой группы. Некоторые методы и устройства схематически показаны на рис. 1—3.

На установках для индукционного нагрева (рис. 1) выполняют:

- 1) сквозной нагрев под пластическую деформацию;
- 2) сквозной нагрев под термообработку;
- 3) поверхностную закалку;
- 4) сварку, пайку и наплавку;
- 5) нагрев газов;
- 6) обогрев технологического оборудования и др.

На установках для диэлектрического нагрева (рис. 2) осуществляют:

- 1) сушку древесины, кожи, сыпучих материалов;
- 2) склейку полимеров, кожи, древесины;
- 3) сварку пластмасс и синтетических материалов;
- 4) подогрев порошков перед прессованием;
- 5) подогрев изделий перед формованием;
- 6) подогрев пищевых продуктов и др.

Индукционные плавильные установки (рис. 3) делятся на:

- 1) индукционные капальные печи (ИКП);
- 2) индукционные тигельные печи (ИТП);
- 3) индукционные вакуумные печи (ИВП);
- 4) индукционные печи с холодным тиглем (ИПХТ);
- 5) устройства для плавки в электромагнитном тигле (ЭМТ);
- 6) устройства для зонной плавки (ИЗП);
- 7) устройства для выращивания монокристаллов;
- 8) устройства для гарнисажной плавки (ИГП);
- 9) устройства для струйной плавки (ИСП);
- 10) индукционные печи непрерывного действия (ИНП).

Дадим краткую характеристику некоторых наиболее распространенных индукционных установок.

Обширным классом индукционных устройств являются плавильные печи. Наибольшее распространение в промышленности получили каналные печи (печи с железным сердечником) и тигельные печи (печи без сердечника).

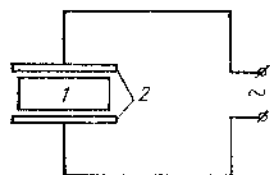


Рис. 2. Схема установки для диэлектрического нагрева:

1 — нагреваемый материал;
2 — пластины конденсатора

Канальная печь (см. рис. 3, а) представляет собой своеобразный трансформатор с магнитопроводом. Первичной обмоткой является индуктор, а вторичной и одновременно нагрузкой трансформатора служит расплавляемый металл, находящийся в выложенном огнеупорным материалом замкнутом кольцевом канале.

Индукционная каналная электропечь в настоящее время является одним из основных плавильных агрегатов для цветных металлов и сплавов. Применяются эти печи и при выплавке чугуна.

Канальные электропечи часто используются также в качестве миксеров — устройств для выравнивания температуры и доводки химического состава, для перегрева и выдержки жидкого металла.

Тигельная печь (см. рис. 3, б) по принципу действия подобна воздушному трансформатору. Первичная обмотка — индуктор, вторичная обмотка и одновременно нагрузка — расплавленный металл в тигле, помещенном внутри индуктора.

Печи этого типа широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов как на воздухе, так и в вакууме и в защитных атмосферах. В настоящее время используются такие печи емкостью от десятков грамм до десятков тонн.

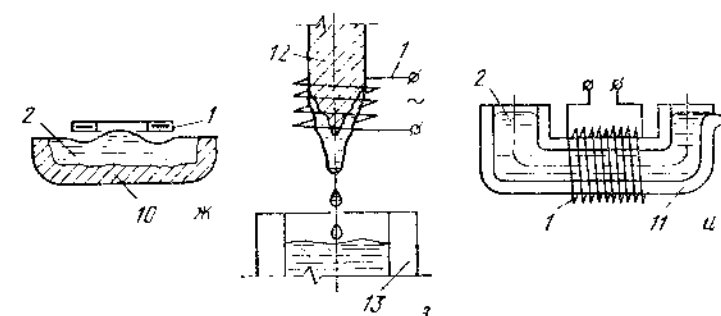
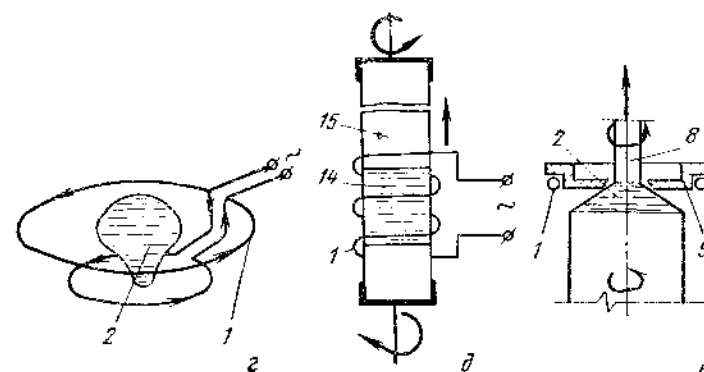
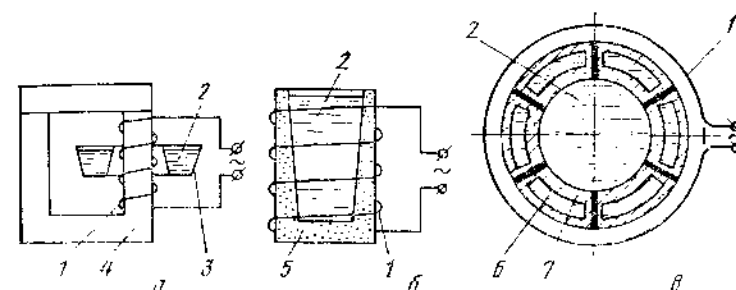


Рис. 3. Индукционная плавка металлов:

а — в каналной печи; б — в тигельной печи; в — в печи с холодным тиглем; г — взвешиваемая плавка; д — зонная бестигельная плавка; е — выращивание монокристаллов; ж — гарниссажная плавка; з — струйная плавка; и — в печи непрерывного действия; 1 — индуктор; 2 — расплав; 3 — футерованный кольцевой канал; 4 — магнитопровод; 5 — огнеупорный тигель; 6 — вода; 7 — холодный тигель; 8 — монокристалл; 9 — формообразователь; 10 — гарниссаж; 11 — футеровка; 12 — стержень; 13 — кристаллизатор; 14 — расплавленная зона; 15 — стержень из очищаемого материала

Основным назначением индукционных тигельных электропечей является выплавка черных и цветных металлов, высококачественных сталей и специальных сплавов, требующих особой чистоты, однородности и точности химического состава. В последние годы тигельные печи все чаще стали использовать в комплексе с другими плавильными агрегатами (вагранками, дуговыми печами). В этих случаях металл, предварительно расплавленный в указанных печах, поступает затем в индукционную электропечь для рафинирования и доведения до заданного химического состава.

В индукционных тигельных печах плавят также благородные металлы (золото, платину и др.).

Установки для сквозного нагрева обеспечивают прогрев изделия (или его участка) по всему поперечному сечению (см. рис. 1, а).

Нагрев заготовок до конечной температуры в установках непрерывного действия осуществляется по мере их продвижения в индукторе с шагом, равным длине заготовки. При введении в индуктор очередной холодной заготовки последняя заготовка, уже нагретая до заданной температуры, автоматически выталкивается из индуктора.

Основным назначением данных установок является нагрев заготовок из черных и цветных металлов перед обработкой давлением (ковкой, штамповкой, гибкой, прессованием). Применяются индукционные установки сквозного нагрева также для термической и химико-термической обработки изделий из стали и сплавов (сквозной закалки, отпуска, отжига, нормализации, цементации, цианирования).

Установки для поверхностной закалки своеобразны по конструкции и являются одним из наиболее распространенных видов индукционных установок.

Поверхностная закалка нашла широкое применение в современном машиностроении. Этот вид термообработки позволяет получать детали с закаленным твердым поверхностным слоем при сохранении вязкой сердцевины. Такие детали хорошо работают на истирание и одновременно выдерживают ударные нагрузки. Именно в таких условиях работают, например, шестерни, коленчатые валы и т. п.

Для осуществления поверхностной закалки необходимо обеспечить нагрев поверхности детали с очень высокой скоростью, а затем форсированное охлаждение. При этом лишь поверхностный слой заданной толщины должен успеть прогреться до температуры структурных превращений и, следовательно, закалиться. Передача тепла во внутренние слои должна быть минимальной. Индукционный нагрев, позволяющий сконцентрировать в поверхностном слое нагреваемой детали любую практически необходимую удельную мощность, является оптимальным методом нагрева под поверхностную закалку.

На рис. 1, б показана схема индукционной установки для непрерывно-последовательной закалки. Закаливаемый вал помещается внутри кольцевого индуктора и установленного рядом с ним душевого устройства (спреера), обеспечивающего водяное охлаждение поверхности вала. При продольном перемещении вала происходит последовательный нагрев (под индуктором) и охлаждение (под спреером) поверхности вала и, таким образом, осуществляется его поверхностная закалка. Для обеспечения равномерности нагрева и охлаждения вал дополнительно вращается.

Установки для сварки, пайки и наплавки с индукционным нагревом находят все более широкое применение в промышленности.

Для примера на рис. 1, в представлена схема индукционной установки для сварки встык прутков. Концы прутков нагреваются в индукторе, повторяющем форму их поперечного сечения. После достижения заданной сварочной температуры прутки прижимаются своими торцами с усилием, необходимым для создания прочного сварного соединения. В промышленных условиях процесс индукционной сварки изделий осуществляется в высокопроизводительных установках-автоматах.

Достаточно распространены также процессы соединения деталей пайкой при индукционном нагреве. Примером может служить припайка к резцам пластин из твердых сплавов.

Твердые сплавы могут наноситься на отдельные участки деталей также прямой наплавкой. В этом случае индуктор обеспечивает расплавление наносимого металла и прогрев соответствующего участка детали до температуры, необходимой для сцепления с распылом при затвердевании последнего. Процессы индукционной сварки, пайки и наплавки в отдельных случаях выполняются в вакууме или защитной атмосфере, что повышает качество соединения.

Установки для индивидуальных технологических процессов. К этому классу установок будем относить индукционные установки, не получившие пока широкого (массового) распространения.

В качестве примеров можно привести следующие установки: для прогрева деталей радиоламп при их откачке; для обогрева химических реакторов, сосудов и трубопроводов; для сушки лакокрасочных покрытий на металлических изделиях; для подогрева перед горячей посадкой деталей и многие другие.

Отнесем сюда также установки для новых технологических процессов, сравнительно недавно получивших свое промышленное развитие. На рис. 3, д для примера приведена схема индукционной установки для одного из таких процессов — бестигельной зонной плавки. Этот процесс в настоящее время является наиболее эффективным методом глубокой очистки веществ, в частности полупроводников, от примесей. Он основан на различной растворимости примесей в жидкой и твердой фазах вещества. Вертикально

установленный стержень из очищаемого материала располагается внутри короткого индуктора, обеспечивающего сквозное проплавление узкого участка стержня. Образовавшаяся жидкая зона удерживается от проливания силами поверхностного натяжения.

При перемещении индуктора расплавленная зона продвигается вдоль стержня, обогащаясь примесями, которые лучше растворяются в жидкой фазе, чем в твердой. В результате многократного прохода зоны снизу вверх добиваются глубокой очистки нижней части стержня от указанных примесей. Для обеспечения симметрии температурного поля и перемешивания расплава участки стержня, разделенные расплавленной зоной, вращают в разные стороны.

Установки для диэлектрического нагрева используются при нагреве непроводниковых материалов в переменном электрическом поле.

Схема установки для диэлектрического нагрева показана на рис. 2. Нагреваемый непроводниковый материал располагается между пластинами конденсатора, который подключается к источнику питания достаточно высокого напряжения и частоты.

Как известно, в диэлектрике, помещенном в электрическое поле, происходит явление поляризации: смещение заряженных частиц, входящих в молекулы (атомы), в направлении поля, или поворот полярных молекул в направлении поля. Изменение направления поля приводит к соответствующей переориентации диполей диэлектрика. Трение между материальными частицами диэлектрика при поляризации и является причиной выделения в нем тепла. Нагрев диэлектрика тем интенсивнее, чем больше напряженность приложенного электрического поля и чем быстрее ее изменение (т. е. выше частота).

В зависимости от организации режима нагрева во времени различают индукционные установки:

1) периодического действия, в которых загрузка нагревается от начальной до конечной температуры, оставаясь неподвижной относительно индуктора;

2) полунепрерывного действия — обычно это вакуумные установки, в которых не требуется разгерметизации вакуумной камеры после окончания плавки (или нагрева) для ее загрузки и разгрузки;

3) непрерывного действия (методические установки), в которых загрузка нагревается до заданной конечной температуры по мере ее непрерывного или дискретного перемещения относительно индуктора.

Так, например, для сквозного нагрева заготовок выпускаются установки двух типов:

а) периодического действия, в которых нагреву обычно подвергается одна заготовка, расположенная стационарно относительно индуктора. Электрические параметры этих установок в процессе нагрева меняются в зависимости от изменения физиче-

ских свойств материала заготовки с повышением ее температуры;

б) методические нагревательные установки, где в длинном индукторе находится одновременно несколько заготовок, нагрев происходит по мере продвижения их через индуктор. Электрические параметры этих установок в процессе работы практически неизменны, несмотря на изменение свойств каждой заготовки в отдельности с повышением ее температуры.

По частоте питающего тока индукционные печи и установки разделяются на:

1) установки промышленной частоты, питающиеся от сети 50 Гц (в некоторых странах промышленная частота — 60 Гц) непосредственно или через специальные понизительные трансформаторы; однофазные установки большой мощности имеют симметрирующие устройства для выравнивания нагрузки по фазам питающей сети;

2) установки средней или повышенной частоты (150—10 000 Гц), питающиеся от электромашиных, или статических преобразователей частоты;

3) высокочастотные установки (или установки высокой частоты), питающиеся от ламповых генераторов, работают на частотах от 20 000 Гц до нескольких мегагерц.

Чем меньше размеры нагреваемых объектов и чем меньше их электропроводность, тем, как правило, выше применяемая частота. В связи с увеличением размеров нагреваемых объектов в последние годы начало разрабатываться также оборудование на частоту менее 50 Гц (это так называемые установки пониженной частоты).

Контрольные вопросы

1. Какой вид нагрева называют косвенным индукционным?
2. Что такое пастил тока в индукторе?
3. Назовите особенности и преимущества индукционного нагрева.
4. Дайте классификацию установок индукционного нагрева.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

§ 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

При рассмотрении физических явлений, лежащих в основе индукционного метода нагрева, мы постоянно будем сталкиваться с основными понятиями теории электромагнитного поля. Напомним некоторые из них.

Электромагнитное поле есть особый вид материи, отличающийся непрерывным распределением в пространстве,

характеризующийся способностью распространения в вакууме со скоростью света, и оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы и проводники с током.

Всякое электромагнитное явление, рассматриваемое в целом, всегда характеризуется двумя сторонами — электрической и магнитной, между которыми существует тесная связь. Важно подчеркнуть, что в переменном электромагнитном поле электрическое поле возникает вследствие изменения во времени магнитного поля, и в свою очередь возникновение магнитного поля является результатом изменения во времени электрического поля.

Электрическим полем называют одну из сторон электромагнитного поля, обусловленную наличием электрических зарядов или изменением магнитного поля и оказывающую силовое воздействие на неподвижные заряженные частицы. Физическая величина, характеризующая интенсивность электрического поля в какой-либо точке, называется напряженностью электрического поля E . Линии, касательные к которым совпадают по направлению с вектором напряженности поля \vec{E} в данной точке, называют линиями напряженности электрического поля.

Напряженность электрического поля \vec{E} является причиной возникновения электрического тока в нагрузке, помещенной в переменное электромагнитное поле. В зависимости от материала нагрузки и скорости изменения электромагнитного поля в нагрузке появляются ток проводимости, ток переноса или ток электрического смещения.

В однородной (изотропной) среде вектор плотности тока проводимости $\vec{\delta}$ совпадает по направлению с вектором напряженности электрического поля и линии тока совпадают с линиями напряженности электрического поля. Поэтому плотность тока проводимости определяется законом Ома, записанным в дифференциальной форме:

$$\vec{\delta} = \gamma \vec{E} = \vec{E} / \rho, \quad (2-1)$$

где γ — удельная электрическая проводимость;

ρ — удельное электрическое сопротивление вещества.

Магнитным полем называют одну из двух сторон электромагнитного поля, обусловленную движущимися заряженными частицами или изменением электрического поля и оказывающую силовое воздействие на движущиеся заряженные частицы или проводник с током. При этом вектор силы перпендикулярен к направлению перемещения заряда (или направлению тока в проводнике).

Физическая величина, характеризующая интенсивность магнитного поля в каждой точке, называется магнитной индукцией B . Она изображается вектором \vec{B} , имеющим направление, перпендикулярное к направлению перемещения

заряда q (или тока i , протекающего по проводнику длиной l), \vec{j} и к направлению силы \vec{F} , действующей на этот заряд:

$$B = F / qv \text{ или } B = F / il. \quad (2-2)$$

Поток вектора магнитной индукции через некоторую поверхность S (рис. 4) называют магнитным потоком через эту поверхность и обозначают обычно через Φ :

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B \cos \beta dS, \quad (2-3)$$

где β — угол между направлением вектора \vec{B} и нормалью к площадке $d\vec{S}$.

Следовательно, магнитная индукция характеризует плотность магнитного потока в данной точке поля. Линиями магнитной индукции (или магнитными силовыми линиями) называют линии, проведенные так, чтобы касательные к ним в каждой точке совпадали по направлению с вектором \vec{B} . Эти линии обычно снабжают стрелками, указывающими направление вектора \vec{B} .

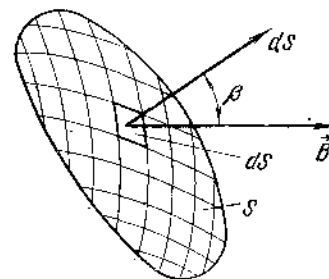


Рис. 4. К определению магнитного потока Φ через поверхность

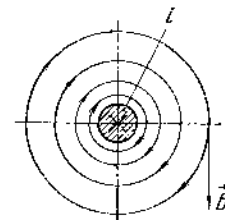


Рис. 5. Магнитное поле проводника с током

Нужно помнить, что магнитный поток в отличие от магнитной индукции, является скаляром.

Единицей измерения магнитного потока в системе СИ является вебер (Вб), а магнитной индукции — тесла (Т), равная веберу, деленному на квадратный метр ($1 \text{ Т} = 1 \text{ Вб/м}^2$).

Важное значение при изучении электромагнитных явлений имеет принцип непрерывности магнитного потока, который гласит, что линии магнитной индукции (магнитные силовые линии) во всех без исключения случаях не имеют ни начала, ни конца — они всюду и всегда непрерывны. Так, например, линии магнитной индукции проводника с током являются коаксиальными окружностями, центры которых лежат на оси проводника (рис. 5).

Математически принцип непрерывности магнитного потока записывается следующим образом:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (2-4)$$

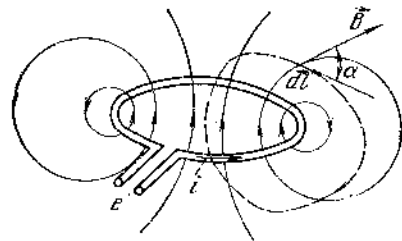
и может быть сформулирован так: магнитный поток сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю.

Аналогично формулируется и записывается принцип непрерывности электрического тока:

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0. \quad (2-5)$$

§ 2. СВЯЗЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА

Во всех без исключения случаях магнитное поле связано с электрическим током. Электрический ток и его магнитное поле существуют всегда одновременно, и, как говорилось ранее, являются лишь разными характеристиками единого физического процесса.



Р и с. 6. Связь магнитного поля B с электрическим током i произвольного контура

Покажем, какая между ними имеется связь.

Рассмотрим для простоты индуктирующий виток произвольной формы, обтекаемый электрическим током i (рис. 6). В пространстве вокруг витка существует магнитное поле. Обходя виток по некоторому замкнутому контуру, показанному, например, на рис. 6 петлевыми линиями, вычислим линейный интеграл магнитной индукции вдоль этого контура, называемого контуром интегрирования. Опыт показывает, что независимо от формы контура интегрирования интеграл магнитной индукции вдоль него пропорционален силе тока, охватываемому этим контуром:

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \oint_l B \cos \alpha dl = \mu i, \quad (2-6)$$

где l — длина контура интегрирования;

α — угол между вектором \vec{B} и касательной к контуру;
 μ — абсолютная магнитная проницаемость среды, окружающей виток, которую обычно представляют в виде произведения относительной магнитной проницаемости μ' на магнитную постоянную μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Г/м); $\mu = \mu' \mu_0$.

Магнитная проницаемость измеряется в генри на метр (Г/м).

Если положительное направление обхода контура интегрирования связано с положительным направлением тока i правилом буравчика, то $\oint_l \vec{B} d\vec{l}$ и ток i получают одного знака. Если контур интегрирования не охватывает никакого тока, то интеграл $\oint_l \vec{B} d\vec{l}$ вдоль него равен нулю независимо от формы контура интегрирования.

Соотношение (2-6) выражает связь магнитного поля и тока: каждая магнитная силовая линия обязательно охватывает собой проводник с электрическим током. Соответственно проводник с электрическим током всегда окружен магнитным полем.

Если в немагнитной среде имеется n контуров с электрическими токами i_1, i_2 и т. д., и контур интегрирования охватывает все эти токи, то, очевидно, справедливо соотношение:

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (i_1 + i_2 + \dots + i_n).$$

В частности, для катушки индуктора, состоящей из w витков, обтекаемых одним и тем же током i (рис. 7), сумма токов, проходящих через поверхность \vec{S} , ограниченную контуром интегрирования, равна wi , при этом

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 wi. \quad (2-7)$$

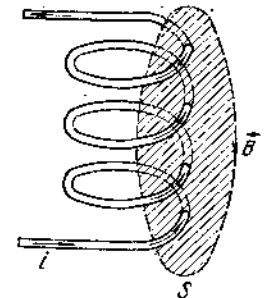
В практических расчетах магнитных полей, создаваемых индукторами, часто пользуются величиной, называемой напряженностью магнитного поля и связанной с магнитной индукцией соотношением:

$$H = B/\mu = B/\mu_0 \mu'. \quad (2-8)$$

В отличие от магнитной индукции, зависящей от магнитных свойств среды, напряженность поля в однородной среде от этих свойств не зависит.

В системе СИ напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр (А/м).

Напряженность поля \vec{H} , как и индукция \vec{B} , является векторной величиной. В изотропных средах (с одинаковыми во всех направлениях магнитными свойствами) направление вектора напряженности магнитного поля совпадает с направлением вектора магнитной индукции.



Р и с. 7. Связь магнитного поля B с электрическим током i индуктора

В соответствии с выражениями (2-7) и (2-8) линейный интеграл напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура равен электрическому току, охватываемому этим контуром (т. е. току через поверхность S , ограниченную этим контуром):

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = i. \quad (2-9)$$

В правой части выражений (2-6), (2-7) и (2-9) под величиной тока i следует понимать не только ток проводимости, но и токи переноса, и токи смещения через поверхность, ограниченную контуром интегрирования. Поскольку сумму указанных токов можно назвать полным током через рассматриваемую поверхность, соотношение (2-9) называют обычно законом полного тока. Уравнение (2-9) является одним из основных уравнений электромагнитного поля.

§ 3. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЯВЛЕНИЯ САМОИНДУКЦИИ И ВЗАИМОИНДУКЦИИ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Закон электромагнитной индукции.

Закон электромагнитной индукции, являющийся краеугольным камнем метода индукционного нагрева, был открыт в 1831 г. английским физиком Майклом Фарадеем.

Суть явления состоит в том, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо контур, в контуре наводится электродвижущая сила. При этом наведенная (индуцированная) э. д. с. e прямо пропорциональна скорости изменения потокосцепления контура Ψ :

$$e = -d\Psi/d\tau. \quad (2-10)$$

При этом безразлично, происходит ли изменение потока при движении контура в магнитном поле или в результате изменения во времени магнитного потока, пронизывающего неподвижный контур.

Потокосцепление Ψ контура равно алгебраической сумме потоков, пронизывающих отдельные витки контура:

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = \sum_{i=1}^n \Phi_i. \quad (2-11)$$

В случае, когда все витки обмотки (индуктора) пронизываются одним и тем же потоком Φ , потокосцепление равно произведению числа витков n сцепленного с витком магнитного потока:

$$\Psi = \Phi n. \quad (2-12)$$

Потокосцепление измеряется в тех же единицах, что и поток.

Важно отметить, что в приведенных выше формулах Ψ есть полное или результирующее потокосцепление контура (обмотки),

которое создается не только внешним по отношению к этому контуру магнитным потоком, но и собственным потоком, пронизывающим контур при протекании по нему электрического тока. Это нужно помнить при анализе электромагнитных явлений в массивных проводниках (см. § 2, гл. 3).

Направление наведенной э. д. с. и тока может быть определено по правилу Ленца: ток, возникающий в контуре под действием наведенной э. д. с., всегда направлен таким образом, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, пронизывающего контур.

Явление самоиндукции

Выше мы рассмотрели явление наведения э. д. с. и тока в контуре при изменении стороннего магнитного потока, пронизывающего контур. Аналогичное явление наблюдается также и в том случае, когда контур пронизывается собственным магнитным потоком, созданным током, протекающим по контуру.

Явление наведения э. д. с. в контуре при изменении силы тока, протекающего по этому же контуру, называется с а м о и н д у к ц и е й. Для ее определения, согласно выражению (2-10), надо продифференцировать потокосцепление контура Ψ , вызванное собственным током i .

Опытом установлено, что для контуров и катушек без ферромагнитного сердечника потокосцепление Ψ пропорционально силе тока i :

$$\Psi = Li. \quad (2-13)$$

Коэффициент пропорциональности L называется собственной индуктивностью контура или просто индуктивностью (его также называют коэффициентом самоиндукции). Индуктивность L зависит от геометрических размеров контура (катушки) и числа витков w , но не зависит от величины тока i , протекающего по катушке. Измеряется величина L в генри (Г) ($1 \text{ Г} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с}$).

Обозначив э. д. с. самоиндукции через e_L , в соответствии с выражением (2-13) получим

$$e_L = -d\Psi/d\tau = d/d\tau (Li). \quad (2-14)$$

Поскольку при заданной геометрии и числе витков катушки $L = \text{const}$, получим

$$e_L = -L \frac{di}{d\tau}. \quad (2-15)$$

Следовательно, э. д. с. самоиндукции в катушке пропорциональна скорости изменения силы тока, протекающего по катушке. Это означает, что величина э. д. с. e_L зависит от частоты тока, питающего индуктор: чем больше частота, тем больше e_L . В частном случае, когда сила тока не меняется во времени, эта э. д. с. равна нулю.

Знак минус в формуле (2-15) говорит о том, что направление э. д. с. самоиндукции противоположно направлению приращения тока, которое вызывает возникновение этой э. д. с.

Явление взаимной индукции

В практике индукционного нагрева уединенные контуры, рассмотренные выше, встречаются редко. Как правило, мы будем иметь дело с несколькими контурами, удаленными на некоторое расстояние друг от друга и оказывающими друг на друга взаимное влияние.

Два контура (или две катушки индуктора) называются индуктивно связанными или магнитосвязанными контурами (катушками), если часть магнитного потока, созданного током контура 1, пронизывает контур 2, а часть магнитного потока, вызванного током контура 2, пронизывает контур 1 (рис. 8). При этом часть магнитного потока, сцепляющаяся с контуром 2 и создаваемая током контура 1, называется потоком взаимной индукции и обозначается обычно Φ_{12} .

Р и с. 8. Индуктивно связанные контуры

Магнитный поток Φ_1 , созданный током i_1 , частично замыкается в пределах контура 1, т. е., минуя контур 2 (Φ_{11}), частично же он пронизывает контур 2 (Φ_{12}), т. е.

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}. \quad (2-16)$$

В то же время поток второго контура Φ_2 , созданного током i_2 , частично замыкается в пределах этого контура, минуя контур 1 (Φ_{22}), частично пронизывает его (Φ_{21}):

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21}. \quad (2-17)$$

Потокосцепление первого контура, имеющего число витков ω_1 , равно

$$\Psi_{1\Sigma} = (\Phi_1 \pm \Phi_{21}) \omega_1 = \Psi_1 \pm \Psi_{21}. \quad (2-18)$$

Потокосцепление второго контура, имеющего число витков ω_2 , равно

$$\Psi_{2\Sigma} = (\Phi_2 \pm \Phi_{12}) \omega_2 = \Psi_2 \pm \Psi_{12}. \quad (2-19)$$

Знак плюс в выражениях (2-18) и (2-19) следует ставить в случае, когда поток взаимной индукции направлен согласно с потоком самоиндукции, создаваемым током данного контура. При встречном их направлении следует ставить знак минус.

Явление наведения э. д. с. в каком-либо контуре при изменении тока в другом контуре называется в з а и м о и н д у к ц и е й,

а наведенная э. д. с. — э л е к т р о д в и ж у щ е й с и л о й в з а и м о и н д у к ц и и и обозначается обычно e_M .

Опытным путем установлено, что если индукторы выполнены без ферромагнитных сердечников (или с любыми сердечниками, имеющими постоянную магнитную проницаемость μ), то потокосцепление Ψ_{21} пропорционально силе тока i_2 , а Ψ_{12} пропорционально силе тока i_1 . Коэффициенты пропорциональности обычно обозначают буквой M с соответствующими индексами:

$$\Psi_{21} = M_{21} i_2 \text{ и } \Psi_{12} = M_{12} i_1. \quad (2-20)$$

Коэффициенты M_{21} и M_{12} всегда численно равны друг другу: $M_{21} = M_{12} = M$. Коэффициент M , равный отношению потокосцепления взаимной индукции второго контура Ψ_{12} к силе тока первого контура i_1 , создающего это потокосцепление, называется к о э ф ф и ц и е н т о м в з а и м о и н д у к ц и и, или в з а и м н о й и н д у к т и в н о с т ь ю контуров. Он имеет ту же размерность, что и собственная индуктивность L .

Взаимная индуктивность двух контуров (катушек индуктора) зависит от размеров катушек, их конфигурации и взаимного расположения, от магнитной проницаемости среды и числа витков катушек. Значение M не зависит от величины сил токов, протекающих в контурах.

Таким образом, э. д. с. взаимной индукции:

$$e_{1M} = -M \frac{di_2}{dt} \text{ и } e_{2M} = \mp M \frac{di_1}{dt}. \quad (2-21)$$

Знак минус следует ставить при согласном направлении потоков самоиндукции и взаимной индукции, а плюс — при встречном. При таком подходе коэффициент M будет всегда величиной положительной.

В общем случае суммарная (или результирующая) э. д. с., индуцируемая в первом контуре:

$$e_{1\Sigma} = -\frac{d\Psi_{1\Sigma}}{dt} = -\frac{d}{dt} (\Psi_1 \pm \Psi_{21}) = -L_1 \frac{di_1}{dt} \mp M \frac{di_2}{dt} = e_{1L} \pm e_{1M}. \quad (2-22)$$

Э. д. с. во втором контуре

$$e_{2\Sigma} = -L_2 \frac{di_2}{dt} \mp M \frac{di_1}{dt} = e_{2L} \pm e_{2M}. \quad (2-23)$$

Для системы индуктивно связанных контуров, обтекаемых электрическими токами, также справедливо правило Ленца, которое характеризует инерционные свойства электромагнитной системы и поэтому может быть названо принципом электромагнитной инерции. В общем случае этот принцип может быть сформулирован следующим образом: в системе контуров, обтекаемых электрическими токами, существует тенденция к сохранению не-

изменными магнитных потоков, сцепленных с отдельными контурами системы. При всякой попытке изменить потоки, сцепленные с контурами, в контурах возникают электродвижущие силы и текут электрические токи, стремящиеся воспрепятствовать этому изменению.

Следует добавить, что изменение магнитного потока, пронизывающего контур путем изменения линейных размеров контура или путем его перемещения, вызывает появление механической силы, действующей на контур и препятствующей этим изменениям (подробнее см. гл. 5).

Степень индуктивной связи двух магнитосвязанных контуров может быть оценена количественно с помощью так называемого коэффициента связи контуров k_s , значение которого определяется из выражения:

$$k_s = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (2-24)$$

Коэффициент k_s не может быть больше единицы. Он может быть равен единице при «идеальной» связи, когда весь поток, создаваемый первым контуром, будет пронизывать второй контур. При индукционном нагреве коэффициент связи индуктора и нагрузки всегда меньше единицы.

Контрольные вопросы

1. Какая взаимосвязь существует между напряженностью электрического поля и плотностью тока в металлическом теле?
2. Используя закон полного тока, найдите значение напряженности магнитного поля H проводника с током (см. рис. 5) в точке, отстоящей от его оси на расстоянии 0,5 м ($i = 1000$ А).
3. Как определить э. д. с. взаимной индукции двух контуров, обтекаемых одинаковым током $i_1 = i_2 = i$?

ГЛАВА 3

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРОВОДЯЩИХ ТЕЛ

Знание основных закономерностей распределения переменного тока по сечению проводящих тел очень важно при практическом использовании индукционного нагрева. Необходимость их изучения диктуется следующими причинами.

1. Нагреваемые изделия, а в некоторых случаях и индуктирующие витки и токоподводы, по которым протекают переменные токи значительной величины (тысячи, а иногда и десятки тысяч ампер), представляют собой, как правило, проводники с относительно большой площадью поперечного сечения (так называемые «массивные» проводники). Кроме того, для индукционного

нагрева часто используют токи средней и высокой частоты. Как мы увидим в дальнейшем, эти два обстоятельства способствуют сильному проявлению ряда эффектов, приводящих к неравномерному распределению тока по сечению проводящих тел.

2. При расчетах и конструировании установок для индукционного нагрева и плавки необходимо учитывать фактическое распределение тока в элементах установок и в нагреваемом металле, и, по возможности, управлять им.

Действительно, от этого во многом зависят значения электрического коэффициента полезного действия, коэффициента мощности ($\cos \varphi$) и других параметров установки. А если учесть, что индукционные установки — весьма энергоемкие агрегаты, то становится ясным, насколько важно в экономическом отношении создание наиболее рационального распределения тока в элементах этих установок. Кроме того, при сквозном нагреве или закалке (особенно деталей сложной формы) часто возникает необходимость в усилении или ослаблении нагрева отдельных участков детали. Этого можно достичь, управляя распределением тока в индукторе и детали на основе знания рассматриваемых ниже общих закономерностей протекания переменного тока по сечению массивных проводников.

§ 1. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОТЫСКАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В МАССИВНЫХ ПРОВОДНИКАХ

Применительно к распределению постоянного электрического тока в любой системе проводников принцип наименьшего действия гласит: токи, протекающие в системе проводников под действием сторонней э. д. с., выбирают такие пути, что результирующее активное сопротивление между двумя точками приложения э. д. с. оказывается наименьшим.

Так, например, при постоянном токе и параллельном включении нескольких проводников токи распределяются обратно пропорционально омическим сопротивлениям отдельных проводников.

Однако, если использовать указанный принцип в приведенной выше формулировке для анализа распределения переменного тока, то можно прийти к ошибочным выводам, особенно при анализе явлений, происходящих при повышенной частоте. Для иллюстрации сказанного рассмотрим случай, показанный на рис. 9, где изображены два ленточных токовода, расположенных под массивным проводником вблизи от него и соединенных с ним электрически у одного конца.

Из опыта известно, что при постоянном токе (или при весьма низкой частоте) распределение тока в массивном проводнике обусловлено только активным сопротивлением: растекаясь, ток уходит глубоко в толщу проводника (рис. 9, а).

Также из опыта известно, что при высокой частоте линии тока стекутся по поверхности проводника, следуя за изгибами тоководов (рис. 9, б), хотя это и приводит к возрастанию активного сопротивления контура токов. Это объясняется тем, что при переменном токе полное сопротивление системы z определяется суммой активного r и реактивного (в рассматриваемом случае — индуктивного x_L) сопротивлений:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}. \quad (3-1)$$

Переменные токи идут по пути, имеющему наименьшее результирующее сопротивление z , а не наименьшее активное сопротивление r .

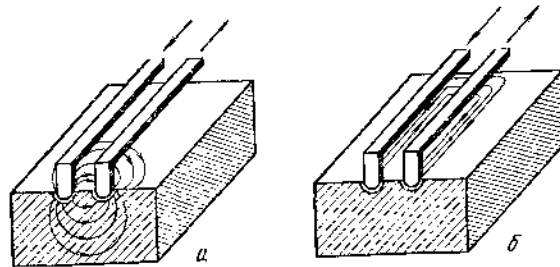


Рис. 9. Распределение линий тока в массивном теле

Чем выше частота тока, тем больше индуктивное сопротивление ωL и тем большее влияние оказывает оно на распределение токов. При высокой частоте (см. рис. 9, б) токи ищут путь с малым индуктивным сопротивлением ωL , чтобы результирующее сопротивление системы было минимальным.

Все сказанное справедливо также и для случая, когда ток в массивном проводнике возбуждается методом индукции. Так, если внутрь индуктора поместить металлическое тело, то индуцированные в металле токи распределяются таким образом, чтобы значение z было минимальным.

Следовательно, принцип наименьшего действия, распространенный на случай протекания переменного тока в массивных проводниках, может быть сформулирован следующим образом: токи, протекающие в системе проводников, под действием сторонней (приложенной извне) э. д. с. или э. д. с. электромагнитной индукции распределяются таким образом, что полное сопротивление системы между двумя точками приложения э. д. с. оказывается минимальным.

Этот общий принцип должен служить во всех случаях критерием для проверки правильности полученного решения. Проявление этого принципа на практике при индукционном нагреве металла на повышенной частоте довольно разнообразно: здесь

и так называемый поверхностный эффект и эффект близости, и катушечный, или кольцевой эффект, и так называемый эффект паза. Рассмотрим более подробно эти явления.

§ 2. ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ В МАССИВНЫХ ПРОВОДНИКАХ

Рассмотрим распределение электрического тока i в прямом цилиндрическом проводнике диаметром D и длиной l при протекании по нему постоянного ($f = 0$) и переменного ($f > 0$) тока (рис. 10).

Как известно, постоянный ток распределяется равномерно по сечению проводника, при этом его сопротивление определяется выражением:

$$r = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{4l}{\pi D^2}, \quad (3-2)$$

а плотность тока

$$\delta = 4I/\pi D^2.$$

Магнитные силовые линии как в пространстве, окружающем проводник, так и внутри проводника, представляют собой концентрические окружности с центром на оси проводника и лежащие в плоскости перпендикулярной к его оси. При этом напряженность поля в любой точке, лежащей на расстоянии R от оси, может быть определена исходя из закона полного тока (см. гл. 2, § 2):

$$H = I/2\pi R, \quad (3-3)$$

а направление силовых линий — по правилу буравчика.

Пропустим теперь по проводнику переменный ток достаточно высокой частоты и рассмотрим особенности его протекания. Для большей наглядности представим массивный проводник состоящим из большого числа элементарных проводников одинакового сечения ΔS столь малого, что в его пределах плотность тока можно считать постоянной.

На постоянном токе омическое сопротивление элементарных проводников в соответствии с выражением (3-2) одинаково и плотность тока также одинакова.

Сложнее обстоит дело при пропускании по тому же проводнику переменного тока. Выделим из множества элементарных проводников три проводника: A , B и B , отстоящих на разном расстоянии от оси: соответственно R_A , R_B и R_B , причем $R_A = 0$ и $R_B > R_B > R_A$.

Сторонний источник э. д. с. (источник питания) создает в проводнике переменное электрическое поле. Напряженность электрического поля от этого источника во всех точках пространства, занимаемого проводником в данный фиксированный момент времени одинакова.

Однако, вследствие явления электромагнитной индукции, всегда имеющего место при протекании по проводнику переменного электрического тока, кроме электрического поля, созданного сторонним (внешним) источником, в проводнике возникает собственное (вторичное) электрическое поле, которое согласно принципу электромагнитной инерции (см. гл. 2, § 3) направлено противоположно первичному: в проводнике возникает э. д. с. самоиндукции.

В отличие от сторонней э. д. с., э. д. с. самоиндукции неодинакова для элементарных проводников А, Б и В. Максимальную э. д. с. самоиндукции имеет проводник А, так как эта э. д. с. наводится как внешним, так и всем внутренним (проходящим по проводнику) магнитным потоком. В проводнике В действует минимальная э. д. с. самоиндукции, так как он охвачен лишь внешним магнитным потоком.

Плотность тока в элементарном проводнике в соответствии с принципом суперпозиции будет определяться суммарным (резльтирующим) электрическим полем, получающимся при сложении первичного и вторичного полей. Поскольку эти поля направлены навстречу друг другу, то результирующая напряженность электрического поля на оси массивного проводника (в зоне расположения элементарного проводника А) оказывается заметно меньше, чем на некотором расстоянии от оси (например, в зоне расположения проводника Б) и

Рис. 10. Распределение постоянного ($f = 0$) и переменного ($f > 500$ Гц) тока и индукции по сечению цилиндрического проводника:
а — проводник с током; б — распределение б и в по сечению

меньше, чем на поверхности (в зоне расположения проводника В). Следовательно, по мере перемещения от поверхности массивного проводника к его оси плотность тока будет непре-

рывно уменьшаться. У поверхности проводника плотность тока будет максимальна, а у его оси — минимальна.

Степень неравномерности распределения тока по сечению массивного проводника тем больше (при прочих равных условиях), чем больше его диаметр, т. е. чем «массивнее» проводник.

Явление неравномерного распределения переменного электрического тока по сечению проводника, когда плотность тока у его поверхности оказывается выше, чем в глубине проводника, называют **поверхностным эффектом** (или **скин-эффектом**)¹.

Таким образом, явление поверхностного эффекта органически присуще переменному току и имеет место во всех случаях протекания переменного тока по проводнику, независимо от того, вызвано оно приложением к проводнику внешней (сторонней) э. д. с. или приложением внешнего магнитного поля. Однако степень проявления поверхностного эффекта в разных условиях различна. От чего она зависит?

Причиной возникновения поверхностного эффекта являются электродвижущие силы самоиндукции.

Так как э. д. с. самоиндукции e_L пропорциональна скорости изменения во времени тока (2-15), то чем выше частота тока, тем сильнее выражен поверхностный эффект. При неизменной частоте тока с увеличением поперечного сечения проводника возрастает магнитный поток, проходящий по телу проводника. Следовательно, разность значений электродвижущих сил самоиндукции на оси проводника и на его поверхности также возрастает, что приводит в конечном счете к более яркому проявлению поверхностного эффекта. Таким образом, степень проявления поверхностного эффекта тем больше, чем больше радиус проводника и чем выше частота тока.

Поскольку понятие поверхностного эффекта имеет исключительно важное значение в теории индукционного нагрева, для полноты картины дадим еще одно объяснение причин его возникновения.

Рассмотрим вновь элементарные проводники А, Б, В (см. рис. 10) в массивном проводнике. Поскольку эти проводники можно считать подключенными параллельно к одному и тому же напряжению, силы токов в этих проводниках будут обратно пропорциональны значениям их полных сопротивлений Δz_i

$$\Delta z_i = \sqrt{(\Delta r_i)^2 + (\Delta x_i)^2}, \quad (3-4)$$

где Δr_i , Δx_i — активное и индуктивное сопротивление элементарного i -того проводника.

При этом из выражения

$$\Delta r_i = \rho l / \Delta S \quad (3-5)$$

¹ Skin (англ.) — кожа, в дословном переводе — скин-эффект — кожный эффект.

легко видеть, что активные сопротивления всех рассматриваемых проводников одинаковы.

Что же касается их индуктивных сопротивлений

$$\Delta x_i = 2\pi f L_i, \quad (3-6)$$

то совершенно очевидно, что для каждого из проводников значения различны и определяются соответствующими значениями их индуктивности (коэффициентов самоиндукции) — L_i .

Значения же L_i для проводников A , B и B , расположенных на разном расстоянии от оси, различны, поскольку известно (см. гл. 2, § 3), что коэффициент самоиндукции проводника пропорционален сцепленному с ним магнитному потоку. Как видно из рис. 10, элементарный проводник A , находящийся на оси, сцеплен как с внешним магнитным потоком, проходящим вне массивного проводника, так и с внутренним магнитным потоком, проходящим в теле проводника; проводник B сцеплен с внешним магнитным потоком и с частью внутреннего магнитного потока, проходящего через кольцевое сечение шириной $(R_B - R_A)$, наконец, элементарный проводник B , расположенный на поверхности, сцеплен лишь с внешним магнитным потоком.

Таким образом, коэффициент самоиндукции L_A и соответственно индуктивное Δx_A и полное Δz_A сопротивления у элементарного проводника A будут иметь большие значения, чем у проводников B и B , а у проводника B — меньшие, чем у проводника B . Соответственно силы токов в этих параллельно включенных элементарных проводниках будут обратно пропорциональны значениям их полных сопротивлений.

Следовательно, плотность переменного тока неодинакова по сечению массивного проводника: она максимальна у его поверхности и убывает по мере приближения к оси.

Распределение плотности тока по сечению массивного проводника определяется его геометрией и частотой тока, и может быть найдено для каждого конкретного случая путем решения уравнений электромагнитного поля (см. ниже гл. 4, § 1).

❖ Поверхностный эффект наблюдается при любой форме проводника.

§ 3. ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ ТОКА

При ярко выраженном поверхностном эффекте (при высокой частоте тока и при больших диаметрах проводника) уменьшение плотности тока от поверхности в глубь проводника происходит по экспоненциальному закону:

$$\delta_x = \delta_0 e^{-x/\Delta}, \quad (3-7)$$

где δ_x — плотность тока на расстоянии x от поверхности;
 δ_0 — плотность тока на поверхности проводника;
 e — основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$);

Δ — некоторая величина, имеющая размерность длины и характеризующая степень затухания магнитного поля в металле, по мере проникновения его вглубь.

Теория электромагнитного поля дает следующее выражение для Δ в плоском массивном проводнике:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}, \quad (3-8)$$

где ω — круговая частота, характеризует электромагнитное поле;

μ и γ — магнитная проницаемость и электропроводность, характеризуют параметры металла (проводника).

Подставив в уравнение (3-8) значения γ , ω и μ ($\gamma = 1/\rho$, $\omega = 2\pi f$ и $\mu = \mu_0 \mu'$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м), получим выражение для Δ в более удобной для расчета форме

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}. \quad (3-9)$$

Выражение (3-9) показывает, что степень затухания поля зависит от частоты поля f , электросопротивления ρ и магнитной проницаемости металла μ . Величину Δ называют глубиной проникновения тока.

Таким образом, как это непосредственно следует из выражения (3-7), под глубиной проникновения тока будем понимать такое расстояние от поверхности проводника (по нормали к поверхности), на котором плотность электрического тока в плоском массивном проводнике уменьшается в e раз по сравнению с плотностью тока на поверхности.

Реальное (т. е. экспоненциальное¹), показанное на рис. 11, а, распределение плотности тока по сечению проводника, помещенного в переменное электромагнитное поле, существенно затрудняет выполнение электрических и тепловых расчетов при индукционном нагреве.

Для практических расчетов реальное распределение плотности тока в нагреваемом теле удобнее заменить некоторым эквивалентным более простым распределением. На практике условно считают, что весь ток протекает в «активном» поверхностном слое конечной толщины (обозначим его Δ'), причем принимают равномерное распределение тока по сечению «активного» слоя. В остальной части сечения проводника плотность тока полагают равной нулю. На рис. 11 показано реальное (а) распределение δ по сечению массивного плоского проводника и условно принятое (б) равномерное распределение в слое Δ' .

¹ Строго говоря, экспоненциальное распределение плотности тока по сечению характерно лишь для случая нагрева плоского полуограниченного тела. Как будет показано ниже, при нагреве тел иной формы выражение $\delta_x = f(x)$ является очень сложным.

Основным вопросом при введении условного распределения является выбор толщины токонесущего слоя Δ' . Поскольку в практических расчетах нас более всего будет интересовать выделение тепловой энергии в проводящем теле, величина Δ' должна определяться исходя из следующего условия: величина выделяющейся в проводнике мощности P_{Φ}' , рассчитываемая при условном равномерном (по слою Δ') распределении плотности тока, должна быть равной истинному выделению мощности P . На основании сказанного выше найдем значение Δ' .

Определим истинное значение мощности P , выделяющейся в проводящем теле при протекании в нем переменного тока, плотность которого уменьшается с увеличением глубины по экспоненциальному закону (3-7).

Для этого на расстоянии x от поверхности выделим элементарную площадку, нормальную вектору $\vec{\delta}$ высотой a и шириной dx (см. рис. 11, а). Мощность, выделяющаяся в элементарном параллелепипеде с поперечным сечением $dS = a dx$ и длиной l , равна

$$dP = (dl)^2 dr, \quad (3-10)$$

где dl — действующее значение силы тока, протекающего по элементарному проводнику, а dr — его активное сопротивление:

$$dl = \delta_x dS = \delta_x a dx; \quad (3-11)$$

$$dr = \rho \frac{l}{a dx}. \quad (3-12)$$

С учетом уравнения (3-8) мощность dP определится из выражения:

$$dP = (\delta_x)^2 a^2 l dx = \delta_0^2 e^{-2x/\Delta} a^2 l dx. \quad (3-13)$$

Чтобы найти мощность, выделяющуюся в полуограниченной полосе высотой a , очевидно, нужно взять интеграл по x от выражения (3-13)

$$P_a = \int_0^{\infty} \delta_0^2 e^{-2x/\Delta} a^2 l dx = \delta_0^2 \frac{a^2 l \Delta}{2}. \quad (3-14)$$

Поскольку действующее значение плотности тока

$$\delta_0 = H_0 \sqrt{2}/\Delta,$$

получим

$$P_a = H_0^2 \frac{a^2 l}{\Delta}. \quad (3-15)$$

Теперь найдем выделение мощности P_{Φ} в токонесущем слое длиной l , высотой a и шириной Δ' при условном (равномерном) распределении δ :

$$P_{\Phi} = (I_{\Delta'})^2 r_{\Delta'}, \quad (3-16)$$

где $r_{\Delta'}$ и $I_{\Delta'}$ — соответственно активное сопротивление токового слоя и значение силы тока, протекающего в поверхностном слое (в глубине, за пределами слоя Δ' , как мы условились, $I = 0$).

Следовательно:

$$P_{\Phi} = (\delta S_a)^2 \rho \frac{l}{a \Delta'} = \delta^2 a l \Delta' = H_0^2 \frac{a^2 l}{\Delta'}. \quad (3-17)$$

Из условия равенства P_{Φ} и P_a находим $\Delta' = \Delta$. Таким образом, при введении равномерного распределения тока в поверхностном токонесущем слое проводника глубина этого слоя Δ' должна выбираться равной глубине проникновения Δ (3-9). При этом полученное расчетом выделение мощности в слое Δ численно равно истинному выделению мощности в массивном проводящем теле.

Определим теперь действительное значение мощности, выделяющейся в поверхностном слое толщиной Δ при реальном (а не условном, как было выше) распределении δ . Для этого в выражении (3-14) нужно изменить верхний предел интегрирования:

$$P_{\Delta} = \int_0^{\Delta} \delta_0^2 e^{-2x/\Delta} a^2 l dx = \delta_0^2 a^2 l \frac{\Delta}{2} e^{-2x/\Delta} \Big|_0^{\Delta} = -H_0^2 \frac{\rho}{\Delta} a l (1 - e^{-2x/\Delta}) = 0,865 H_0^2 \frac{\rho}{\Delta} a l = 0,865 P_a. \quad (3-18)$$

Поскольку P_a (3-15) является мерой электромагнитной энергии, проникающей через поверхность и выделяющейся в массивном теле, выражение (3-18) означает, что в действительности в поверхностном слое массивного проводника толщиной Δ , равной глубине проникновения, выделяется 86,5% всей мощности, проникающей в проводник. Это дает нам право во многих практических случаях при выполнении приближенных электрических и тепловых расчетов считать (с погрешностью 13,5%), что в слое Δ выделяется вся тепловая энергия.

Именно этим объясняется тот факт, что понятие глубины проникновения Δ играет чрезвычайно важную роль в теории индукционного нагрева. При этом в точных расчетах величина Δ выступает как параметр, характеризующий условия проникновения электромагнитного поля в проводник, а при приближенных расчетах введение понятия Δ позволяет рассматривать систему индуктор—загрузка как трансформатор, в котором загрузка, играющая роль вторичной обмотки трансформатора, заменяется эквивалентным полым цилиндром толщиной Δ .

Как видно из рис. 11, а затухание кривой, характеризующей выделение мощности в проводнике происходит гораздо более интенсивно, чем спадание кривой плотности тока. Так, на расстоянии от поверхности, равном глубине проникновения Δ , плотность тока уменьшается в e раз, т. е. до 36,8% от своего значения на поверхности, в то время как мощность уменьшается в e^2 раз и составляет лишь 13,5% от соответствующего значения на поверхности.

С точки зрения физики процесса причиной затухания электромагнитной волны является превращение энергии электромагнитного поля в тепловую энергию, вследствие чего и происходит индукционный нагрев проводника.

На рис. 12 приведена номограмма для определения глубины проникновения Δ в зависимости от частоты питающего тока и удельного электрического сопротивления для немагнитных материалов ($\mu' = 1,0$). Номограмма рассчитана по формуле (3-9).

До сих пор мы говорили о «массивном» проводнике как о бесконечно протяженном в направлении распространения электромагнитной волны. Однако, как можно видеть из приведенных данных, «массивность» проводника в электротехническом смысле является понятием относительным. Физические закономерности распространения электромагнитного поля в проводящем теле определяются не его абсолютными размерами (габаритами), а отношением характерного размера его поперечного (по отношению к магнитному полю) сечения к глубине проникновения Δ на данной частоте.

Глубина проникновения Δ является самым простым и наглядным показателем эффективности индукционного нагрева проводящего тела: если его поперечный размер заметно превышает величину 2Δ , нагрев эффективен, если же он менее Δ , нагрев неэффективен или даже невозможен. Так, например, на частоте 1 кГц медный цилиндр диаметром 15 мм, помещенный в индуктор вдоль

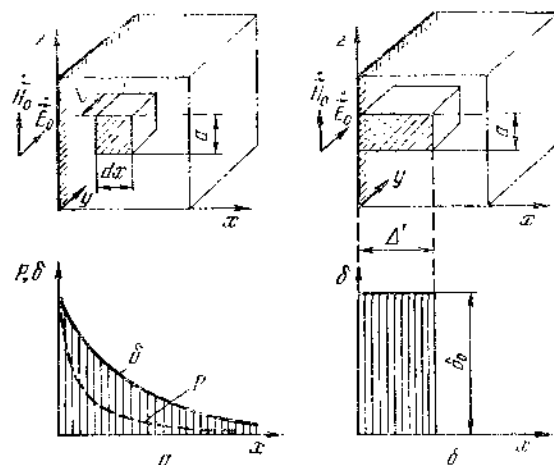


Рис. 11. Истинное (экспоненциальное) и условное (равномерное в пределах слоя Δ) распределение плотности тока δ в плоском полубесконечном теле

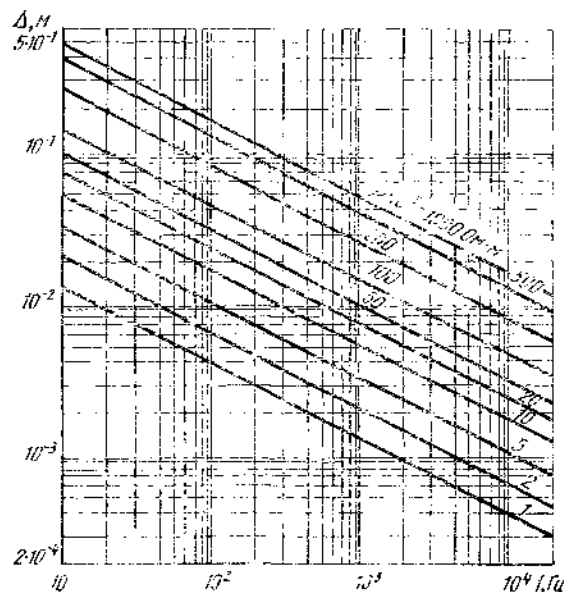


Рис. 12. Номограмма для определения глубины проникновения тока для немагнитных материалов ($\mu' = 1,0$)

магнитных силовых линий, может считаться «массивным», т. е. поддающимся эффективному нагреву, поскольку его радиус в 3,3 раза превышает глубину проникновения в медь ($\Delta_m = 2,25$ мм). В то же время аналогичный цилиндр из немагнитной стали практически прозрачен для поля этой частоты, так как его радиус меньше глубины проникновения тока в сталь ($\Delta_s = 18,2$ мм).

Очень важно также понимать, что один и тот же проводник заданной геометрии (конфигурации) может быть как «массивным», так и «прозрачным», в зависимости от его расположения по отношению к магнитному полю. Так, например, стальная пластина размером 100×100 мм и толщиной 5 мм эффективно греется (т. е. может быть признана «массивным» телом) в поле индуктора с частотой 1 кГц, если она расположена, как показано на рис. 13 сплошными линиями, и, наоборот — практически не греется вовсе, если ее повернуть и расположить, как показано штриховыми линиями, т. е. в этом случае она «прозрачна» для поля.

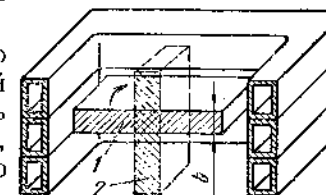


Рис. 13. К определению массивности нагреваемого тела: 1 — «массивное тело»; 2 — «тонкое» тело

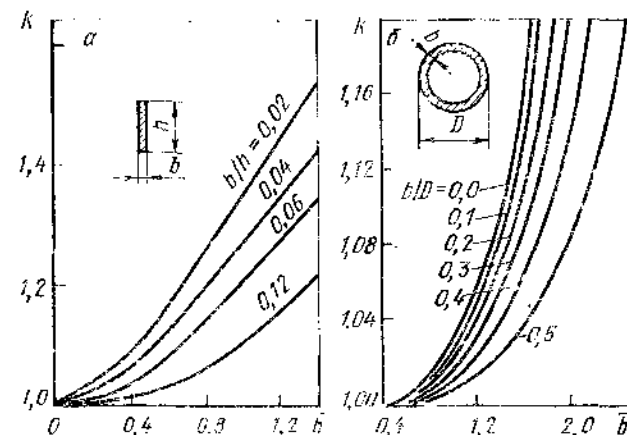


Рис. 14. Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления шины прямоугольного сечения (а) и сплошных и полых проводников круглого сечения (б) от толщины проводника b ($b \sim b \sqrt{2/\Delta}$)

Из сказанного выше следует, что сечение массивного проводника на переменном токе используется не полностью. Отношение активного сопротивления при переменном токе к омическому сопротивлению при постоянном токе будет тем выше, чем больше частота тока, а при фиксированной частоте тем выше, чем больше радиус провода.

На практике для учета поверхностного эффекта в токопроводах удобно пользоваться зависимостями, дающими отношение активного сопротивления провода к омическому:

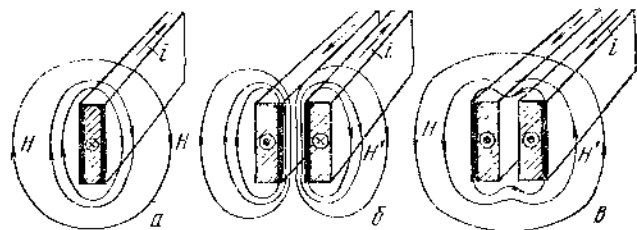
$$k = r_f / r_{\text{ом}}.$$

Вследствие неравномерности распределения плотности переменного тока величина k всегда больше единицы, т. е. r_f всегда превышает $r_{\text{ом}}$.

На рис. 14 приведены такие зависимости для проводников прямоугольного и круглого сечений. Они построены на основе выполненных точных расчетов, базирующихся на теории электромагнитного поля. В качестве аргументов приняты величины, характеризующие отношение поперечного размера провода к глубине проникновения Δ .

§ 4. ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ

При описании поверхностного эффекта в токонесущих проводниках мы полагали, что переменный ток проходит по единственному проводнику, вблизи которого нет никаких проводящих или магнитных тел, а также других проводников с токами. На рис. 15, а



Р и с. 15. Проявление эффекта близости в плоских шинах (зачернен токонесущий слой)

показана плоская шина из проводящего материала, по которой течет переменный электрический ток, создавая магнитное поле. В силу рассмотренного выше поверхностного эффекта можно считать, что если толщина шины $2a$ превышает две глубины проникновения тока в материал шины Δ (т. е. $2a > 2\Delta$), то электрический ток протекает лишь в поверхностном слое толщиной Δ по всему периметру шины.

Если поблизости от токонесущего проводника расположить другой проводник, то этот второй проводник окажет влияние на магнитное поле первого и на токораспределение в нем. Перераспределение переменного тока по сечению проводника при приближении к нему другого проводника (с током или без тока) называют эффектом близости.

Предположим, что в непосредственной близости от токоведущей шины располагается другая шина с током той же величины,

направленным встречно (рис. 15, б) или согласно (рис. 15, в) с током в основной шине. Расстояние между шинами того же порядка, что и толщина шин и гораздо меньше их высоты.

Если токи в шинах в любой момент времени направлены противоположно и численно равны друг другу¹, то напряженность магнитного поля H в пространстве между шинами больше напряженности поля отдельной (рис. 15, а) шины в непосредственной близости от нее. Снаружи шин напряженность магнитного поля близка к нулю.

Чтобы убедиться в этом, воспользуемся принципом наложения (суперпозиции). Как видно из рис. 15, б, в зазоре между шинами напряженности складываются, снаружи — вычитаются.

В результате напряженность поля между шинами (рис. 15, б) равна

$$H_3 = H + H' \approx \frac{i}{2h} \cdot 2 = \frac{i}{h},$$

а снаружи шин

$$H_3 = H - H' \approx 0.$$

Из этих рассуждений становится очевидным, что эффект близости проявляется тем сильнее, чем ближе расположены шины, так как если правую шину удалять от левой, то уже нельзя считать, что значение H' у поверхности левой шины равно значению H собственного поля этой шины. Действительно, в этом случае $H' < H$ и поэтому результирующее поле

$$H_3 = H + H' \neq 2H \text{ и } H_3 = H - H' \neq 0.$$

Практически это означает, что при удалении шин друг от друга проявление эффекта близости ослабевает.

Итак, в результате взаимодействия полей двух близко расположенных шин результирующее магнитное поле будет иметь вид, показанный на рис. 15, б.

Поскольку суммарный магнитный поток проходит как в окружающем пространстве, так и в самой шине, отдельные токовые нити (или элементарные проводники тока, см. гл. 3, § 2) в ней оказываются сцепленными с различными по величине магнитными потоками. Нить тока, лежащая на внешней стороне шины, окажется сцепленной с большим магнитным потоком. Следовательно, электрическое поле, вызванное явлением индукции и направленное противоположно основному полю шины, для этой нити будет сильнее, чем вдоль нити, лежащей на внутренней стороне шины.

Итоговое электрическое поле, равное алгебраической сумме основного поля (созданного в рассматриваемом случае внешним источником) и поля, обусловленного индукцией, на внешней

¹ Широко распространенный на практике случай — токоподвод, состоящий из двух шин, одна из шин является прямым проводом, а другая — обратным.

стороне шины окажется слабее, чем на внутренней. При достаточно ярко выраженном поверхностном эффекте ток пойдет вдоль внутренних поверхностей шин, обращенных друг к другу (рис. 15, б).

Аналогичное распределение имело бы место, если бы по основной шине протекал ток от внешнего источника, а во второй шине ток индуцировался вследствие закона электромагнитной индукции. На основании этого можно сделать важный для практики вывод: эффект близости возникает также в случае, когда «активный» токонесущий проводник располагается вблизи «пассивного» проводящего тела, не несущего собственного тока¹.

Важно заметить, что в отличие от чисто поверхностного эффекта, рассмотренного выше и являющегося следствием возникновения в проводнике э. д. с. самоиндукции, эффект близости определяется дополнительными э. д. с. взаимной индукции в элементарных проводниках системы.

Иная картина, чем в рассмотренном случае, будет, если токи в обеих шинах в любой момент времени одинаково направлены. В зазоре между шинами магнитные поля H и H' будут вычитаться, а в пространстве, окружающем шины, — складываться. В итоге результирующее поле в зазоре

$$H_z = H - H' \approx 0$$

и результирующее поле снаружи от шин

$$H_c = H + H' \approx 2H.$$

В итоге линии напряженности магнитного поля охватывают обе шины, проходя частично также по телу шин. Элементарные нити тока, лежащие на сторонах шин, обращенных друг к другу, сцеплены с большим магнитным потоком. Следовательно, плотность тока на внутренней стороне шины будет меньше, чем на наружной. При ярко выраженном поверхностном эффекте ток в этом случае будет проходить по тонкому слою, равному глубине проникновения Δ , с наружной стороны каждой шины (рис. 15, в).

Явления поверхностного эффекта и эффекта близости необходимо учитывать при проектировании высокочастотных токоподводов. При близком расположении круглых проводников распределение тока определяется теми же законами и поэтому оно аналогично показанному на рис. 15.

При коаксиальном расположении прямого и обратного проводов² (рис. 16, а) магнитное поле будет существовать лишь в пространстве между внутренним проводом и внешней трубой. В случае ярко выраженного скин-эффекта в силу проявления эффекта близости ток будет протекать в тонком слое (равном Δ)

наружной поверхности внутреннего провода и внутренней поверхности трубы. Заметим, что когда эффект близости не проявляется (уединенная труба, рис. 16, б), ток по трубе будет протекать также в слое Δ , но по внешней, а не по внутренней поверхности трубы.

Если проводник с переменным током расположить параллельно поверхности проводящего тела, то напряженность магнитного поля на поверхности тела будет наибольшей в точках, расположенных непосредственно под проводником. В точках, удаленных от проводника, напряженность поля, а следовательно, и плотность

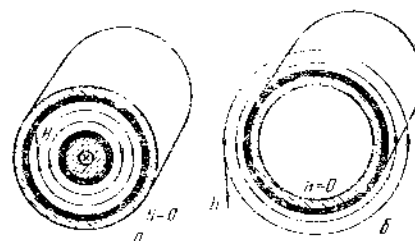


Рис. 16. Протекание переменного тока по трубе при наличии (а) и отсутствии (б) эффекта близости

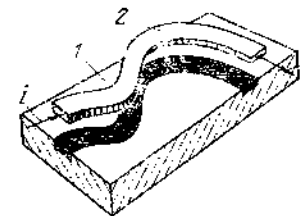


Рис. 17. Протекание индуцированного тока в плоском массивном теле

токов, индуцируемых в теле, будет меньше, чем в точках, лежащих под проводником. Приближение проводника к поверхности тела приводит к увеличению поля и к возрастанию силы тока непосредственно под проводником. Так, благодаря эффекту близости электрический ток, индуцируемый в поверхности плоской детали 1, будет строго повторять конфигурацию индуктирующего провода 2 (рис. 17). Это явление широко используется в практике индукционного нагрева.

§ 5. КОЛЬЦЕВОЙ (КАТУШЕЧНЫЙ) ЭФФЕКТ

Возьмем проводник, по которому протекает переменный ток при достаточно ярко выраженном поверхностном эффекте, например, отрезок уединенной плоской шины (рис. 18, а) и нацнем ее изгибать, стараясь образовать кольцо (виток), рис. 18, б. Можно заметить, что при этом токораспределение в шине и магнитное поле в окружающем шину пространстве, претерпевают серьезные изменения. Симметричная (по отношению к продольной оси шины) картина поля и тока превращается в четко выраженное асимметричное (одностороннее) распределение, подобное распределению при эффекте близости (см., например, рис. 15, б).

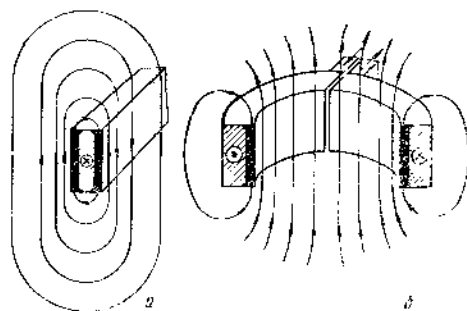
Внутри кольца магнитное поле сконцентрировано, поскольку, образовав кольцо, мы заставили весь магнитный поток пройти через внутреннюю плоскость витка, тем самым существенно уменьшив поперечное сечение для потока (ранее, как показано

¹ Представляем возможность учащимся самим доказать этот факт.

² Коаксиальные кабели широко используются в качестве токоподводов при повышенной и высокой частоте.

на рис. 18, а, тот же магнитный поток замыкался в бесконечности). Очевидно, нить кольцевого тока, проходящая по наружной стороне образовавшегося кольца будет сцеплена с большим магнитным потоком, чем нить, лежащая на внутренней поверхности кольца. Соответственно электрическое поле, вызванное индукцией, и направленное противоположно полю протекающего по кольцу тока (т. е. вызванному внешним источником), будет максимальным на наружной поверхности и минимальным — на внутренней.

Иначе говоря, индуктивность внешних нитей тока больше, чем индуктивность токовых нитей, лежащих на внутренней поверхности кольца. Соответственно и плотность тока на внутренней поверхности будет больше, чем на внешней.



Р и с. 18. Перераспределение тока в нити (а) и при изгибе ее в виде кольца (б)

Очевидно также, что это явление будет иметь место и в случае любого кольцевого проводника с любой конфигурацией (формой сечения) витка, а также в случае катушки или соленоида, состоящего из нескольких кольцевых витков.

Особую форму проявления поверхностного эффекта, выражающуюся в перераспределении тока и магнитного поля проводников, согнутых в форме кольца (или катушки), называют **кольцевым** или **катушечным эффектом**.

Кольцевой эффект приводит к тому, что переменный ток во всех случаях стремится идти только по тонкому слою, равному Δ с внутренней стороны кольца или катушки (в частности, катушки индуктора).

Кольцевой эффект бывает тем более ярко выражен, чем больше радиальный размер проводника по отношению к диаметру кольца и чем больше частота (т. е. чем более ярко выражен поверхностный эффект). Это позволяет при расчете сопротивления цилиндрических индукторов и при их конструировании считать, что ток сконцентрирован лишь на внутренней стороне индуктирующего провода на глубине, равной глубине проникновения.

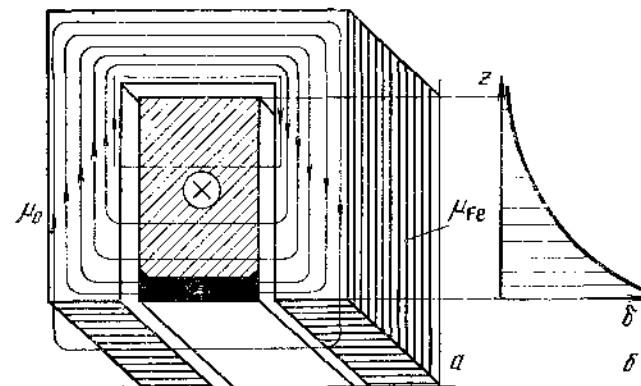
Однако кольцевой эффект имеет место не только при четко выраженной кольцевой конфигурации, но и при любых изгибах индуктирующего провода. Так, например, для изогнутого провода, подключенного к внешнему источнику, напряженность магнитного поля будет увеличиваться в местах вогнутостей и уменьшаться в местах выпуклостей. Соответственно плотность тока (а следовательно, и интенсивность нагрева) на вогнутых поверхностях будет выше, чем на выпуклых.

§ 6. ЭФФЕКТ ПАЗА

Покажем, как проявляется поверхностный эффект в проводниках при наличии вблизи них магнитной массы.

Рассмотрим для примера медный проводник прямоугольного сечения, размещенный в открытом пазу магнитопровода, выполненного из электротехнического (трансформаторного) железа (рис. 19, а).

Магнитная проницаемость μ_{Fe} железа во много раз превышает магнитную проницаемость меди и воздуха μ_0 . Поэтому магнитный



Р и с. 19. Распределение тока в проводнике, расположенном в пазу магнитопровода

поток стремится пройти большую часть своего пути по железу магнитопровода, имеющему меньшее магнитное сопротивление. В верхней части, у основания паза, весь магнитный поток будет проходить в железе. Ниже основания паза силовые линии, пройдя часть своего пути по железу, вынуждены замыкаться через тело проводника и боковой воздушный зазор. Часть силовых линий замкнется ниже проводника по воздуху, охватывая все элементы сечения проводника.

При таком распределении магнитного потока элементарная токопроводящая нить в верхней части проводника (у самого дна паза) будет сцеплена с большим потоком, а нить тока, лежащая в нижней части проводника (у открытого конца паза), будет охватываться лишь сравнительно небольшим потоком рассеяния, замыкающимся по воздуху. В нити тока, лежащей у самого дна паза, естественно, будет наводиться большая э. д. с. самоиндукции, чем в нити, лежащей в нижней части проводника.

Следовательно, плотность тока δ в зоне проводника, прилегающей к дну паза, будет весьма малой, в то время, как в нижней зоне (у открытого конца паза) она будет иметь максимальное значение. Концентрация тока в проводнике у открытого конца

паза тем больше, чем выше частота тока, проходящего по проводнику, и чем больше глубина паза (рис. 19, б).

Рассмотренное нами явление вытеснения тока в проводнике, расположенном в пазу магнитопровода, к открытому концу паза, т. е. в сторону, противоположную магнитопроводу, называют эффектом паза или эффектом Филда.

Этот эффект в максимальной степени проявляется в случае расположения проводника в глубоком пазу, однако он имеет место

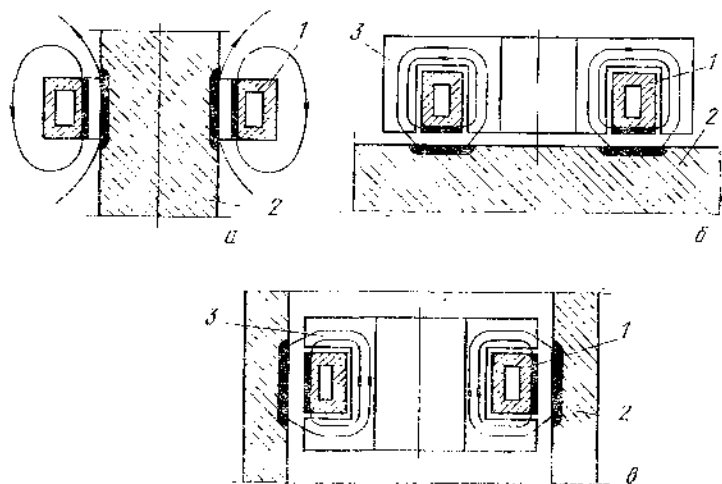


Рис. 20. Различное использование кольцевого индуктора:
1 — индуктор; 2 — деталь; 3 — магнитопровод

во всех случаях, когда в непосредственной близости от токонесущего провода располагается магнитная масса (магнитопровод).

Рассмотренные в этой главе физические эффекты имеют исключительно важное значение в теории и практике индукционного нагрева. Их необходимо учитывать во всех случаях при разработке устройств, предназначенных для индукционного нагрева и плавки. Например, используя эффект близости, можно подбором конфигурации индуктора концентрировать нагрев в определенных (заданных) зонах поверхности обрабатываемой детали. Еще большей концентрации можно достичь благодаря использованию эффекта паза (введением магнитопроводов).

Каждый из описанных выше эффектов может проявляться как самостоятельно, так и в сочетании с другими эффектами или явлениями, причем он может быть как полезным с точки зрения достижения поставленной конечной цели (например, эффективного расплавления узкой зоны металлического стержня при зонной плавке, или др.), так и вредным, мешающим достижению поста-

вленной цели. Так, например, кольцевой эффект, действуя в согласии с эффектом близости при нагреве деталей, охваченных индуктором, безусловно, полезен, так как усиливает магнитное поле внутри индуктора у поверхности детали. Однако при нагреве внутренних поверхностей (полостей) деталей индуктором кольцевой эффект затрудняет нагрев, поскольку в этом случае он действует противоположно эффекту близости, уменьшая напряженность магнитного поля у нагреваемой поверхности.

Манипулируя различными техническими средствами управления рассмотренными выше явлениями, можно изменять характер проявления описанных эффектов в соответствии с нашими желаниями. Так, например, один и тот же кольцевой индуктор (рис. 20) можно использовать для эффективного индукционного нагрева: цилиндрической детали (рис. 20, а — здесь поверхностный и кольцевой эффект действуют согласно); плоской поверхности (рис. 20, б — здесь применен магнитопровод, охватывающий виток индуктора с пазом, открытым клизу); внутренней поверхности цилиндра (рис. 20, в — здесь применен магнитопровод с пазом, открытым в сторону нагреваемой поверхности).

В дальнейшем мы еще будем возвращаться к рассмотрению указанных явлений.

Контрольные вопросы

1. Назовите причины возникновения поверхностного эффекта в массивном проводнике.
2. Используя данные, приведенные на рис. 11-8, определите глубину проникновения тока в алюминий, медь, железо и олово при частотах 50, 1000, 2400, 10 000 Гц при различных температурах и составьте таблицу:

Металл	Т, К	ρ , Ом·м	Δ , мм, при f , Гц			
			50	1000	2400	10 000
Алюминий

3. Какая доля мощности, проникающей в проводник, выделяется в слое толщиной Δ ?
4. Каким образом в практике индукционного нагрева можно использовать описанные в данной главе явления для повышения эффективности нагрева? Приведите примеры.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИНДУКТОР — ЗАГРУЗКА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

§ 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СПЛОШНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЦИЛИНДРЕ, ПОМЕЩЕННОМ В ПОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДУКТОРА

Рассмотрим электромагнитную систему, представляющую собой бесконечно длинный сплошной металлический цилиндр с однородными по объему свойствами (электропроводностью γ и магнитной проницаемостью μ), помещенный в поле бесконечно длинного цилиндрического индуктора (рис. 21), обтекаемого перемещным синусоидальным током. Поле, создаваемое таким индуктором, образует цилиндрическую электромагнитную волну (т. е. электромагнитную волну с цилиндрическим фронтом), падающую на боковую поверхность металла.

Вектор напряженности магнитного поля \vec{H} (здесь и далее точка наверху означает, что \vec{H} является комплексной величиной) в зазоре направлен вдоль образующей цилиндра параллельно его оси и оси индуктора (предполагается, что оси индуктора и цилиндра совпадают). Значение напряженности магнитного поля у поверхности металлического цилиндра обозначим через \vec{H}_0 .

Векторы напряженности электрического поля \vec{E} в зазоре направлены по касательной к окружностям, центры которых лежат

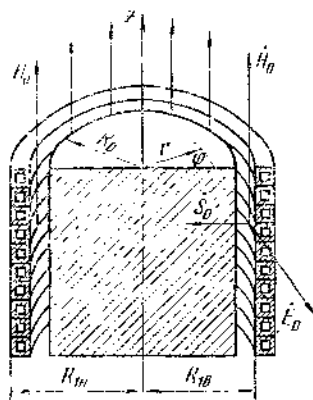


Рис. 21. Отрезок бесконечно длинного цилиндра, помещенного в длинный цилиндрический индуктор

на оси. Обозначим значение \vec{E} на поверхности металла через \vec{E}_0 .

Чтобы найти распределение E и H в металле, а также получить выражения для определения величины электромагнитной энергии, поглощаемой металлическим цилиндром, обычно пользуются цилиндрической системой координат, причем ось z направляют вдоль оси цилиндра.

При такой постановке решение задачи существенно упрощается, так как она становится одномерной, т. е. интересные нас параметры поля (в силу осевой симметрии и бесконечной напряженности по оси z) меняются лишь вдоль одной координаты r .

Электромагнитная волна несет энергию, величина которой определяется вектором Умова — Пойнтинга. При протекании по индуктору синусоидального тока выражение для средней за период значения вектора потока энергии, проникающей через единицу боковой поверхности цилиндра, имеет вид

$$\dot{S}_0 = \frac{1}{2} [\vec{E}_0 \vec{H}_0^*], \quad (4-1)$$

где \vec{H}_0^* — комплексно-сопряженная величина напряженности магнитного поля.

Поскольку \dot{S}_0 является комплексной величиной, в результате решения поставленной задачи получают две составляющие энергии: действительная часть вектора (4-1) даст величину потока активной энергии, выделяемой в металле в виде тепла, а мнимая часть — величину потока энергии переменного магнитного поля (реактивной энергии).

Очевидно, чтобы получить значение \dot{S} в любой точке внутри цилиндра (т. е. распределение по радиусу внутренних источников

тепла), нужно подставить в выражение (4-1) значения $\vec{H}(r)$ и $\vec{E}(r)$ в соответствующей точке. Таким образом, задача сводится к отысканию выражений, дающих распределение напряженностей магнитного и электрического поля по радиусу металлического цилиндра: $\vec{H} = f(r)$ и $\vec{E} = f(r)$.

В гл. 2 мы рассмотрели основные законы переменного электромагнитного поля, записанные в интегральной форме [см., например, (2-4), (2-5), (2-9), (2-7)]. Однако интегральная форма записи не даст возможности отыскать значения параметров поля в каждой точке изучаемого пространства.

Так, интегральную форму закона полного тока (2-9) применяют в тех случаях, когда можно использовать симметрию в распределении поля и токов. Если же поле имеет сложный характер и не удастся составить замкнутый контур, все точки которого находились бы в симметричных (или одинаковых) условиях, то несмотря на то, что интегральная форма записи справедлива и для такого контура, использовать ее для определения напряженности в любой точке поля не удастся, так как H нельзя вынести из-под знака интеграла.

Поэтому для нахождения распределения напряженностей электрического и магнитного полей в толще металла используют основные уравнения электромагнитного поля в дифференциальной форме (уравнения Максвелла). В табл. 1 приведены две формы записи основных уравнений поля.

Эти уравнения должны быть дополнены выражением для закона Ома в дифференциальной форме (2-1): $\vec{E} = \gamma \vec{E}$.

ТАБЛИЦА 1
ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МЕТАЛЛЕ

Физический смысл уравнений	Интегральная форма	Дифференциальная форма
Закон полного тока	$\oint \vec{H} d\vec{l} = i$	$\text{rot } \vec{H} = \vec{\delta}$
Закон электромагнитной индукции	$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\text{rot } \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}$
Принцип непрерывности магнитного потока	$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$	$\text{div } \vec{H} = 0$
Принцип непрерывности электрического тока	$\oint \vec{\delta} d\vec{S} = 0$	$\text{div } \vec{E} = 0$

Для получения однозначного решения в каждом конкретном случае система уравнения (табл. 1) должна быть дополнена соответствующими граничными (т. е. пространственными) и начальными (т. е. временными) условиями, характеризующими данную конкретную задачу.

Поскольку решение системы уравнений в каждом конкретном случае достаточно сложно и часто требует использования ЭВМ, мы приведем лишь конечные результаты и дадим их графическую интерпретацию.

Выражения для \vec{H} и \vec{E} в рассматриваемом случае (см. рис. 21) получены в виде:

$$\vec{H} = \vec{e}_z H_{\text{om}} \frac{I_0(\sqrt{j}\bar{R})}{I_0(\sqrt{j}\bar{R}_0)}; \quad (4-2)$$

$$\vec{E} = \vec{e}_r H_{\text{om}} \frac{1}{\gamma\Delta} \frac{I_1(\sqrt{j}\bar{R})}{I_0(\sqrt{j}\bar{R}_0)}; \quad (4-3)$$

где H_{om} — максимальное (амплитудное) значение напряженности магнитного поля;

\vec{e}_z и \vec{e}_r — единичный вектор по соответствующей координате;

$\bar{R}_0 = R_0\sqrt{2}/\Delta$ — относительный радиус нагреваемого цилиндра;

$\bar{R} = R\sqrt{2}/\Delta$ — относительный текущий радиус;

$I_0(\sqrt{j}\bar{R})$

и $I_1(\sqrt{j}\bar{R})$ — функции Бесселя нулевого и первого порядка от комплексного аргумента ($\sqrt{j}\bar{R}$).

Поскольку таблицы с функциями Бесселя можно найти в соответствующих справочниках, с помощью выражений (4-2) и (4-3)

можно исследовать картину распределения магнитного и электрического полей внутри (в теле) металлического цилиндра.

На рис. 22 приведены кривые, характеризующие затухание магнитного и электрического полей по радиусу цилиндра. По оси ординат отложены абсолютные значения $|\vec{H}|$ и $|\vec{E}|$ (их модули), отнесенные к модулям $|\vec{H}_0|$ и $|\vec{E}_0|$ на поверхности, а по оси абс-

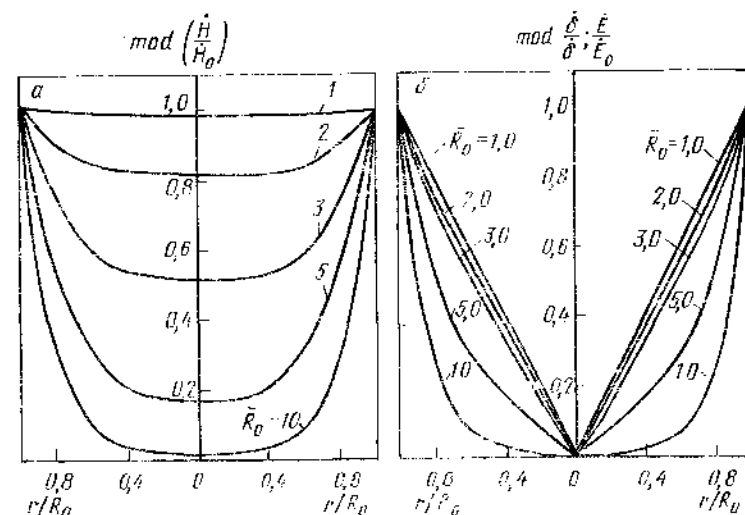


Рис. 22. Затухание магнитного (а) и электрического (б) полей в проводящем цилиндре

цисс — отношение текущего радиуса r к радиусу цилиндра R_0 .

Поскольку плотность тока $\vec{\delta} = \gamma\vec{E}$, то кривые рис. 22, б дают также и картину затухания плотности тока.

Следует обратить внимание, что характер изменения модулей $|\vec{E}|$ и $|\vec{H}|$ несколько различается: на оси цилиндра во всех случаях $|\vec{E}| = 0$, но $|\vec{H}| \neq 0$ (только при больших аргументах \bar{R}_0 $|\vec{H}| \rightarrow 0$).

Теперь, получив выражения (4-2) и (4-3) для \vec{H} и \vec{E} , можно найти поток электромагнитной энергии \vec{S} в любой точке нагреваемого цилиндра. Опуская выкладки, приведем окончательное выражение для \vec{S} :

$$\vec{S} = -\vec{e}_r \frac{H_{\text{om}}^2}{2\gamma\Delta} \bar{R}_0 |\Psi_0(\bar{R})| j\Psi_0(\bar{R}); \quad (4-4)$$

где $\Psi_a(\bar{R})$ и $\Psi_p(\bar{R})$ — вспомогательные функции:

$$\Psi_a(\bar{R}) = \frac{\sqrt{2}}{\bar{R}_0} \frac{\text{ber}'(\bar{R}) \text{ber}(\bar{R}) + \text{bei}'(\bar{R}) \text{bei}(\bar{R})}{\text{ber}^2(\bar{R}_0) + \text{bei}^2(\bar{R}_0)}; \quad (4-5)$$

$$\Psi_p(\bar{R}) = \frac{\sqrt{2}}{\bar{R}_0} \frac{\text{ber}'(\bar{R}) \text{ber}(\bar{R}) - \text{bei}'(\bar{R}) \text{bei}(\bar{R})}{\text{ber}^2(\bar{R}_0) + \text{bei}^2(\bar{R}_0)}. \quad (4-6)$$

Здесь $\text{ber}(\bar{R})$, $\text{ber}'(\bar{R})$ и $\text{bei}(\bar{R})$, $\text{bei}'(\bar{R})$ — действительные и мнимые части функции Бесселя и их производные.

Знак «минус» в выражении (4-4) означает, что поток энергии движется от поверхности к оси цилиндра. В дальнейшем знак «минус» будем опускать.

Численную величину всего потока энергии, проникающего в металл через поверхность цилиндра, можно получить, подставив в выражение (4-4) $r = R_0$:

$$\dot{S}_0 = \frac{H_{0m}^2}{2\gamma\Delta} \bar{R}_0 [\Psi_a(\bar{R}_0) + j\Psi_p(\bar{R}_0)]. \quad (4-7)$$

В дальнейшем вместо $\Psi_a(\bar{R}_0)$ будем писать просто Ψ_a , а вместо $\Psi_p(\bar{R}_0)$ — Ψ_p . Тогда величина потока активной энергии

$$S_{0a} = P_{\text{полн}} = \frac{H_{0m}^2}{2\gamma\Delta} \bar{R}_0 \Psi_a \quad (4-8)$$

и величина потока реактивной энергии

$$S_{0p} = Q_{\text{полн}} = \frac{H_{0m}^2}{2\gamma\Delta} \bar{R}_0 \Psi_p. \quad (4-9)$$

Переходя от амплитудных H_{0m} к действующим значениям H_0 ($H_0 = H_{0m}/\sqrt{2}$) и подставляя вместо \bar{R}_0 и Δ их значения, после простых преобразований получим следующие выражения для активной (Вт/м²) и реактивной (вар/м²) мощности в нагреваемом металле:

удельная мощность на единицу боковой поверхности цилиндра:

$$P_{\text{полн}} = 2,78 \cdot 10^{-6} H_0^2 d_0 \mu' f \Psi_a; \quad (4-10)$$

$$Q_{\text{полн}} = 2,78 \cdot 10^{-6} H_0^2 d_0 \mu' f \Psi_p; \quad (4-11)$$

настил мощности на единицу высоты цилиндра:

$$P_{1,0} = 8,75 \cdot 10^{-6} H_0^2 d_0 \mu' f \Psi_a; \quad (4-12)$$

$$Q_{1,0} = 8,75 \cdot 10^{-6} H_0^2 d_0 \mu' f \Psi_p; \quad (4-13)$$

мощность, поглощаемая цилиндром высотой h :

$$P = 8,75 \cdot 10^{-6} H_0^2 d_0 \mu' f h \Psi_a; \quad (4-14)$$

$$Q = 8,75 \cdot 10^{-6} H_0^2 d_0 \mu' f h \Psi_p. \quad (4-15)$$

Если известна сила тока в индукторе I , то в рассматриваемом случае (бесконечно протяженная система) можно пользоваться другими выражениями для P и Q , которые могут быть легко получены из уравнений (4-14) и (4-15), если подставить в них $\gamma = 1/\rho$ и $H_0 = H_r = I\omega/h$.

Тогда активная (Вт) и реактивная (Вар) мощности в отрезке цилиндрической загрузки высотой h :

$$P = I^2 \omega^2 \frac{\pi D_0}{h} \frac{\bar{R}_0}{\Delta} \rho \Psi_a; \quad (4-16)$$

$$Q = I^2 \omega^2 \frac{\pi D_0}{h} \frac{\bar{R}_0}{\Delta} \rho \Psi_p. \quad (4-17)$$

Как известно, активная, реактивная и полная мощности могут быть выражены через силу тока и сопротивление следующим образом:

$$P = I^2 r; \quad Q = I^2 x; \quad S = I^2 z = I^2 \sqrt{r^2 + x^2}.$$

Таким образом, активное, реактивное и полное сопротивления цилиндрической загрузки (обозначим их индексом «2») могут быть определены из уравнений (4-16) и (4-17) путем деления их на квадрат силы тока:

$$r_2 = \frac{\pi D_0}{\Delta_2 h_2} \rho \omega^2 \bar{R}_0 \Psi_a;$$

$$x_2 = \frac{\pi D_0}{\Delta_2 h_2} \rho \omega^2 \bar{R}_0 \Psi_p;$$

$$z_2 = \frac{\pi D_0}{\Delta_2 h_2} \rho \omega^2 \bar{R}_0 \sqrt{\Psi_a^2 + \Psi_p^2}.$$

(4-18)

Вспомогательные функции $\Psi_a = f(\bar{R}_0)$ и $\Psi_p = f(\bar{R}_0)$ представлены на рис. 23. При больших значениях относительного радиуса цилиндра $\bar{R}_0 > 10$ эти функции равны друг другу:

$$\Psi_a = \Psi_p \approx 1/\bar{R}_0.$$

Это означает, что при ярко выраженном поверхностном эффекте активная и реактивная мощности в металле также равны друг другу, в то время как при малых значениях \bar{R}_0 (в случае полупрозрачного тела) реактивная мощность в металле значительно превосходит активную составляющую.

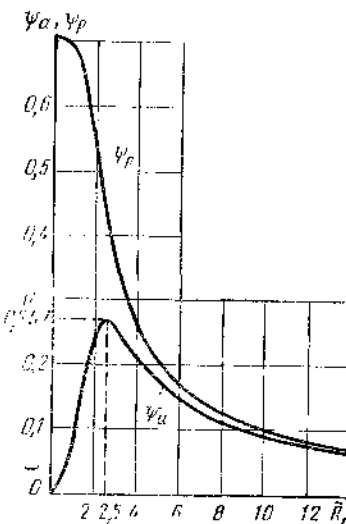


Рис. 23. Вспомогательные функции $\Psi_a(\bar{R})$ и $\Psi_p(\bar{R})$

§ 2. АКТИВНАЯ И РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТИ В МЕТАЛЛЕ ИНДУКТОРА

Основным назначением индуктора любого нагревательного или плавильного устройства является создание переменного магнитного поля в зоне загрузки. Созданные индуктором электромагнитные волны падают на «активную» поверхность нагреваемой детали. Сам индуктор, находящийся в созданном им же электромагнитном поле, также поглощает энергию поля, которая вы-

деляется в теле индуктора в виде электрических потерь. При этом индуктор (см. рис. 21) может быть представлен в виде полого цилиндра, на внутреннюю поверхность которого падает электромагнитная волна. Поэтому для изучения процессов в металле индуктора можно использовать решения, которые дает теория поля применительно к такой его конфигурации.

Так, для рассматриваемого случая (см. рис. 21) выражения для активной и реактивной мощностей в металле индуктора, отнесенных к единице его «активной» (в данном случае — внутренней) поверхности:

$$P_{\text{пов. и}} = 2 \cdot 10^{-3} H_0^2 \sqrt{\rho \mu'} F_0 \text{ Вт/м}^2 \quad (4-19)$$

и

$$Q_{\text{пов. и}} = 2 \cdot 10^{-3} H_0^2 \sqrt{\rho \mu'} G_0 \text{ Вар/м}^2, \quad (4-20)$$

Рис. 24. Вспомогательные функции F_0 и G_0

где F_0 и G_0 — вспомогательные функции от аргумента $(\bar{R}_n - \bar{R}_n)/\sqrt{2}$, показанные на рис. 24.

Выражения (4-19) и (4-20) получены в предположении, что индуктор представляет собой полый цилиндр, т. е. образует как бы один сплошной виток. Однако часто индуктор наматывается из медной трубки, образуя катушку (соленоид), между витками которой наносится изоляция толщиной $b_{\text{из}}$. Очевидно, для такого (многовиткового) индуктора действительные потери будут несколько выше, чем даваемые выражением (4-19). Это можно учесть, введя коэффициент заполнения индуктора, равный отношению высоты индуктирующего провода $h_{\text{тр}}$ (трубки) к шагу намотки h_n :

$$k_{\text{з. и}} = h_{\text{тр}}/h_n = h_{\text{тр}}/(h_{\text{тр}} + b_{\text{из}}).$$

Таким образом, электрические потери в многовитковом индукторе высотой h_1 с числом витков ω и коэффициентом заполнения $k_{\text{з. и}}$ при протекании по нему тока I_1 равны:

$$P_{\text{э. и}} = 2\pi 10^{-3} I_1^2 \omega^2 \sqrt{\rho \mu'} f \frac{D_n}{h_1 k_{\text{з. и}}} F_0. \quad (4-21)$$

Уравнение для реактивной мощности в металле индуктора запишется аналогично:

$$Q_{\text{э. и}} = 2\pi 10^{-3} I_1^2 \omega^2 \sqrt{\rho \mu'} f \frac{d_n}{h_1 k_{\text{з. и}}} G_0. \quad (4-22)$$

График

$$F_0 = f[(\bar{R}_{\text{ин}} - \bar{R}_{\text{ин}})/\sqrt{2}]$$

позволяет найти оптимальное значение толщины индуктирующего провода, обеспечивающее минимум электрических потерь в индукторе. Функция F_0 имеет минимум при $[(\bar{R}_{\text{ин}} - \bar{R}_{\text{ин}})/\sqrt{2}] \approx \pi$; откуда получим: $2(R_{\text{ин}} - R_{\text{ин}})/\Lambda_1 = \pi$ и оптимальная толщина индуктирующего провода

$$(R_{\text{ин}} - R_{\text{ин}})_{\text{опт}} = b_{\text{н. опт}} = \Lambda_1 \pi / 2 = 1,57 \Lambda_1. \quad (4-23)$$

Здесь для индукторов, выполненных из водоохлаждаемых (подлых) трубок, под $b_{\text{н. опт}}$ следует понимать толщину стенки трубки, обращенную к нагреваемой детали, а не весь радиальный размер трубки.

При выполнении условия $b_n \geq 1,57 \Lambda_1$ (на практике оно, как правило, соблюдается) активное r_1 и внутреннее реактивное x_1 сопротивления индуктора определяются (с учетом изложенного в гл. 3, § 3) по простой формуле

$$r_1 = x_{1\text{в}} \approx \rho \frac{\pi D_1'}{\Lambda_1 h_1 k_{\text{з. и}}}, \quad (4-24)$$

где D_1' — расчетный диаметр индуктора (см. гл. 9).

§ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ К. П. Д. СИСТЕМЫ ИНДУКТОР — ЗАГРУЗКА

Под электрическим коэффициентом полезного действия системы индуктор — нагрузка понимают отношение активной мощности, выделяющейся в нагрузке (обозначим ее P_2), к суммарной активной мощности индуктирующей системы $P_{\text{и}}$, складывающейся из мощности P_2 и активных потерь в индукторе $P_{\text{э. и}}$, т. е.

$$\eta_{\text{э}} = P_2 / (P_2 + P_{\text{э. и}}) = 1 / \left(1 + \frac{P_{\text{э. и}}}{P_2} \right). \quad (4-25)$$

Для случая нагрева сплошного цилиндра получим η_3 , подставив в уравнение (4-25) соответствующие выражения для P_2 (4-19) и $P_{2,н}$ (4-21):

$$\eta_3 = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2 k_{з.н}} \sqrt{\frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2}} \frac{F_0}{R_2 \Psi_a}}. \quad (4-26)$$

На рис. 25, а приведены зависимости электрического к. п. д. от относительного радиуса нагреваемого цилиндра \bar{R}_2 для случая нагрева стального цилиндра с удельным электросопротивлением $\rho_2 \approx 10^{-6}$ Ом·м и $\mu'_2 = 1$, что соответствует температуре цилиндра

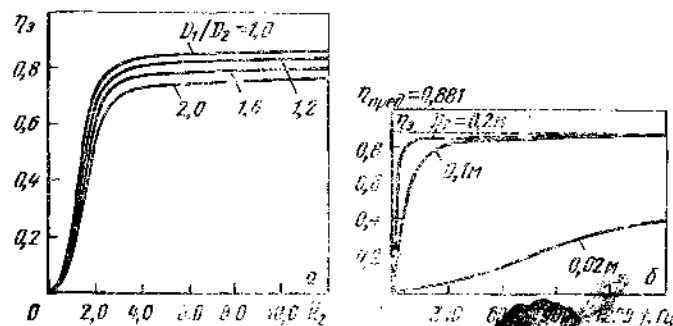


Рис. 25. Зависимость электрического к. п. д. η_3 системы индуктор — загрузка от \bar{R}_2 (а) и от частоты f при $D_1/D_2 = 1$ (б)

около 1100 К. Удельное сопротивление материала индуктора принято $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (индуктор изготовлен из меди). Кривые (рис. 25) показывают также влияние зазора между индуктором и загрузкой (величина которого характеризуется отношением диаметров индуктора и цилиндра D_1/D_2) на величину η_3 . Так, при больших значениях \bar{R}_2 увеличение соотношения D_1/D_2 в 2 раза приводит к уменьшению η_3 примерно на 10—12%.

Из рис. 25 видно, что η_3 в очень сильной степени зависит от \bar{R}_2 в диапазоне $0 < R_2 < 2$. Полагая, что точка перегиба кривых, в которой достигается значение $\eta_3 \approx 0,9\eta_{пред}$ находится в районе значений $\bar{R}_2 = 2,5$, можно найти минимальное значение частоты $f_{мин}$, допустимое с точки зрения эффективности нагрева:

$$\bar{R}_2 = \frac{R_2 \sqrt{2}}{\Delta_2} = \frac{R_2 \sqrt{2}}{\sqrt{2}} \sqrt{2\pi f \mu'_2 \gamma_2} \geq 2,5, \quad (4-27)$$

откуда

$$f_{мин} \geq \frac{\pi \rho_2}{\mu'_2 D_2^2} 10^6. \quad (4-28)$$

Предельное значение $\eta_{пред}$, к которому стремятся η_3 с увеличением относительного радиуса \bar{R}_2 , можно получить из выражения

(4-26), если подставить в него предельные значения вспомогательных функций F_0 и $(\bar{R}_2 \Psi_a)$ при $\bar{R}_2 \rightarrow \infty$.

Функция F_0 стремится к единице при $\bar{R}_2 \rightarrow \infty$ (см. рис. 24). Как указывалось в § 1, при больших значениях \bar{R}_2 функции $\Psi_a = \Psi_r \approx 1/\bar{R}_2$, следовательно, произведение $(\bar{R}_2 \Psi_a) \rightarrow 1,0$.

Умножим числитель и знаменатель дроби в нижней части выражения (4-26) на πh и обозначим $\pi(D_1 + \Delta_1)h = \Pi'_1$ и $\pi(D_2 - \Delta_2)h = \Pi'_2$, где Π'_1 и Π'_2 — расчетные значения периметров индуктора и нагреваемого цилиндра соответственно. Тогда

$$\eta_{пред} = \frac{1}{1 + \frac{\Pi'_1}{\Pi'_2} \frac{1}{k_{з.н}} \sqrt{\frac{\rho_2 \mu'_1}{\rho_1 \mu'_2}}}. \quad (4-29)$$

Анализ выражения (4-29) показывает, что $\eta_{пред}$ тем выше, чем ближе значение периметра Π'_2 загрузки к периметру Π'_1 индуктора, т. е. во всех случаях для обеспечения высокого электрического к. п. д. следует стремиться к уменьшению зазора между индуктором и загрузкой.

Наибольшее влияние на электрический к. п. д. при индукционном нагреве оказывают физические свойства нагреваемых материалов и материала индуктора. Из выражения (4-29) и из рис. 24 становится ясно, почему индукторы обычно выполняют из немагнитного материала ($\mu'_2 = 1,0$) с минимальным удельным электросопротивлением. В этом случае, особенно при нагреве магнитных материалов ($\mu'_2 \gg 1,0$) с высоким удельным электросопротивлением ($\rho_2 \gg \rho_1$) достигается высокое значение $\eta_{пред}$ и, наоборот, нагрев загрузки из немагнитного металла с низким удельным сопротивлением (например, золота, серебра, меди и т. п.) энергетически невыгоден, так как при $\rho_2 \ll \rho_1$ к. п. д. не может быть выше 50%, в то время, как при нагреве магнитной стали в медном индукторе он может достигать значений, превышающих 90—95%. Именно поэтому часто плавку цветных металлов осуществляют в металлических, графитовых или в графито-шамотных тиглях, имеющих высокие значения ρ и позволяющих резко повысить к. п. д. индукционной плавки.

Из выражения (4-29) также следует, что при конструировании длинных индукторов следует стремиться к высокому значению коэффициента заполнения $k_{з.н}$ индуктора.

Выражение (4-26) позволяет выявить очень важную для практики зависимость η_3 от частоты f . Эта зависимость скрыта в отношении функций $F_0/\bar{R}_2 \Psi_a$. На рис. 25, б показан характер изменения η_3 от f при нагреве стального цилиндра (с теми же значениями ρ и μ , что и на рис. 25, а) с различными диаметрами при $D_1/D_2 = 1,0$. Пунктиром показано предельное значение электрического к. п. д., определенное по формуле (4-29).

Анализ кривых рис. 25, б показывает, что для достижения хорошего к. п. д. при снижении диаметра нагреваемого цилиндра частота тока должна повышаться: так, при $D_2 = 0,2$ м достаточно высокое значение η , достигается при $f \geq 150 \div 200$ Гц, при $D_2 = 0,1$ м величина $f = 300 \div 400$ Гц и, наконец, при $D_2 = 0,02$ м частота должна быть уже не менее 7—8 кГц. К тем же выводам можно прийти, используя выражение (4-28).

Важно отметить, что электрический к. п. д. не остается постоянным в процессе нагрева или индукционной плавки, поскольку с повышением температуры загрузки меняются ее электро- и теплофизические свойства. Особенно резко эта зависимость проявляется при нагреве магнитной загрузки (см. гл. 8). При плавке, кроме того, меняется также и геометрия загрузки, и, в частности, значение параметра R_2 .

Во всех случаях нужно стремиться к достижению максимального значения к. п. д. за весь цикл нагрева или индукционной плавки.

§ 4. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ИНДУКТОР — ЗАГРУЗКА

Коэффициент мощности системы индуктор — нагрузка $\cos \varphi_n$ определяется, очевидно, значениями активных и реактивных мощностей в нагреваемом металле, в индукторе и в зазоре между индуктором и нагрузкой. Выражения для мощности в нагрузке и в индукторе были получены выше (4-16), (4-17) и (4-21), (4-22).

Выражения для активной и реактивной составляющих мощности в зазоре могут быть получены путем рассмотрения электромагнитных явлений в полости индуктора и решения уравнений Максвелла для полости (при соответствующих граничных условиях).

В результате решения, как и следовало ожидать, получают, что при отсутствии в полости каких-либо проводящих тел активная мощность в зазоре $P_z = 0$, т. е. она идет лишь на создание переменного магнитного потока.

Выражение для реактивной мощности (Вар) в зазоре получено в виде:

$$Q_z = 2\pi 10^{-6} I_{\text{ин}}^2 \omega^2 f \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4-30)$$

Множитель, стоящий в квадратных скобках, характеризует площадь зазора между индуктором и нагрузкой, поэтому из выражения (4-30) следует, что мощность Q_z тем больше, чем больше зазор.

Таким образом, выражение для коэффициента мощности системы индуктор — нагрузка

$$\cos \varphi_n = \frac{P_1 + P_2}{V(P_1 + P_2)^2 + (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2}$$

$$\text{или } \cos \varphi_n = \frac{1}{V1 + \left(\frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{P_1 + P_2} \right)^2}. \quad (4-31)$$

На рис. 26 приведены кривые зависимости $\cos \varphi_n$ от относительного радиуса нагреваемого цилиндра R_2 при различных значениях отношения D_1/D_2 , являющейся мерой величины зазора. Верхняя кривая дает предельное значение $\cos \varphi_n$, теоретически достижимое при нагреве сплошного металлического цилиндра и определяемое свойствами нагреваемого цилиндра.

Анализ кривых рис. 26 показывает, что наибольшее влияние на $\cos \varphi_n$ оказывает величина зазора. Так, при увеличении D_1/D_2 от 1,0 до 2,0 $\cos \varphi_n$ уменьшается в 10—15 раз.

В общем случае индукционного нагрева на $\cos \varphi_n$ оказывают влияние следующие факторы: величина воздушного зазора, свойства нагреваемого металла, частота тока, относительный радиус загрузки, геометрия индуктора, конструктивные особенности установки.

В практике индукционного нагрева значения коэффициента мощности (его часто называют «естественным») $\cos \varphi_n$ колеблются в очень широких пределах. Так, например, в индукционных канальных печах для чугуна $\cos \varphi_n > 0,9$, в то время, как при плавке цветных металлов в индукционных тигельных печах на повышенной частоте он может быть ниже 0,05.

Вопросы компенсации реактивной мощности и увеличения естественного $\cos \varphi_n$ до требуемых значений будут рассмотрены ниже.

§ 5. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ СОВОКУПНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРОВ

Из выражения (4-29) следует, что электрический к. п. д. при нагреве сплошного цилиндра зависит от отношения его периметра к периметру индуктора, причем значение к. п. д. тем больше, чем больше это отношение. Разумется, это утверждение верно лишь при ярко выраженном поверхностном эффекте в нагреваемом цилиндре.

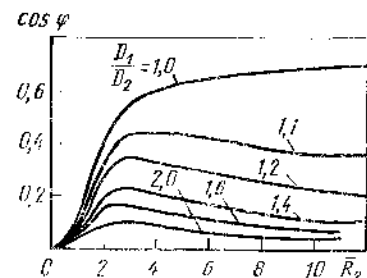


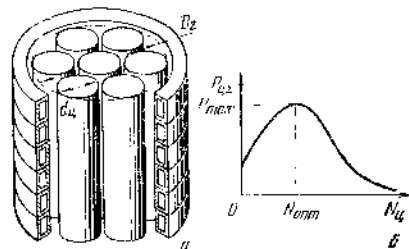
Рис. 26. Зависимость $\cos \varphi$ системы индуктор — нагрузка от величины зазора

Представим себе случай, когда в тот же индуктор помещено несколько цилиндров меньшего диаметра (рис. 27, а). Пусть частота питания индуктора достаточно высока и поверхностный эффект в каждом из цилиндров ярко выражен. Очевидно, при увеличении числа цилиндров $N_{ц}$ диаметром $d_{ц}$, вписанных в окру-

жность диаметром D_2 , их суммарный периметр, равный $\Pi' = \sum \Pi_i = \sum_{i=1}^{N_{ц}} (\pi d_{ц})_i$,

может превышать периметр одного цилиндра диаметром D_2 , т. е. $\Pi'_2 > \Pi_2$, а в некоторых случаях и превосходить даже периметр индуктора, т. е. $\Pi'_2 > \Pi_1$. Следовательно, в этом случае можно получить более высокие значения электрического к. п. д., чем предельное его значение в случае нагрева одного цилиндра диаметром D_2 , определяемое по формуле (4-29).

Покажем теперь более строго, как меняются значения η и суммарной мощности, выделяющейся в нагреваемом металле при нагреве совокупности цилин-



Р и с. 27. Нагрев совокупности цилиндров (а) и зависимость мощности выделяющейся в совокупности цилиндров, от числа цилиндров (б)

Здесь $\Psi_{a,ц}$ — вспомогательная функция Ψ_a для единичного цилиндра, определяемая по рис. 23 для $\bar{R}_{2ц} = d_{ц}/\Delta \sqrt{2}$.

Суммарная мощность, выделяемая в совокупности цилиндров на единицу длины:

$$P_{ц\Sigma} = P_{ц,0} N_{ц}.$$

Число цилиндров $N_{ц}$ диаметром $d_{ц}$, которое можно вписать в окружность диаметром D_2 при условии их плотной упаковки¹, найдем, приняв, что отношение диаметров D_2 к $d_{ц}$ есть некоторое целое число $k_{ц}$ ($k_{ц} = D_2/d_{ц}$):

$$N_{ц} = \pi k_{ц}^2 / 4. \quad (4-33)$$

Выразим $k_{ц}$ через относительный радиус $\bar{R}_{2ц}$

$$k_{ц} = \frac{D_2}{d_{ц}} = \frac{D_2 / \sqrt{2} \Delta}{d_{ц} / \sqrt{2} \Delta} = \frac{\bar{R}_2}{\bar{R}_{2ц}},$$

$$\text{тогда } N_{ц} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{R}_2}{\bar{R}_{2ц}} \right)^2. \quad (4-34)$$

Суммарная мощность, выделяющаяся в совокупности цилиндров $N_{ц}$ с учетом уравнений (4-32) и (4-34):

$$P_{ц\Sigma} = \frac{\pi^2 d_{ц}}{4 \Delta} H_0^2 \frac{\bar{R}_2^2}{\bar{R}_{2ц}} \Psi_{a,ц}. \quad (4-35)$$

¹ Предлагаем ученикам самим вывести формулу (4-33) для $N_{ц}$.

Разделив выражение (4-35) на аналогичное выражение для одиночного цилиндра и сделав простейшие преобразования, получим отношение мощности $P_{ц\Sigma}$ к мощности, выделяющейся при нагреве одного цилиндра диаметром D_2 :

$$\frac{P_{ц\Sigma}}{P} = \frac{\sqrt{\pi} \bar{R}_{2ц} \Psi_{a,ц}}{2 \bar{R}_2 \Psi_a} \sqrt{N_{ц}}. \quad (4-36)$$

Из полученного выражения следует, что вначале при увеличении числа цилиндров $N_{ц}$ (при относительно небольшом $N_{ц}$), пока в цилиндрах достаточно ярко выражен поверхностный эффект (в этом случае $\bar{R}_{2ц} \Psi_{a,ц} / \bar{R}_2 \Psi_a \rightarrow 1,0$), мощность в пучке цилиндров возрастает пропорционально $\sqrt{N_{ц}}$. Затем рост мощности замедляется, и при $\bar{R}_{2ц} = 2,5$ (см. § 3) имеет место максимальное значение $P_{ц\Sigma}$, которое может заметно превышать значение P . При дальнейшем увеличении числа цилиндров мощность $P_{ц\Sigma}$ начнет быстро падать в соответствии с характером изменения функции $\Psi_{a,ц}$ влево от максимума (см. рис. 23).

На рис. 27, б показан характер изменения мощности в пучке цилиндров при увеличении $N_{ц}$.

Найдем, при каких значениях $N_{ц}$ достигается максимум $P_{ц\Sigma}$, т. е. определим оптимальное значение $N_{опт}$, соответствующее максимальному значению электрического к. п. д. системы индуктор—загрузка. Условие достижения максимума η : $\bar{R}_{2ц} = 2,5$ или

$$\bar{R}_{2ц}^2 = (\pi/4) N_{ц} \bar{R}_2^2 = 6,25,$$

откуда находим

$$N_{опт} = \frac{\bar{R}_2^2}{8} = \left(\frac{D_2}{4 \Delta} \right)^2 = \frac{D_2^2 \mu' f}{4 \rho} 10^{-6}. \quad (4-37)$$

Таким образом, выражение (4-37) позволяет, если известны геометрия индуктора (или диаметр тигля плавильной печи D_2) и свойства нагреваемого материала ρ и μ' , определить оптимальное число нагреваемых цилиндров $N_{опт}$, которые могут быть реально вписаны в диаметр D_2 . При этом оптимальное значение диаметра единичного цилиндра: $d_{ц,опт} = 3,5 \Delta$.

ТАБЛИЦА 2

ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ И ОПТИМАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО КУСКОВ ДИСКРЕТНОЙ ШИХТЫ (ЗАГРУЗКИ)

Нагреваемая загрузка	Оптимальный размер	Оптимальное количество
Совокупность цилиндров ($\mu' = 1,0$)	$d_{ц,опт} = 3,5 \Delta$	$N_{ц,опт} = \bar{R}_2^2 / 8 = \frac{D_2^2 \mu' f}{4 \rho} 10^{-6}$
Совокупность немагнитных шаров ($\mu' = 1,0$)	$d_{ц,опт} = 4,8 \Delta$	$N_{ш,опт} = 0,068 \bar{R}_2^2 = \frac{D_2^2 \mu' f}{7,36 \rho} 10^{-6}$
Совокупность магнитных шаров ($\mu' > 1,0$)	$d_{ц,опт} = \mu' \Delta$	$N_{ш,опт} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\bar{R}_2}{\mu'} \right)^2 = \frac{\pi D_2^2 f}{\mu' \rho} 10^{-6}$
Совокупность пластин	$b_{опт} = 2,5 \Delta$	$N_{опт} = b_2 l_{опт}$

Мы подробно рассмотрели нагрев совокупности цилиндров в поле цилиндрического индуктора. Аналогичные оптимальные соотношения могут быть получены и в других случаях нагрева дискретной загрузки: при нагреве пакета пластин и совокупности немагнитных и магнитных шаров (табл. 2).

Указанными оптимальными соотношениями следует руководствоваться при выборе рациональных поперечных размеров шихты для конкретных типоразмеров печей с заданной геометрией (диаметром тигля D_2 и заданной частотой f), а также при необходимости индукционного нагрева совокупности цилиндров, шаров или пластин в одном индукторе.

В этой главе мы рассмотрели лишь один частный случай — индукционный нагрев сплошного металлического цилиндра в цилиндрическом индукторе. Поскольку в практике индукционного нагрева приходится иметь дело и с другими объектами, заметно отличающимися от рассмотренного здесь случая, в Приложении I (табл. П-1) приведены выражения для активных и реактивных мощностей в нагреваемом металле, полученные для случая нагрева полого цилиндрического и прямоугольного тела.

Контрольные вопросы

1. Поясните физический смысл основных уравнений электромагнитного поля.
2. От чего зависит мощность, выделяемая в нагрузке, и мощность электрических потерь в индукторе?
3. Какова предельная величина электрического к. п. д. индукционного нагревателя при нагреве медной загрузки, если индуктор также выполнен из меди?
4. Выведите самостоятельно формулу (4-34).

ГЛАВА 5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ И МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

§ 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТОКОНЕСУЩИЕ ПРОВОДНИКИ

Механическое взаимодействие магнитного поля с проводниками, несущими электрический ток, является одним из важнейших свойств электромагнитного поля. Оно было обнаружено впервые еще в 20-х годах прошлого столетия в опытах Эрстеда и Ампера. Экспериментально было найдено выражение для электромагнитной силы, с которой магнитное поле с индукцией B воздействует на элементарный проводник dl с током I

$$\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}]. \quad (5-1)$$

Сила \vec{F} максимальна, если $d\vec{l}$ и \vec{B} взаимно перпендикулярны.

Эта сила перпендикулярна $d\vec{l}$ и \vec{B} , она измеряется в ньютонах [Н]. Если угол α между направлением тока и направлением вектора магнитной индукции не равен 90° , то сила будет пропорциональна $\sin \alpha$, т. е.

$$F = IB dl \sin \alpha. \quad (5-2)$$

Если угол между $d\vec{l}$ и \vec{B} равен нулю, то векторное произведение (5-1) равно нулю и \vec{F} также равна нулю, т. е. магнитное поле не

оказывает механического воздействия на проводник с током, направленным вдоль силовой линии поля.

При взаимно перпендикулярном расположении провода и индукции магнитного поля направление действия силы определяют по правилу левой руки: если расположить левую руку так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а четыре пальца вытянуть в направлении тока, то отогнутый большой палец покажет направление действующей силы.

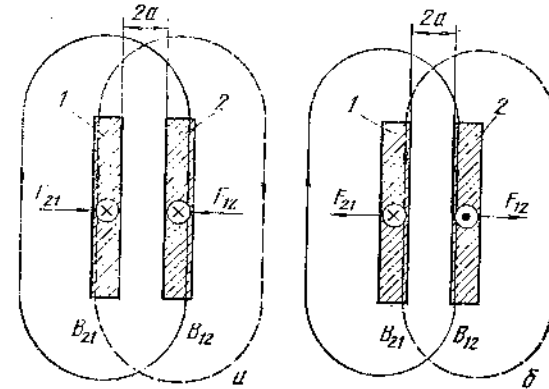


Рис. 28. Воздействие электромагнитной силы F на проводники с током

Взаимодействие магнитного поля с токонесущим проводником имеет место вне зависимости от того, подведен ток к проводнику кондуктивно (от внешнего источника) или ток индуцируется в проводнике этим же полем.

Механические силы, возникающие в магнитном поле, часто называют электродинамическими силами, подчеркивая этим названием то обстоятельство, что под их действием в индукционной установке может возникнуть перемещение тел. Наличие значительных электродинамических усилий в элементах индукционных установок следует учитывать при их проектировании и эксплуатации.

Рассмотрим некоторые характерные для индукционного нагрева случаи силового взаимодействия.

Две параллельные шины

Пусть по двум прямым шинам, удаленным друг от друга на расстояние $2a$, проходят токи I_1 и I_2 одного направления (рис. 28, а) или противоположных направлений (рис. 28, б). Правая шина 2 с током I_2 находится в магнитном поле левой шины с индукцией B_{12} . Следовательно, на элемент $d\vec{l}$ шины 2 действует электромагнитная сила F_{12} , равная

$$\vec{F}_{12} = I_2[d\vec{l} \times \vec{B}_{12}]. \quad (5-3)$$

Направление вектора индукции \vec{B}_{12} определяем по правилу буравчика — в данном случае \vec{B}_{12} в зоне расположения шины 2 направлен сверху вниз. Направление действия силы \vec{F}_{12} находим по правилу левой руки, расположив ладонь левой руки, как описано выше, в зоне протекания тока I_2 . В данном случае сила \vec{F}_{21} направлена влево.

Рассуждая аналогично, найдем, что сила \vec{F}_{21} , действующая на шину 1 со стороны магнитного поля, создаваемого шиной 2 в зоне расположения шины 1, направлена навстречу силе \vec{F}_{12} .

$$\vec{F}_{21} = I_1 |d\vec{l} \times \vec{B}_{21}|. \quad (5-4)$$

Легко заметить, что во всех случаях (в том числе и при $I_1 \neq I_2$) силы, действующие на обе шины, равны между собой, т. е.

$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_{21}.$$

Если токи в шинах имеют разные направления (см. рис. 28, б), то нетрудно убедиться, что в этом случае электромагнитные силы F_{12} и F_{21} , действующие на шины, тоже имеют противоположные направления.

Таким образом, шины с токами одного направления притягиваются друг к другу, а шины с токами противоположных направлений отталкиваются друг от друга (не путать с эффектом близости, рис. 15).

Усилия, возникающие в реальных установках, могут достигать значительных величин, могущих привести, например, к деформации шин. Поэтому шины должны быть достаточно жесткими, а крепящие их элементы должны располагаться достаточно часто по длине шинпровода, чтобы исключить замыкание шин между собой (см. рис. 28, а) или замыкание крайних шин на окружающие шины конструктивные элементы (см. рис. 28, б).

Силовое взаимодействие между витками индуктора и нагрузкой

Вырежем элемент индукционного нагревателя, состоящий из нескольких витков индуктора (на рис. 29, а показано три витка) и нагрузки. Индуцирующие витки несут токи одного направления (на рис. 29, а показаны крестиками). Пунктирными линиями показаны силовые линии поля, создаваемые i -тым витком в зоне расположения соседних ($i+1$ и $i-1$) витков. Так же, как и в предыдущем случае при одинаковом направлении токов, получим, что соседние витки индуктора притягиваются друг к другу с силами, лежащими в вертикальной плоскости, и соответственно равными: $\vec{F}_{21} = \vec{F}_{12}$, $\vec{F}_{32} = \vec{F}_{23}$ и т. д. Это означает, что в средних витках индуктора возникают растягивающие напряжения (поскольку силы рассредоточены по высоте сечения индуцирующего провода), и если виток достаточно жесткий, то

деформация витка отсутствует (за исключением крайнего витка, на который действует сила нескомпенсированная \vec{F}_{21}).

Однако эта картина будет неполной, если не учесть также взаимодействие индуцирующего провода с токами, индуцируемыми в нагрузке I . Поскольку эти токи имеют противоположное направление (показаны на рис. 29, а точками), силы взаимодействия между индуктором и нагрузкой (аналогично случаю, показанному на рис. 28, б) являются отталкивающими. При симметричном расположении твердой нагрузки в индукторе силы \vec{F}_{12} , действующие по ее периметру, взаимно компенсируются и не оказывают на нагрузку «смещающего» действия.

Что же касается индуктора, выполняемого обычно из меди, то здесь растягивающие усилия \vec{F}_{21} могут достигать значительных величин, достаточных для деформации его витков, особенно в индукторах в виде соленоида прямоугольного сечения. Поэтому при конструировании индукторов принимают меры для обеспечения дополнительной жесткости конструкции в радиальном направлении (например, «подпирают» их пакетами магнитопровода и т. п.).

Мгновенное значение электромагнитной силы F , являющейся произведением двух синусоидальных величин (5-1), изменяющихся во времени с частотой ω , пульсирует с двойной частотой 2ω (подробнее об этом см. ниже). При этом, хотя в каждый момент времени направления действия сил, рассмотренных выше, не меняются, их мгновенные значения изменяются дважды за период изменения силы тока от максимального (амплитудного) значения до нуля. Это приводит к возникновению в системе механических колебаний с частотой 2ω . В тех случаях, когда собственная частота колебаний нагрузки или элементов металлоконструкций близка к частоте 2ω , амплитуда колебаний (вибрации) в системе может достигнуть недопустимо больших значений. На практике вибрация достигает значительных величин в установках промышленной частоты при больших удельных мощностях. При их конструировании это обстоятельство должно приниматься во внимание.

Силовое взаимодействие кусковой шихты с полем рассеяния индуктора

На рис. 29, б показана верхняя часть тигля индукционной тигельной печи, в которую загружена кусковая шихта. Рассмотрим два простейших случая: в верхней части (например, на уровне верхнего торца индуктора) имеется: А) тонкий диск с диаметром d , расположенный симметрично относительно оси индуктора (показан пунктиром) и Б) диск того же диаметра, расположенный асимметрично (например, целиком в правой части тигля).

А. Диск расположен симметрично относительно оси. Плотность токов, индуцируемых на боковой поверхности диска, одинакова на обеих его сторонах, и электромагнитные силы, действующие на диск слева и справа, одинаковы. Примерный ход силовых линий в верхней части определяем с использованием правила

буравчика, а направление сил — по правилу левой руки. Результирующая сила, действующая на диск со стороны магнитного поля индуктора, направлена вверх и стремится выбросить диск из индуктора.

Б. Диск расположен асимметрично в поле индуктора. В этом случае плотность индуцированных токов в правой части диска выше, чем в его левой части (в силу неоднородности поля). Результирующая сила F_3 , действующая на диск, направлена вверх и влево, она стремится переместить диск к оси индуктора. Возникает крутящий момент, стремящийся, кроме того, повернуть диск

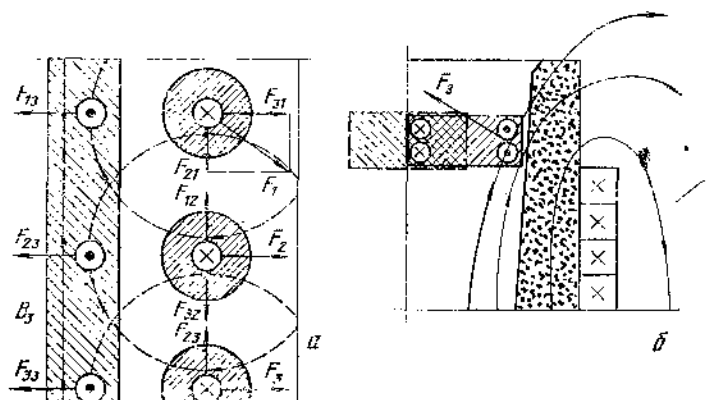


Рис. 29. Силовые взаимодействия в системе индуктор — загрузка

против часовой стрелки, расположить его вдоль силовых линий, т. е. привести его в такое положение, когда выделяемая в диске мощность уменьшается. Аналогично электродинамическое воздействие поля индуктора на нагреваемые заготовки в установках для сквозного нагрева.

Рассмотренные выше частные случаи являются свидетельством общего закона: электромагнитные силы при индукционном нагреве действуют таким образом, что металл перемещается в зону с минимальной напряженностью магнитного поля, и стремится занять такое положение по отношению к силовым линиям, при котором он потребляет от поля минимальную энергию. Сказанное относится к парамагнитным и диамагнитным материалам. Этот эффект используется, например, для удержания жидкого металла в электромагнитном поле при взвешенной плавке (см. гл. 14).

§ 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ

В индукционных тигельных и канальных печах, в установках для бестигельной зонной плавки и других индукционных плавильных агрегатах имеет место силовое взаимодействие расплавленного металла, по которому протекает индуцированный ток, с магнит-

ным полем индуктора. Среднее за период значение силы, действующей на элементарный объем жидкого металла dV , может быть определено по аналогии с уравнением (5-1) из выражения:

$$\vec{dF} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ dI [\vec{dI} \vec{B}] \}, \quad (5-5)$$

где символ Re указывает, что для определения величины силы необходимо взять действительную составляющую комплексного выражения, стоящего в фигурных скобках.

Можно показать, что в общем случае справедливо выражение

$$dF = \mu \gamma P_{\text{пов}} dV. \quad (5-6)$$

Таким образом, удельная электродинамическая сила, приложенная к единице объема жидкого металла, равна, Н/м^3

$$F_{\text{уд}} = dF/dV = \mu \gamma P_{\text{пов}}. \quad (5-7)$$

Величина электродинамической силы пропорциональна подводимой к металлу мощности, а ее направление совпадает с направлением потока энергии (вектора Умова — Пойнтинга).

Выражение (5-7) является общим, не зависящим от геометрии системы, и даст значение объемной электромагнитной силы. Поверхностная сила $dp_{\text{эм}}$, действующая на элементарную площадку dq (иначе говоря электромагнитное давление), Н/м^2 :

$$dp_{\text{эм}} = \frac{dF}{dq} = \frac{F_{\text{уд}} dV}{dq} = F_{\text{уд}} dx. \quad (5-8)$$

Электромагнитное давление в точке, отстоящей от «активной» поверхности расплава на расстоянии x , равно

$$p_{\text{эм}} = \int_0^x F_{\text{уд}} dx = \mu \gamma \int_0^x P_{\text{пов}} dx. \quad (5-9)$$

Таким образом, и электромагнитная сила, и давление, создаваемое в расплаве этой силой, могут быть определены при любой конфигурации системы индуктор — расплав, если известно соответствующее выражение для удельной поверхностной активной мощности $P_{\text{пов}}$.

Так, в индукционной тигельной печи удельная электромагнитная сила, действующая на расплав в точке с радиусом r , в соответствии с уравнением (5-7) и с учетом выражения (4-10) равна:

$$F_{\text{уд}} = \mu \gamma \frac{H_0^2}{\gamma \Delta} \bar{R}_2 \Psi_n. \quad (5-10)$$

Обозначив $\bar{R}_2 \Psi_n = F_{\text{вн}}$, получим

$$F_{\text{уд}} = \mu \frac{H_0^2}{\Delta} F_{\text{вн}}. \quad (5-11)$$

График изменения вспомогательной функции $F_{\text{вн}} = f(\bar{R}_2)$ приведен на рис. 30.

На рис. 31 показана зависимость удельных сил $F_{уд}$ (а) и электромагнитных давлений $p_{эм}$ (б), отнесенных к их максимальным значениям в металлическом цилиндре от величины r/R_2 .

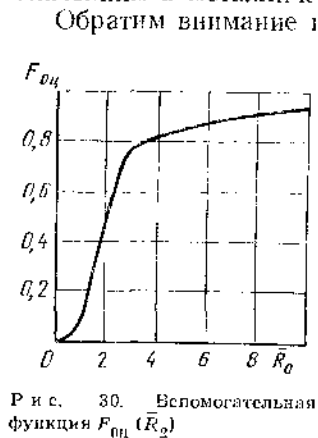


Рис. 30. Вспомогательная функция $F_{0ц}(R_2)$

Обратим внимание на тот факт, что на «активной» поверхности цилиндра сила $F_{уд}$ имеет максимальное значение, а электромагнитное давление $p_{эм} = 0$; и, наоборот, на оси максимально $r_{эм}$, в то время как силы $F_{уд} = 0$.

Электромагнитные силы, возникающие в жидком металле при взаимодействии индуцированных в нем токов с магнитным полем индуктора, оказывают двойное воздействие на расплав: статическое силовое воздействие, приводящее к электромагнитному обжатию всего расплава или его части; динамическое воздействие, приводящее к циркуляции (перемешиванию) расплава в тигле или в канале печи.

Металл, помещенный в сильное магнитное поле, стремится покинуть его или занять место, где напряженность поля имеет минимально возможное значение. Стремление жидкого металла

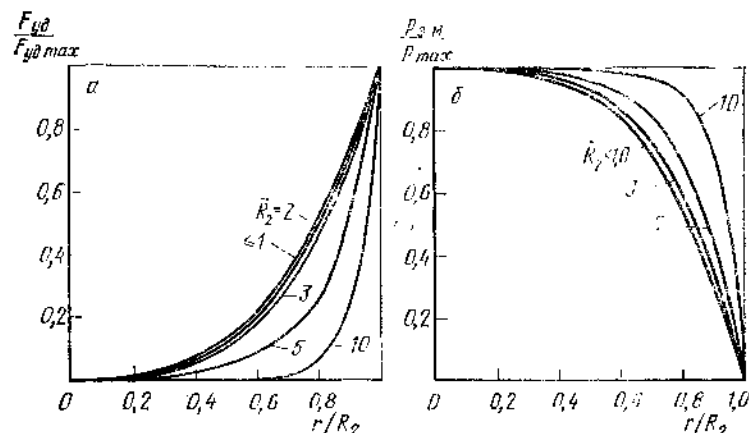


Рис. 31. Характер изменения электродинамических удельных сил $F_{уд}$ (а) и давлений $p_{эм}$ (б) в загрузке

выйти из-под влияния поля проявляется не только в изменении его положения (как у твердого тела, см. § 1), но также и в изменении формы, в деформации его поверхности. При сильном обжатии расплав стремится принять форму магнитных силовых линий.

В индукционных тигельных печах верхняя часть расплава отжимается от стенок тигля и приобретает форму выпуклого

мениска, конфигурация которого не является стабильной и зависит от величины H и взаимного расположения металла и верхнего торца индуктора. Примерная конфигурация мениска при частичном отжатии расплава от стенок тигля в ИТП показана на рис. 32.

Наличие большого мениска в промышленной печи является, как правило, нежелательным, особенно на последней стадии плавки, когда проводится технологическая обработка металла шлаками. При этом шлак, покрывающий зеркало, стекает к стенкам тигля и, для того, чтобы все зеркало было покрыто шлаком, приходится увеличивать его количество. Кроме того, стекающий к стенкам шлак химически взаимодействует с футеровкой на большей высоте, чем при отсутствии мениска.

В тигельных печах промышленной частоты, в которых мениск имеет наибольшую высоту, для ее снижения широко используется отрицательный свес индуктора, т. е. расположение верхнего торца его ниже уровня расплава (при номинальном заполнении тигля). В этом случае за счет большего рассеяния магнитного поля в верхней части ослабляется силовое воздействие на расплав в этой зоне и высота мениска уменьшается.

Наука, изучающая поведение электропроводных жидкостей в электромагнитном поле, называется магнитной гидродинамикой, а явления, происходящие в жидких металлах под воздействием магнитного поля, называют магнитогидродинамическими явлениями (или МГД-явлениями).

Ниже рассматривается взаимодействие расплава с полем индуктора в индукционной тигельной и канальной печах.

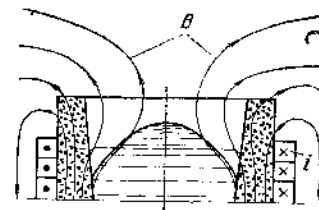


Рис. 32. Примерная конфигурация мениска в ИТП

§ 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Естественная циркуляция металла в тигле ИТП

Как указывалось выше, электромагнитные сжимающие силы, действующие по периметру твердой загрузки, взаимно компенсируются. В жидком металле силовое взаимодействие индуцируемых токов и магнитного поля приводит к взаимному отталкиванию индуктора и отдельных частиц (элементарных объемов) расплава, которое неизбежно приводит к возникновению взаимного перемещения объемов расплава внутри тигля, т. е. к циркуляции расплава в тигле, которую также называют электромагнитным перемешиванием металла.

В тигельных печах обычно используются относительно «короткие» индукторы (с отношением высоты к диаметру порядка единицы). В таких индукторах имеет место так называемый продольный краевой эффект, который проявляется в уменьшении значения напряженности (и индукции) магнитного поля у поверхности расплава в зоне верхнего и нижнего торцов индуктора. Следствием проявления краевого эффекта является неравномерное по высоте распределение электромагнитных сил F : в средней части индуктора они максимальны, по краям индуктирующей системы их значения уменьшаются (на рис. 33 силы условно показаны стрелками, направленными к оси тигля). Это, в свою очередь, приводит к возникновению в расплаве так называемой двухконтурной циркуляции, когда расплав как бы «выдавливается» вдоль оси тигля вверх (в верхнем контуре) и вниз (в нижнем контуре) по отношению к средней плоскости индуктора (рис. 33, слева), и возвращается в обратном направлении вдоль стенок плавильного тигля. Такую циркуляцию расплава, наблюдаемую в обычных тигельных печах, принято называть естественной, в отличие от «искусственной», достигаемой специальными средствами.

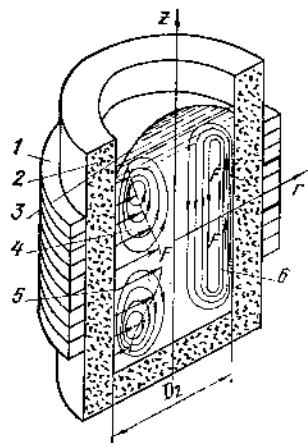


Рис. 33. Схема силовых воздействий на жидкий металл и характер распределения v_m в ИТП: 1 — индуктор; 2 — тигель; 3 — мениск; 4 и 5 — верхний и нижний циркуляционные контуры; 6 — одноконтурная циркуляция металла в трехфазном индукторе

Интенсивность циркуляции характеризуется скоростью движения металла v в той или иной зоне тигля, которая является результатом воздействия на расплав электромагнитных сил и сил вязкого и турбулентного трения. Обычно в качестве характерного значения скорости принимают ее максимальное значение на оси тигля в верхнем контуре. Значения v в промышленных печах разного назначения и конструктивного исполнения могут отличаться в десятки раз, и являются одним из факторов, определяющих пригодность печи для того или иного технологического процесса. Так, они могут составлять как несколько сантиметров в секунду (при выдержке расплава на пониженной мощности, а также при плавке в печах средней частоты), так и несколько метров в секунду (в печах промышленной частоты с относительно высокой удельной мощностью). При этом электродинамические явления могут сопровождаться мощными пульсациями, деформацией поверхности, выбросами частичек расплава из тигля, а также звуковыми эффектами.

Скорость движения металла в осевой зоне тигля определяет ход массообменных процессов с вводимыми в расплав компонен-

тами при легировании, рафинировании и модифицировании; скорость в пристеночном слое оказывает влияние на взаимодействие металла с футеровкой тигля; скорость на зеркале расплава определяет темп плавления шихты (особенно легкой) и интенсивность взаимодействия металла с газовой фазой и шлаками, и, наконец, скорость движения у дна тигля оказывает существенное влияние на плавление тяжелой кусковой шихты и тяжелых добавок.

Наглядное представление о поле скоростей внутри расплава можно получить, если рассмотреть распределение одной из компонент скорости.

Наглядное представление о поле скоростей внутри расплава можно получить, если рассмотреть распределение одной из компонент скорости.

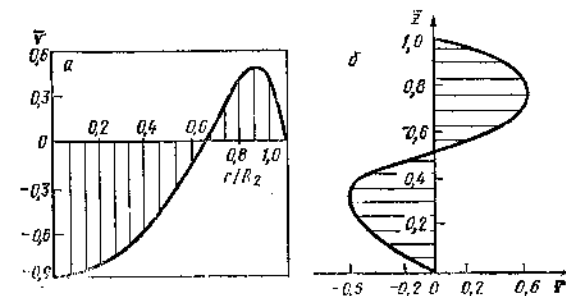


Рис. 34. Распределение скорости движения металла по радиусу тигля при $\bar{R}_2 = 4,2$

нент скорости (например, ее вертикальной составляющей v_z) по двум координатам: по оси z (т. е. по высоте h) и по радиусу тигля r . При этом скорость удобно выразить в безразмерном виде. Обычно под относительной (безразмерной) скоростью понимают величину \bar{v} , равную

$$\bar{v} = v / \sqrt{2\rho V \mu H_n}.$$

На рис. 34, а показан характер распределения вертикальной составляющей скорости по радиусу (профиль скорости) для тигельной печи с симметричным расположением индуктора и расплава. Приведенный на рис. 34, а профиль v_z показывает, что скорость в осевой зоне несколько выше, чем в пристеночном слое. Скорость равна нулю у стенки при $r = R_2$ из-за трения и при $r \approx 0,65R_2$ — в результате того, что в этой зоне встречаются потоки жидкости с противоположными направлениями.

Распределение скорости, измеренное на оси тигля, по высоте расплава, приведено на рис. 34, б (экспериментальные данные получены при $h_1/D_2 = 1,6$; $\bar{R}_2 = 4,5$ и $h_1 = h_2$). Как видно из графика, максимальные значения скорости в верхнем и нижнем контурах примерно равны. В средней плоскости индуктора, в зоне стыка двух циркуляционных контуров, вертикальная составляющая скорости равна нулю. За положительное направление принято направление движения вверх по оси тигля.

Факторы, влияющие на циркуляцию расплава в ИТП

Рассмотрим основные факторы, влияющие на характер и интенсивность движения металла в индукционной тигельной печи.

1. **Напряженность магнитного поля индуктора.** Экспериментальные исследования показали, что в тигельной печи практически всегда движение металла носит турбулентный характер. В этом случае можно считать, что при прочих равных условиях значение скорости v прямо пропорционально напряженности H , т. е. $v \propto H$.

2. **Частота тока f .** На рис. 35 показан характер изменения скорости движения металла в ИТП с изменением частоты. Значение скорости приведено в долях от его максимального значения. Снижение v/v_{\max} с уменьшением f (и соответственно \bar{R}_2) объясняется уменьшением $F_{\text{эм}}$ в соответствии с уравнением (5-10), а снижение скорости при увеличении f (и соответственно \bar{R}_2) — увеличением градиента скоростей и сил трения в пристеночном слое при уменьшении глубины проникновения Δ .

3. **Удельная мощность печи $P_{\text{пов}}$.** Выражение (4-10) для удельной мощности печи можно переписать в виде:

$$P_{\text{пов}} \propto K H^2 \sqrt{f}.$$

Таким образом, если увеличение удельной мощности достигается за счет увеличения H при неизменной частоте f , то скорость движения v увеличится пропорционально корню квадратному из $P_{\text{пов}}$: $v \propto \sqrt{P_{\text{пов}}}$, а если увеличение $P_{\text{пов}}$ достигается за счет увеличения f , то уровень циркуляции снижается в соответствии с рис. 35.

4. **Геометрия расплава.** Отношение h_2/D_2 влияет на величину v : при уменьшении h_2/D_2 скорость v снижается, так как верхний и нижний контуры «мешают» друг другу; при значении $h_2/D_2 > 1$ скорость практически не меняется, так как циркуляционные контуры перестают влиять друг на друга.

5. **Заполнение тигля расплавом.** При уменьшении высоты расплава в тигле интенсивность циркуляции в верхнем контуре падает, и при определенных условиях нижний контур может полностью подавить верхний контур, и характер циркуляции кардинально меняется: из двухконтурной она переходит в одноконтурную (см. рис. 33, справа).

§ 4. МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ

Рассмотрим качественно поведение расплава в канале ИКП для двух геометрических систем: для одинарной (рис. 36) и двояной (рис. 37) индукционных единиц.

Одинарная индукционная единица

Взаимодействие тока в канале с электромагнитным полем проанализируем на трех участках канала K (рис. 36, а): I — участок постоянного поперечного сечения S_k , concentричный индуктору I ; II — участок с постоянным сечением, но расположенный не concentрично индуктору; III — участок с непостоянным по длине поперечным сечением и расположенный не concentрично индуктору. Для простоты анализа полагаем, что ток равномерно распределен по сечению канала.

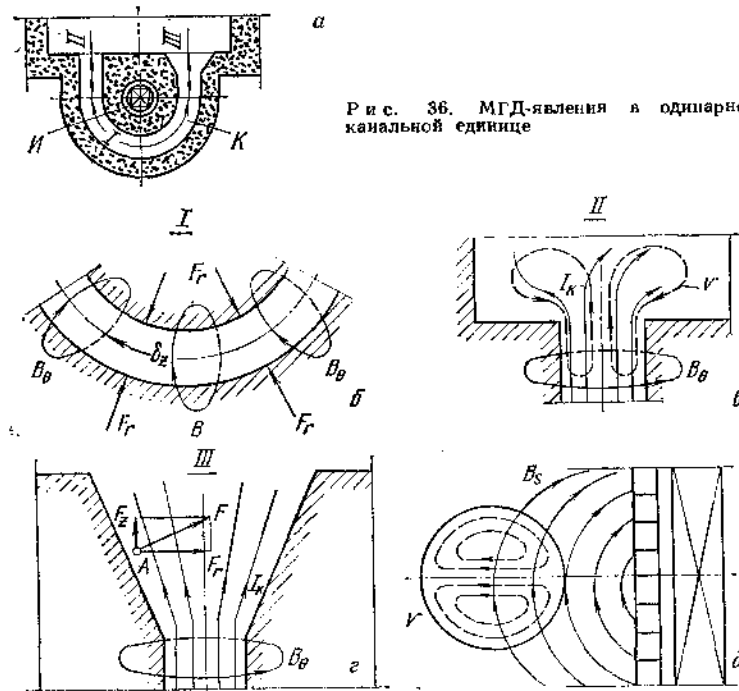


Рис. 36. МГД-явления в одинарной канальной единице

1. **Взаимодействие тока в канале с собственным магнитным полем.** На участке I благодаря круговой симметрии системы вектор плотности тока имеет только одну аксиальную компоненту δ_z (ось z расположим вдоль оси канала на всем его протяжении), а магнитная индукция — одну тангенциальную компоненту B_θ . В соответствии с материалами, изложенными в § 1, в этом случае электромагнитная сила также имеет лишь одну (радиальную) компоненту F_r , направленную от поверхности к оси канала, и вызывающую явление пинч-эффекта (рис. 36, б). Поскольку значения этих сил на всей длине участка I постоянны, сами по себе они не могут вызвать движения металла в канале, оказывая лишь статическое воздействие на расплав, стараясь «перезаждать» его.

Чтобы исключить проявление линч-эффекта (эффекта пережата расплава), необходимо, чтобы противодействующие силы, создаваемые гидростатическим давлением металла в соответствующей точке канала $p_{г.с.}$ и атмосферным давлением на зеркале металла в ванне $p_{ат.}$ удовлетворяли условию:

$$p_{эм} < p_{г.с.} + p_{ат.} \quad (5-12)$$

Принимая во внимание выражение (5-12), а также полагая, что максимальное значение $p_{эм}$ равно

$$p_{эм} = 2\pi 10^{-7} \mu' I_k^2 / h_k^2, \quad (5-13)$$

получим значение минимальной высоты столба расплава $h_{мин.}$, обеспечивающее отсутствие пережата расплава в канале из-за линч-эффекта:

$$2\pi 10^{-7} \mu' (I_k / h_k)^2 < \rho g h_2 + 10^5 \quad (5-14)$$

$$\text{и } h_{мин} > \frac{1}{\rho g} \left(2\pi 10^{-7} \mu' \frac{I_k^2}{h_k^2} - 10^5 \right). \quad (5-15)$$

На практике электромагнитные силы в несколько раз меньше противодействующих сил, поэтому эффекта пережата металла в каналах промышленных печей, как правило, не наблюдается.

На участке *II* наблюдается картина взаимодействия расплава с собственным полем, полностью аналогичная рассмотренной выше.

Однако, если в предыдущем случае электромагнитные силы лишь создают статическое давление, не вызывая движения расплава, то на участке *II* у верхнего его конца (устья) возникает неоднородность в распределении F , в результате чего расплавленный металл движется от стенок канала к его оси, затем вдоль оси из устья канала в ванну, и возвращается вдоль стенок обратно из ванны в канал (рис. 36, в). Движение несимметрично относительно оси канала, так как, кроме собственного поля, на металл воздействует поле рассеяния индуктора, которое смещает течение металла из канала в ванну в сторону, противоположную индуктору.

На участке *III* индукция также имеет лишь одну компоненту B_θ , однако вектор плотности тока имеет две компоненты: осевую δ_z и радиальную δ_r . Взаимодействие B_θ и δ_z аналогично описанному выше (линч-эффект), а взаимодействие B_θ и δ_r создает аксиальную компоненту электромагнитной силы F_z , действующей на расплав вдоль оси, и заставляющей его перемещаться вдоль канала (в направлении силы F_z , см. рис. 36, г).

Как видим, меняя форму или размеры сечения канала вдоль его оси, можно получить аксиальную составляющую электромагнитной силы, способную в принципе обеспечить сквозное течение металла в канале, которое позволяет исключить перегрев металла и повысить мощность индукционной единицы.

2. *Взаимодействие тока в канале с полем рассеяния индуктора.* Схематически взаимодействие магнитного поля рассеяния с током в канале показано на рис. 36, д.

На участке *I* канала плотность тока имеет одну компоненту δ_z , а индукция — две компоненты: B_{sr} и $B_{s\theta}$. Их взаимодействие с током создает две компоненты электромагнитной силы: $F_{s\theta}$ и F_{sr} , приводящие к образованию вихревого движения в плоскости сечения канала.

На участке *II* так же, как и на участке *I*, имеются две компоненты F : $F_{s\theta}$ и F_{sr} , однако ввиду рассеяния магнитного потока

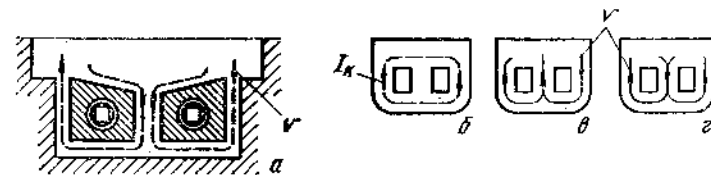


Рис. 37. Циркуляция металла в двоянной индукционной единице

при увеличении расстояния от индуктора до рассматриваемого сечения, значения сил при перемещении вдоль оси канала кверху падают, что вызывает циркуляцию расплава как в плоскости, нормальной к оси канала (см. рис. 36, г), так и в плоскости $r - z$, т. е. движение приобретает трехмерный характер. Циркуляционные контуры, образующиеся в вертикальной плоскости, накладываются на контуры (см. рис. 36, в), возникающие под действием собственного магнитного поля и существенно усложняют картину циркуляции в устье.

На участке *III* канала благодаря существованию радиальной компоненты тока δ_r имеют место все три компоненты электромагнитной силы: F_{sr} , $F_{s\theta}$ и F_{sz} , вызывающие циркуляцию расплава в трех плоскостях. Следовательно, на этом участке поле скоростей также трехмерно.

Двоянная индукционная единица

Направленное движение металла в канале двоянной индукционной единицы также может быть достигнуто благодаря соответствующей форме устья одного из каналов, например среднего (рис. 37, а). В этом случае в устье среднего участка возникает аксиальная составляющая электромагнитной силы, вызывающая направленное движение: вниз по среднему каналу и затем — вверх по двум крайним каналам (рис. 37, а). Средний канал выполняется соответственно большего сечения, чем крайние. Разумеется, и в двоянной единице наблюдаются рассмотренные выше явления, приводящие к возникновению неупорядоченного, вихревого движения расплава и накладываются на основной поток.

Двоянные индукционные единицы обладают большими возможностями для организации сквозного течения расплава через

канал. Эти возможности могут быть реализованы при различном включении индукторов, а также благодаря наложению на отдельные участки канала внешнего магнитного поля. Последняя схема использована в конструкции так называемых магнитодинамических насосов (МДН-насосов), разработанных в ИПЛ АН УССР, и применяется в канальных раздаточных печах (например, в печах для алюминия серии ИАКР). На рис. 37, б схематически показано, как создается направленное движение в подобной печи. При согласном включении индукторов цепь тока замыкается так, как показано на рис. 37, б (ток в среднем канале отсутствует). Для управления движением в нижней части единицы на пересечении среднего и двух крайних каналов устанавливается С-образный электромагнит, создающий синфазное с током магнитное поле B_n , направленное перпендикулярно к току (нормально плоскости чертежа).

В зависимости от направления внешнего поля в этой зоне создается электромагнитная сила F_n , направленная вверх или вниз по оси среднего канала. В соответствии с этим возникает направленное движение расплава в каналах: вверх по среднему и вниз по крайним (рис. 37, в, слева), либо вниз по среднему и вверх по крайним каналам (рис. 37, в, справа).

Интенсивность (скорость) движения регулируется либо изменением силы тока I_k , либо изменением B_n . В последнем случае регулирование скорости циркуляции может осуществляться независимо от регулирования мощности печи, что является несомненным достоинством рассмотренной схемы.

Контрольные вопросы

1. Какое положение стремится занять нагреваемый металл в индукторе под действием электромагнитных сил (сформулируйте общее правило)?
2. Чем можно объяснить образование выпуклого мениска в тигельной печи?
3. От каких факторов зависит скорость движения металла в ИТП?
4. При соблюдении какого условия исключается пинч-эффект в канале ИКП?

ГЛАВА 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ИНДУКТОР — ЗАГРУЗКА

Выше мы рассмотрели основные физические явления и электромагнитные процессы, происходящие в элементах индукционных установок, предназначенных для нагрева и плавки металлов. Теперь перейдем к изложению методов расчета параметров реальных систем индуктор — загрузка индукционных установок.

При рассмотрении индукционной установки как нагрузки для источника питания система индуктор — загрузка может быть

представлена в виде эквивалентной схемы замещения, характеризующей эквивалентным активным и реактивным сопротивлениями контура.

Под эквивалентным активным сопротивлением будем понимать отношение активной мощности на зажимах индуктора к квадрату действующего значения силы тока индуктора:

$$r_s = P/I^2. \quad (6-1)$$

Эквивалентным полным сопротивлением принято называть отношение действующих значений напряжения и силы тока:

$$z_s = U/I. \quad (6-2)$$

Эквивалентное реактивное сопротивление может быть определено следующим образом:

$$x_s = \pm \sqrt{z_s^2 - r_s^2}, \quad (6-3)$$

где знак «плюс» ставится, если $\varphi > 0$, и знак «минус» — если $\varphi < 0$ (φ — угол сдвига фаз между напряжением и током).

Естественно, для эквивалентного активного сопротивления сохраняется соотношение

$$r_s = \frac{P}{I^2} = \frac{UI \cos \varphi}{I^2} = z_s \cos \varphi. \quad (6-4)$$

Для определения эквивалентных параметров индуктора с загрузкой применяют метод расчета, базирующийся на схеме замещения по общему магнитному потоку. Этот метод положен в основу проектных расчетов индукционных нагревательных и плавильных установок.

§ 1. МАГНИТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КОРОТКОГО ИНДУКТОРА С ЗАГРУЗКОЙ

Электромагнитные процессы в системе индуктор — загрузка, рассмотренные в гл. 4, действительны для отрезка индуктора бесконечной длины. Такую систему характеризуют следующие признаки:

напряженность магнитного поля H вне (снаружи) индуктора равна нулю (так как у бесконечно длинного индуктора силовые линии замыкаются в бесконечности), т. е. $H_n = 0$;

в зазоре между индуктором и загрузкой магнитное поле равномерно, причем напряженность поля в зазоре равна H_0 на поверхности загрузки, т. е.

$$H = I_n w / h_n \equiv H_0;$$

полный магнитный поток отрезка индуктора определяется только магнитным сопротивлением его внутренней полости:

$$\Phi_0 = I_n w / Z_{m0}. \quad (6-5)$$

Магнитодвижущая сила отрезка длинного индуктора высотой h_n равна

$$I_n w = H_0 h_n. \quad (6-6)$$

Напомним, что магнитное сопротивление участка магнитной цепи длиной l_m с сечением магнитного потока («активным») S_m определяется выражением:

$$Z_m = \frac{l_m}{\mu S_m}. \quad (6-7)$$

$$\text{Тогда } \Phi_n = H_0 \frac{h_n}{Z_{m0}}. \quad (6-8)$$

Полное магнитное сопротивление магнитному потоку, проходящему по нагрузке и по воздушному зазору

$$Z_{m0} = \frac{Z_{m2} Z_{m3}}{Z_{m2} + Z_{m3}}, \quad (6-9)$$

где сопротивление загрузки

$$Z_{m2} = j\omega / z_2; \quad (6-10)$$

сопротивление воздушного зазора

$$Z_{m3} = \frac{j\omega}{z_3} = \frac{j\omega}{j\chi_0} = \frac{\omega}{\chi_0} \quad (6-11)$$

(индекс «0» в обозначениях свидетельствует о том, что соответствующие величины вычисляются для отрезка индуктора бесконечной длины).

Условимся называть длинным индуктором — индуктор с отношением высоты к диаметру $h_n/d_n \gg 2$, а коротким — индуктор с отношением $h_n/d_n < 2$. В практике индукционного нагрева и плавки чаще приходится иметь дело с короткими индукторами. Рассмотрим реальный короткий индуктор и покажем, чем он качественно отличается от равного ему по высоте отрезка бесконечно длинного индуктора. В общем случае, нагрузка может быть короче индуктора (рис. 38, а). Условимся в дальнейшем все, что относится к индуктору (первичной цепи), обозначать индексом «1», а все, что относится к нагрузке (вторичной цепи) — индексом «2», и, наконец, все, что относится к воздушному зазору (внутренней полости индуктора) будем обозначать индексом «3». Индекс «и» оставим для обозначения параметров индуктора с нагрузкой.

В отличие от отрезка длинного индуктора в реальном коротком индукторе:

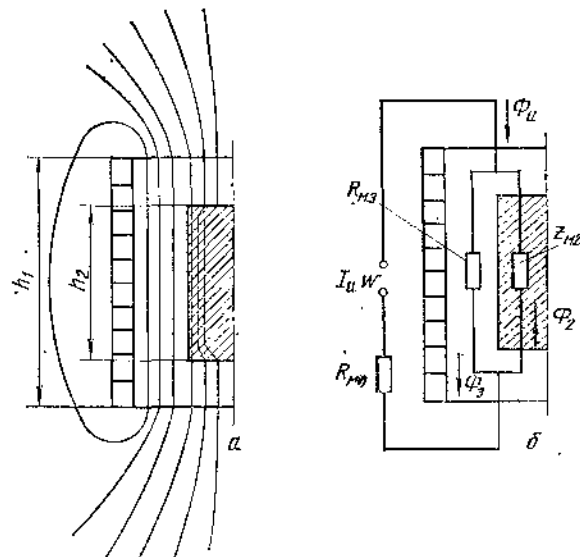
напряженность магнитного поля H_n снаружи индуктора не равна нулю, т. е. $H_n \neq 0$;

напряженность поля внутри индуктора у поверхности загрузки $H_2 < I_1 w / h_1$, так как теперь $\oint H dl \neq H_2 h_1$ и, следовательно, при том же значении силы тока I_1 в индукторе напряженность поля у поверхности загрузки будет меньше, чем в длинном индукторе;

полный магнитный поток короткого индуктора определяется сопротивлением его внутренней полости $Z_{m,и}$ и внешней области R_{m0} , которое преодолевает магнитный поток на пути обратного замыкания вне индуктора:

$$\Phi_n = \frac{I_1 w}{Z_{m,и} + R_{m0}} \approx \frac{I_1 w}{Z_{m0} + R_{m0}}. \quad (6-12)$$

Магнитный поток $\Phi_n < \Phi_0$ при той же силе тока и полезная мощность системы также меньше.



Р и с. 38. Картина поля (а) и магнитная схема замещения (б) короткого индуктора

На рис. 38, б приведена магнитная схема замещения короткого индуктора с нагрузкой, соответствующая идеализированной (рис. 38, а) картине магнитного поля. Делается допущение, что все витки индуктора охватываются одним и тем же магнитным потоком Φ_n , причем внутри индуктора все силовые линии параллельны оси, а внешнее поле нагруженного индуктора не отличается от поля пустого индуктора.

Магнитное сопротивление пути обратного замыкания

$$R_{m0} = j\omega / \chi_0, \quad (6-13)$$

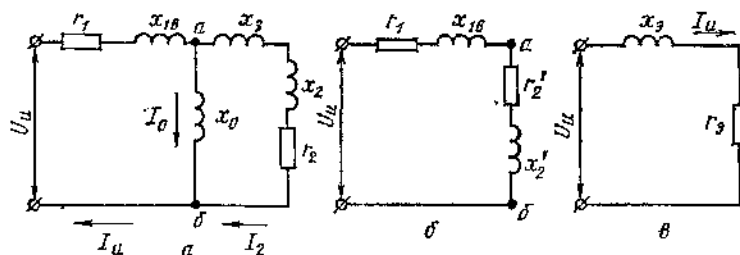
где χ_0 — реактивное сопротивление обратного замыкания, Ом.

§ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ИНДУКТОРА С ЗАГРУЗКОЙ

Магнитную схему замещения (см. рис. 38, б) можно преобразовать в эквивалентную ей электрическую схему, которая показана на рис. 39, а. Здесь учтено также сопротивление, которое

оказывает прохождению магнитного потока тело индуктора, поэтому в схему введены сопротивления r_1 (активное сопротивление индуктирующего провода) и $x_{1в}$ (внутреннее индуктивное сопротивление катушки индуктора).

Таким образом, схема (рис. 39, а) является полной электрической схемой замещения короткого индуктора с нагрузкой. Она получила название схемы замещения по общему потоку. Однако для практических расчетов эту схему следует упростить, заменив ее более простой схемой, приведенной на рис. 39, б. Чтобы эти



Р и с. 39. Полная (а) и упрощенные (б и в) электрические схемы замещения короткого индуктора с нагрузкой

две схемы были эквивалентны, нужно параметры r_2 и $x_{2н}$ привести к первичной цепи. Приведенные параметры загрузки обозначим r'_2 , $x'_{2н}$ и z'_2 . Осуществим это приведение. Для этого запишем выражение для полного сопротивления схемы между узловыми точками а и б:

$$z'_2 = \frac{\dot{U}_{(а-б)}}{I_{1н}} = \frac{jx_0 [j(x_3 + x_{2в}) + r_2]}{r_2 + j(x_3 + x_{2в} + x_0)} \quad (6-14)$$

Опуская выкладки, запишем выражение (6-14) в виде:

$$z'_2 = \frac{r_2}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{2в} + x_3}{x_0}\right)^2} + j \frac{(x_{2в} + x_3) + \frac{r_2^2 + (x_{2в} + x_3)^2}{x_0}}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{2в} + x_3}{x_0}\right)^2} = r'_2 + jx'_2 \quad (6-15)$$

$$\text{Таким образом } r'_2 = C_{пр} r_2 \quad (6-16)$$

$$\text{и } x'_2 = C_{пр} \left[(x_{2н} + x_3) + \frac{r_2^2 + (x_{2в} + x_3)^2}{x_0} \right] \quad (6-17)$$

Коэффициент $C_{пр}$ называют коэффициентом приведения параметров загрузки к току индуктора

$$C_{пр} = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{2н} + x_3}{x_0}\right)^2} \quad (6-18)$$

Схему на рис. 39, б можно еще более упростить, преобразовав ее в схему на рис. 39, в. При этом эквивалентные параметры нагруженного индуктора, на которые нагружен источник питания индукционной установки, определяются из выражения:

$$r_3 = r_1 + r'_2 \quad (6-19)$$

$$\text{и } x_3 = x_{1в} + x'_2 \quad (6-20)$$

Мощность, выделяющаяся в нагрузке, может быть определена по одному из следующих выражений:

$$P_2 = I_2^2 r_2 \quad (6-21)$$

$$\text{или } P_2 = I_n^2 r'_2 \quad (6-22)$$

Поскольку оба выражения должны дать одинаковый результат, получим

$$r'_2/r_2 = C_{пр} = (I_2/I_n)^2 \quad (6-23)$$

Так как $I_n = I_2 + I_0 > I_2$, коэффициент приведения $C_{пр}$ всегда меньше единицы $C_{пр} < 1,0$.

Ток I_0 создает м. д. с. для протекания магнитного потока по пути обратного замыкания.

Таким образом, нам теперь известны все параметры схемы замещения, кроме сопротивления обратного замыкания x_0 .

§ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАТНОГО ЗАМЫКАНИЯ

Рассмотрим магнитное поле нагруженного индуктора (рис. 40, а) и сравним его с полем пустого индуктора (рис. 40, б).

Отметим следующее:

1) магнитное поле снаружи нагруженного индуктора мало отличается от поля пустого индуктора;

2) наибольшее различие в полях пустого и нагруженного индукторов наблюдается у торцов загрузки (особенно при ярко выраженном поверхностном эффекте), где магнитное поле усилено;

3) используя сходство картин магнитного поля нагруженного и пустого индукторов, легко вычислить величину магнитного сопротивления обратного замыкания $R_{м0}$, если иметь аналитические выражения для поля индуктора в любой точке;

4) ошибка, вызванная некоторым усилением поля в торцевой зоне заготовки, и приводящая к некоторому занижению определяемой величины $R_{м0}$, должна быть невелика благодаря малой протяженности этой зоны.

Таким образом, величину $R_{м0}$ можно найти из выражения

$$R_{м0} = R_{мΣ} - R_{м.н.},$$

где $R_{мΣ}$ — полное магнитное сопротивление пустого индуктора на пути а — б — в — г — а (см. рис. 40, б);

$R_{м.в}$ — магнитное сопротивление внутренней полости индуктора на участке $a-b-v$ (рис. 40, б).

Считая индуктор одновитковым ($\omega = 1$), запишем выражение для $R_{м\Sigma}$:

$$R_{м\Sigma} = l_{(a-b-v-r-a)}/\mu S_m = l/\Phi = 1/L_n, \quad (6-24)$$

где L_n — индуктивность индуктора.

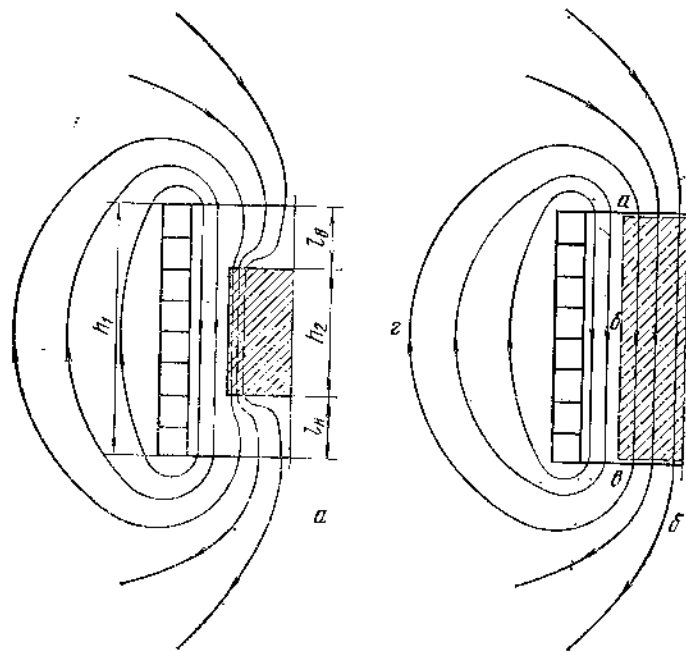


Рис. 40. Магнитное поле загруженного (а) и пустого (б) индукторов

Величину L_n можно выразить через индуктивность отрезка соленоида бесконечной длины L_{10} :

$$L_n = L_{10} k_1, \quad (6-25)$$

где k_1 — поправочный коэффициент, учитывающий конечную высоту реального индуктора (коэффициент Нагаока):

$$k_1 = \frac{2,3}{D_1/h_1 + 2,3} < 1,0; \quad (6-26)$$

$$L_{10} = \mu_0 \frac{S_1}{h_1}. \quad (6-27)$$

Здесь S_1 — площадь поперечного сечения внутренней полости индуктора.

$$\text{Следовательно: } R_{м\Sigma} = 1/k_1 L_{10}. \quad (6-28)$$

Вычислим теперь $R_{м.в}$, полагая, что поле внутри индуктора (на участке $a-b-v$) равномерно, т. е. сопротивление $R_{м.в}$ равно магнитному сопротивлению отрезка h_1 бесконечно длинного индуктора:

$$R_{м.в} = 1/L_{10} \quad (6-29)$$

(для бесконечно длинного соленоида $k_1 = 1,0$).

Таким образом

$$R'_{м0} = \frac{1}{L_{10}} \left(\frac{1}{k_1} - 1 \right) = \frac{1}{L_{10}} \frac{1-k_1}{k_1} \quad (6-30)$$

$$\text{и } x_0 = \frac{\omega}{R_{м0}} = x_{10} \frac{k_1}{1-k_1}. \quad (6-31)$$

Эти формулы справедливы и тогда, когда $h_1 = h_2$. Если $h_2 > h_1$, также можно пользоваться этими выражениями, приняв $h'_2 = h_1$.

На практике часто встречаются случаи, когда $h_2 < h_1$ (см. рис. 40, а), тогда к полученной выше величине $R'_{м0}$ нужно прибавить сопротивления участков l_n и l_v , лежащих внутри индуктора:

$$R_{м0} = R'_{м0} + \Delta R_{м0}. \quad (6-32)$$

Считая поле на участках l_n и l_v равномерным, получим

$$\Delta R_{м0} = 1/\Delta L_{10}; \quad (6-33)$$

$$\Delta L_{10} = \mu_0 \frac{S_1}{h_1 - h_2} = \mu_0 \frac{S_1}{h_1} \frac{h_1}{h_1 - h_2} = L_{10} \frac{h_1}{h_1 - h_2}; \quad (6-34)$$

$$\Delta R_{м0} = \frac{1}{L_{10}} \frac{h_1 - h_2}{h_1}. \quad (6-35)$$

Итак, в общем случае

$$R_{м0} = \frac{1}{L_{10}} \left(\frac{1-k_1}{k_1} + \frac{h_1 - h_2}{h_1} \right) = \frac{1}{L_{10}} \frac{k_1 h_1}{h_1 - k_1 h_2} \quad (6-36)$$

и искомое сопротивление обратного замыкания

$$x_0 = x_{10} \frac{k_1 h_1}{h_1 - k_1 h_2}. \quad (6-37)$$

§ 4. НЕКОТОРЫЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СЛУЧАИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Рассмотренная выше схема замещения индуктора по полному потоку дает возможность охватить практически все возможные частные случаи, в том числе и при предельных значениях влияющих факторов. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Нагрев длинной загрузки в длинном индукторе.* При $h_1 \rightarrow \infty$ и $h_2 \rightarrow \infty$ коэффициент Нагаока стремится к единице: $k_1 \rightarrow 1,0$, и, как следует из выражения (6-37), сопротивление обратного замыкания $x_0 \rightarrow \infty$. Следовательно, в случае (6-18) коэффициент приведения параметров $C_{пр} \rightarrow 1,0$.

2. *Нагрев цилиндра весьма малой высоты.* При $h_1 \rightarrow 0$, в соответствии с уравнением (4-18), сопротивления $r_2 \rightarrow \infty$ и $x_{2в} \rightarrow \infty$. В этом случае

$$r_3 \rightarrow r_1 \text{ и } x_3 \rightarrow x_{1н} + x_0.$$

Поскольку $x_0 \rightarrow x_{10}k_1 = x_1$, эквивалентное сопротивление загруженного индуктора стремится к значению реактивного сопротивления пустого индуктора $x_{п.н}$

$$x_3 \rightarrow x_{10} + x_1 = x_{п.н.}$$

3. *Нагрев цилиндра весьма малого диаметра.* При $D_2 \rightarrow 0$ активное и внутреннее реактивное сопротивление загрузки также стремится к нулю: $r_2 \rightarrow 0$ и $x_{2в} \rightarrow 0$.

Реактивное сопротивление воздушного зазора

$$x_3 \rightarrow x_{10} \frac{h_1}{h_2}.$$

Таким образом $x_2 \rightarrow x_3 h_1 / h_2$.

Эквивалентное реактивное сопротивление индуктора

$$x_3 = \frac{x_{10}^2 \frac{h_1}{h_2} \frac{k_1 h_1}{h_1 - k_1 h_2}}{x_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} + \frac{k_1 h_1}{h_1 - k_1 h_2} \right)} + x_{1в} = x_{10} k_1 + x_{1в} = x_{п.н.},$$

а приведенное активное сопротивление загрузки

$$r_2' \rightarrow 0.$$

Следовательно, и в этом случае, как и в предыдущем, эквивалентные параметры загруженного индуктора приближаются к параметрам пустого (незагруженного) индуктора.

4. *Нагрев при ярковыраженном поверхностном эффекте.* При $f \rightarrow \infty$ параметры загрузки изменяются пропорционально квадратному корню из частоты (4-18): $r_2 \equiv \sqrt{f}$ и $x_{2в} \equiv \sqrt{f}$, а сопротивления x_3 и x_0 во всех случаях пропорциональны частоте (6-11) и (6-31): $x_3 \equiv f$ и $x_0 \equiv f$.

В этом случае коэффициент приведения $C_{пр}$ достигает своего предельного значения

$$C_{пр} = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0} \right)^2 + \left(1 + \frac{x_3 + x_{2в}}{x_0} \right)^2} \rightarrow \frac{1}{\left(1 + \frac{x_3}{x_0} \right)^2} = C_{пред}.$$

Напомним, что

$$x_3 = \omega \mu_0 \frac{S_1 - S_2}{h_2}$$

$$\text{и } x_{10} = \omega \mu_0 S_1 / h_1.$$

Тогда

$$C_{пред} = \frac{1}{\left[1 + \frac{S_1 - S_2}{S_1} \frac{h_1}{h_2} \frac{(h_1 - h_2) k_1}{h_1 k_1} \right]^2} = \frac{k_1^2}{\left[\frac{h_1}{h_2} - \frac{S_2}{S_1} \left(\frac{h_1}{h_2} - k_1 \right) \right]^2}.$$

В случае, когда $S_2 \rightarrow S_1$ (т. е. зазор между индуктором и загрузкой стремится к нулю) значение $C_{пред} \rightarrow 1,0$, т. е. короткий индуктор с весьма малым зазором ведет себя так же, как бесконечно длинный индуктор.

Таким образом, рассмотренный нами в данной главе метод определения параметров системы индуктор—загрузка достаточно универсален и чрезвычайно прост, так как требует знания практически одного коэффициента k_1 , формула для вычисления которого (6-26) также предельно проста.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается участок h_{10} бесконечно длинного индуктора от реального короткого индуктора той же высоты h_1 ?
2. Выведите самостоятельно формулу (6-18) для определения коэффициента приведения $C_{пр}$.
3. Что такое сопротивление обратного замыкания и как его найти?

ГЛАВА 7

РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ НЕМАГНИТНОЙ ЗАГРУЗКИ

В данной главе рассмотрим схему и последовательность выполнения электрического расчета, а также приведем основные формулы для расчета индукционного нагревателя, которые являются общими для большинства индукционных (как нагревательных, так и плавильных) промышленных установок при нагреве (плавке) немагнитной загрузки. Расчеты выполним для случая нагрева цилиндрической загрузки в цилиндрическом индукторе.

Расчет параметров индукционных установок для нагрева тел с другой конфигурацией (полый цилиндр, плоская пластина и т. п.) полностью аналогичен приводимому ниже с той лишь разницей, что для вычисления значений активного и реактивного сопротивлений, а также активной и реактивной мощностей в системе индуктор — загрузка должны использоваться другие, соответствующие заданной конфигурации, формулы, приведенные, в частности, в Приложении (табл. П-1).

§ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ СИСТЕМЫ ИНДУКТОР — ЗАГРУЗКА

Задачей расчета является определение эквивалентных параметров индуктора с загрузкой, которые необходимо знать для дальнейшего расчета индукционной установки, а также для согласования параметров индуктора с параметрами источника питания.

Для расчета необходимы следующие данные: удельное электро-сопротивление материала индуктора ρ_1 и нагреваемого металла ρ_2 , внутренний диаметр D_1 и высота h_1 индуктора, диаметр D_2 и высота h_2 загрузки.

Расчет параметров системы осуществляем по методу общего потока, рассмотренному в гл. 6, т. е. определяем элементы схемы замещения (см. рис. 39) как сопротивления отрезка бесконечно длинной системы и приводим их к току короткого индуктора. Значения сопротивлений в расчете приведены к одновитковому индуктору, т. е. измеряются в омах на виток в квадрате. Для

получения «полных» сопротивлений эти значения должны быть умножены на ω^2 .

Последовательность расчета

1. Минимальную частоту тока, обеспечивающую высокое значение электрического к. п. д. нагревателя, определяем в соответствии с выражением (4-28):

$$f_{\min} = \pi 10^6 \frac{\rho_2}{\mu_2^2 D_2^2}.$$

В качестве рабочей частоты f выбираем частоту стандартного источника питания, выпускаемого промышленностью, ближайшую к f_{\min} , исходя из условия: $f \geq f_{\min}$.

2. Активное и внутреннее реактивное сопротивление индуктора, Ом/виток²:

$$r_1 = x_{1n} = \rho_1 \frac{\pi D_1'}{\Delta_1 h_1} \frac{1}{k_{3,n}}, \quad (7-1)$$

где $k_{3,n}$ — коэффициент заполнения индуктора, равный отношению высоты индуктирующего витка без изоляции к шагу намотки (значение $k_{3,n}$ зависит от конструкции индуктора и вида изоляции, $k_{3,n} = 0,75 \div 0,9$);

D_1' — расчетный диаметр индуктора, м:

$$D_1' = D_1 + \Delta_1; \quad (7-2)$$

Δ_1 — глубина проникновения тока в материал индуктора,

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\rho_1 / f}. \quad (7-3)$$

На практике обычно принимают для меди $\rho_1 \approx 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, что соответствует температуре меди $\sim 60^\circ \text{C}$.

3. Активное сопротивление загрузки, Ом/виток²:

$$r_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{\rho_2 D_2^2}{\Delta_2^2 h_2^2} \Psi_a, \quad (7-4)$$

где h_2' — расчетная высота загрузки, м,

$$h_2' = h_2 - \sum l_{(-)} = h_1 - \sum l_{(+)},$$

здесь $\sum l_{(-)}$

и $\sum l_{(+)}$ — сумма соответственно отрицательных и положительных свесов индуктора, м;

Ψ_a — вспомогательная функция, значения которой определяются по графику рис. 23 для соответствующего значения относительного радиуса загрузки \bar{R}_2 :

$$\bar{R}_2 = \frac{R_2 \sqrt{2}}{\Delta_2} = \frac{D_2}{\sqrt{2} \Delta_2}; \quad (7-5)$$

Δ_2 — глубина проникновения тока в материал загрузки, м:

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\rho_2 / \mu_2^2 f}. \quad (7-6)$$

4. Определяем внутреннее реактивное сопротивление загрузки, Ом/виток²:

$$x_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{\rho_2 D_2^2}{\Delta_2^2 h_2^2} \Psi_p, \quad (7-7)$$

где Ψ_p — вспомогательная функция, определяемая по графику (см. рис. 23) для того же \bar{R}_2 .

5. Реактивное сопротивление воздушного зазора

$$x_3 = \omega \mu_0 \frac{S_3}{h_2^2}, \quad (7-8)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота;

S_3 — площадь поперечного сечения магнитного потока, проходящего через воздушный зазор между загрузкой и индуктором, м²:

$$S_3 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2). \quad (7-9)$$

Подставив в уравнение (7-8) значение $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Г/м, получим x_3 , Ом/виток²:

$$x_3 = 2\pi^3 \frac{D_1^2 - D_2^2}{h_2^2} f 10^{-7}. \quad (7-10)$$

6. Реактивное сопротивление обратного замыкания, Ом/виток²:

$$x_0 = x_{10} \frac{h_1}{h_1 - k_1 h_2'}, \quad (7-11)$$

где k_1 — поправочный коэффициент, учитывающий конечную высоту индуктора и наличие магнитопровода, определяется по кривым рис. 41;

x_{10} — реактивное сопротивление пустого индуктора, Ом/виток²:

$$x_{10} = \omega \mu_0 \frac{S_1}{h_1} k_1, \quad (7-12)$$

здесь S_1 — площадь поперечного сечения пустого индуктора, м²:

$$S_1 = \pi D_1^2 / 4. \quad (7-13)$$

$$\text{Тогда } x_{10} = 2\pi^3 \frac{D_1^2 f}{h_1} 10^{-7}. \quad (7-14)$$

7. Коэффициент приведения параметров загрузки к току индуктора

$$C_{пр} = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{2e} + x_3}{x_0}\right)^2}. \quad (7-15)$$

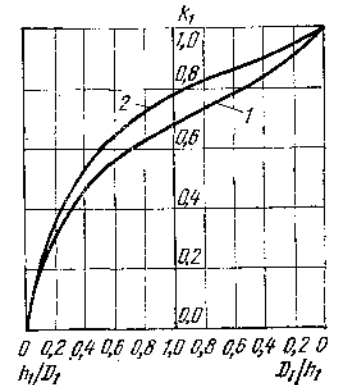


Рис. 41. Значения поправочного коэффициента k_1 :
1 — индуктор без магнитопровода; 2 — с магнитопроводом

8. Приведенные активное r'_2 и реактивное x'_2 сопротивления загрузки, Ом/виток²:

$$r'_2 = C_{пр} r_2; \quad (7-16)$$

$$x'_2 = C_{пр} \left[(x_{2н} + x_3) + \frac{(x_{2в} + x_3)^2 + r_2^2}{x_0} \right]. \quad (7-17)$$

9. Эквивалентные активное r_3 , реактивное x_3 и полное z_3 сопротивления системы индуктор — загрузка, Ом/виток²:

$$\left. \begin{aligned} r_3 &= r_1 + r'_2; \\ x_3 &= x_{1в} + x'_2; \\ z_3 &= \sqrt{r_3^2 + x_3^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7-18)$$

10. Электрический к. п. д. индуктора с загрузкой

$$\eta_3 = r'_2 / r_3. \quad (7-19)$$

11. Коэффициент мощности индуктора с загрузкой

$$\cos \varphi = r_3 / z_3. \quad (7-20)$$

12. Число витков индуктора при заданном напряжении U на индукторе

$$w = U \sqrt{\cos \varphi / P_{и} z_3}, \quad (7-21)$$

где $P_{и}$ — мощность, подводенная к индуктору, Вт.

13. Высота (ориентировочная) индуцирующего витка, м:

$$h'_в = \frac{h_1}{w} k_{з. и}. \quad (7-22)$$

Окончательно значение $h_в$ уточняем в соответствии с выпускаемым промышленностью сортаментом трубок (выбираем трубку по сортаменту, имеющую размер $h_в$, ближайший к $h'_в$, после чего уточняем общую высоту индуктора: $h_1 = h_в w / k_{з. и}$).

14. Активное $r_{и}$, реактивное $x_{и}$ и полное $z_{и}$ сопротивления загруженного индуктора, Ом:

$$r_{и} = r_3 w^2; \quad x_{и} = x_3 w^2; \quad z_{и} = z_3 w^2. \quad (7-23)$$

15. Сила тока индуктора, А:

$$I_{и} = I_1 = U / z_{и} \quad (7-24)$$

и настил тока в индукторе (напряженность магнитного поля на внутренней поверхности индуктора), А/м:

$$H_{и} = I_{и} w / h_1. \quad (7-25)$$

16. Активная мощность, подводенная к индуктору, Вт:

$$P_{и} = UI \cos \varphi. \quad (7-26)$$

§ 2. РАСЧЕТ ВОДООХЛАЖДЕНИЯ ИНДУКТОРА

В задачу расчета входит: определение потребного расхода воды, необходимого для отведения тепла, вызываемого электрическими потерями в индукторе, и тепловых потерь от загрузки к индуктору (через футеровку); определение потерь напора воды в индукторе, а также проверка допустимой температуры меди индуктора.

Для расчета необходимы следующие данные: электрические потери в индукторе $P_{э. и}$; тепловые потери через футеровку, воспринимаемые индуктором $P_{т. в}$; число витков индуктора w , площадь сечения $S_{в}$ и периметр $P_{в}$ канала охлаждения индуцирующего витка, допустимые потери напора воды в системе охлаждения $\Delta p_{доп}$ при номинальной мощности на индукторе.

Последовательность проведения расчета

1. Суммарные потери мощности, Вт:

$$P_{охл} = P_{э. и} + P_{т. в}, \quad (7-27)$$

где $P_{т. в}$ — тепловые потери, методика расчета которых будет изложена ниже (см. гл. 12).

Электрические потери в индукторе (Вт) определяются следующим образом:

$$P_{э. и} \approx P_{и} \left[(1 - \eta_3) + 0,5 \frac{h_x}{h_1} \right]. \quad (7-28)$$

Здесь второе слагаемое в квадратных скобках учитывает дополнительные электрические потери в «холостых» катушках индуктора (высотой h_x), примыкающих к «активным» катушкам. Опыт показывает, что эти потери, отнесенные к единице высоты, составляют примерно 50% от средних потерь в «активных» катушках [отсюда — коэффициент 0,5 в (7-28)].

2. Потребный расход воды, м³/с:

$$Q_{охл} = 0,24 \frac{P_{охл}}{T_{вых} - T_{вх}} 10^{-6}, \quad (7-29)$$

где $T_{вх}$ — температура воды на входе в индуктор (при охлаждении водопроводной водой: $15^\circ \text{C} \leq T_{вх} < 25^\circ \text{C}$; при замкнутом цикле охлаждения $15^\circ \text{C} \leq T_{вх} < 35^\circ \text{C}$);

$T_{вых}$ — температура воды на выходе из индуктора $T_{вых} \leq 50^\circ \text{C}$ (при замкнутом цикле охлаждения $T_{вых} \leq 65^\circ \text{C}$).

При этом нижняя граница для $T_{вх}$ устанавливается из условия исключения отпотевания индуктора, могущего привести к нарушению прочности электроизоляции индуктора и к пробое, а верхняя граница для $T_{вых}$ устанавливается с целью снижения образования накипи на стенках канала охлаждения, уменьшающей эффективность теплоотвода и сечение канала.

3. Скорость воды в канале охлаждения, м/с:

$$v_{в} = Q_{охл} / S_{в} n_{в}, \quad (7-30)$$

где $n_{в}$ — число параллельных ветвей охлаждения индуктора (на первом цикле расчета можно принять $n_{в} = 1$).

4. Число Рейнольдса Re , которое характеризует режим течения жидкости в канале

$$Re = v_n d_{в.э} / \nu_n, \quad (7-31)$$

где ν_n — кинематическая вязкость воды, m^2/c ;

$d_{в.э}$ — гидравлический эквивалент диаметра канала охлаждения, м:

$$d_{в.э} = 4S_n / \Pi_n. \quad (7-32)$$

При цилиндрическом канале $d_{в.э} = d_n$, где d_n — диаметр канала охлаждения.

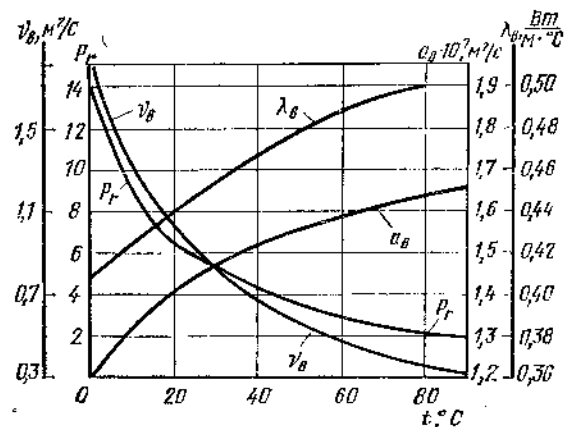


Рис. 42. Теплофизические свойства воды

Кинематическая вязкость воды ν_n довольно сильно зависит от температуры (рис. 42). Обычно при вычислении Re в уравнение (7-31) подставляют значение ν_n для средней температуры воды в канале; К:

$$T_{н.ср} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2}. \quad (7-33)$$

При $Re \leq 2300$ движение ламинарное, при $Re > 10^4$ — турбулентное и при промежуточных значениях Re движение имеет смешанный характер. Наилучшие условия для теплоотвода обеспечиваются при турбулентном движении, которое достигается при достаточно больших скоростях v_n . Поскольку при ламинарном движении интенсивность теплопередачи от стенки трубки к воде ограничивается теплопроводностью воды, обычно при проектировании индукторов стремятся обеспечить условие $Re > 2300$.

5. Потери напора (перепад давления) воды на длине трубки индуктора (одной ветви охлаждения) также зависят от характера движения (числа Re).

ТАБЛИЦА 3

КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВОРОТА СТРУИ НА 360°

$\frac{D_1}{d_{в.э}}$	Число Рейнольдса $Re \cdot 10^{-3}$					
	3	10	50	100	250	500
8	0,400	0,270	0,184	0,161	0,139	0,127
10	0,391	0,264	0,180	0,157	0,136	0,125
12	0,344	0,218	0,148	0,130	0,112	0,103
15	0,294	0,198	0,135	0,118	0,102	0,094
20	0,254	0,171	0,117	0,102	0,088	0,081
25	0,205	0,138	0,094	0,082	0,071	0,065
30	0,171	0,116	0,079	0,069	0,060	0,055
40	0,143	0,097	0,066	0,058	0,050	0,046
50	0,098	0,066	0,045	0,039	0,034	0,032

При турбулентном движении Δp , Па:

$$\Delta p = w \frac{v_n^2}{2} \left(\xi k_{ш} \frac{l_n}{d_{в.э}} + \zeta_{пов} \right), \quad (7-34)$$

где l_n — длина канала охлаждения одного витка индуктора, мм;
 ξ — коэффициент трения для гладких труб, зависящий от числа Рейнольдса: при $Re \leq 2 \cdot 10^3$

$$\xi = 64/Re, \quad (7-35)$$

при $2 \cdot 10^3 < Re < 10^5$

$$\xi = 0,316/(Re)^{0,25}; \quad (7-36)$$

ζ — коэффициент сопротивления поворота струи на 360° (табл. 3);

$k_{ш}$ — коэффициент увеличения сопротивления, вызванный шероховатостью внутренней поверхности канала охлаждения.

Введение в выражение (7-34) коэффициента $k_{ш}$ вызвано тем, что поверхность реальной трубки не является совершенно гладкой из-за дефектов, возникающих при изготовлении трубки и индуктора, а также из-за отложения на стенках канала накипи в процессе его эксплуатации. На практике принимают $k_{ш} = 2 \div 3$.

Величина Δp , найденная по уравнению (7-34), не должна превышать допустимых потерь напора $\Delta p_{доп}$. В частности, если индуктор охлаждается водой из городского водопровода, должно соблюдаться условие: $\Delta p < 2 \cdot 10^5$ Па.

Если это условие не выполняется, т. е. полученное из уравнения (7-34) значение Δp превышает допустимую величину, необходимо разделить индуктор по охлаждению на несколько секций, причем число секций охлаждения определяют из выражения:

$$n_n = \sqrt[3]{\Delta p / \Delta p_{доп}}. \quad (7-37)$$

Поскольку при этом изменится скорость v_w и число Re , от которых зависят почти все параметры системы охлаждения, необходимо уточнить весь расчет.

6. Теперь необходимо убедиться, что условия конвективной теплопередачи в канале охлаждения обеспечивают отвод от индуктора суммарных потерь $P_{охл}$.

Мощность, которая может быть отведена охлаждающей водой, Вт:

$$P_w = \alpha_w (T_{ст} - T_{ср}) \Pi_w l_w k_w, \quad (7-38)$$

где $T_{ст}$ — температура стенки индуктора, К;

k_w — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения теплового потока по периметру канала охлаждения ($0,5 < k_w < 1,0$);

α_w — коэффициент теплоотдачи от стенки индуктора к охлаждающей воде, Вт/(м² · К):

$$\alpha_w = Nu \frac{\lambda_w}{d_{в.э}}, \quad (7-39)$$

здесь λ_w — теплопроводность воды, Вт/(м · К), определяется по графикам рис. 42;

Nu — критерий Нуссельта (его называют также безразмерным коэффициентом теплоотдачи при конвективном теплообмене).

При турбулентном режиме

$$Nu = 0,023 (Re)^{0,8} (Pr)^{0,4}, \quad (7-40)$$

где Pr — критерий Прандтля, являющийся теплофизической характеристикой теплоносителя (значения Pr для воды приведены на рис. 42)

$$Pr = \nu_w / a_w, \quad (7-41)$$

здесь a_w — коэффициент температуропроводности воды, м²/с, значения которого также приведены на рис. 42.

После вычисления P_w по формуле (7-38) необходимо убедиться, что соблюдается условие

$$P_{охл} \leq P_w. \quad (7-42)$$

Если $P_{охл} > P_w$, следует увеличить расход воды и скорость v_w (изменив число ветвей охлаждения, сечение трубки индуктора и т. п.); если же условие (7-42) соблюдается, на этом расчет охлаждения индуктора заканчивается.

Следует отметить, что условие (7-42) может быть несколько видоизменено. Так, не вычисляя значения P_w , можно сразу определить максимальную температуру стенки индуктора, К:

$$T_{ст} = T_{вых} + \frac{P_{охл}}{\alpha_w \Pi_w l_w k_w} \quad (7-43)$$

и сравнить ее с допустимой температурой $T_{ст. доп}$. Допустимую температуру стенки можно принять равной 373 К. В этом случае соблюдение условия $T_{ст} < T_{ст. доп}$ обеспечивает отсутствие местных паровобразований в канале охлаждения индуктора.

§ 3. РАСЧЕТ МАГНИТОПРОВОДА ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

В индукционных установках, особенно в установках промышленной частоты, часто используется магнитопровод (магнитный экран), назначением которого является сосредоточение магнитного поля в определенной области пространства вне индуктора или внутри его и придания ему определенной конфигурации, а также защита окружающих индуктор металлоконструкций от нагрева.

Магнитопровод обычно устанавливают непосредственно за индуктором и выполняют (с целью снижения в нем электрических потерь) из листовой электротехнической стали толщиной 0,5; 0,35 или 0,2 мм; горячекатаной (марки Э41, Э42, Э43, Э44 и др.) или холоднокатаной текстурованной стали (марки Э310, Э320, Э330 и др.). Последние обладают в направлении проката более высокой магнитной проницаемостью и более низкими потерями. Однако, применяя их, нужно иметь в виду, что удельные потери резко возрастают при расположении листов под углом α_m к линиям магнитной индукции B .

Удельные потери p_c в холоднокатаной стали Э330 при разных значениях α_m и при значениях магнитной индукции В-1Т (числитель) и В-1,5Т (знаменатель):

α_m , град	0	30	45	60	90
p_c , Вт/кг	0,69/1,52	0,89/2,26	1,18/3,64	1,45/4,72	1,55/4,22

Для упрощения конструкции магнитопровод выполняют из отдельных шихтованных пакетов прямоугольной, или близкой к ней, формы (рис. 43).

Задачей расчета является определение сечения магнитопровода и электрических потерь в нем.

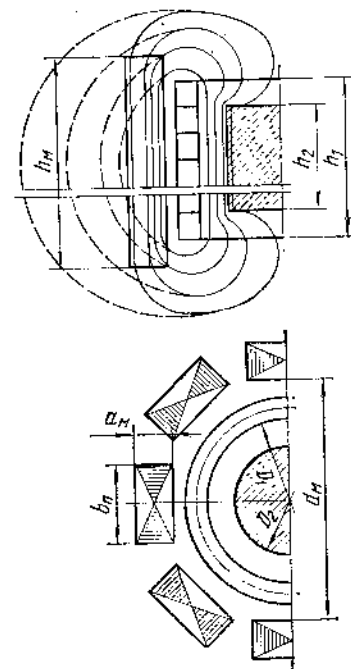


Рис. 43. Эскиз размещения магнитопроводов в печи

Для расчета необходимы следующие данные: напряжение на индукторе U_n ; число витков индуктора w , частота источника питания f ; внутренний диаметр индуктора D_1 и его высота h_1 ; диаметр загрузки D_2 .

Последовательность расчета

1. Полный магнитный поток, создаваемый индуктором, Вб
 $\Phi = U_n / 4,44 f w$. (7-44)

Магнитный поток, проходящий по магнитопроводу Φ_m , в общем случае меньше значения, полученного из формулы (7-44), так как часть полного потока проходит в окружающем пространстве вне магнитопровода. Приблизительно это можно учесть, введя коэффициент связи между индуктором и магнитопроводом k_m , который должен быть меньше единицы ($k_m < 1$):

$$\Phi_m = k_m \Phi. \quad (7-45)$$

2. Площадь активного сечения магнитопровода, м²:

$$S_m = \Phi_m / B_m, \quad (7-46)$$

где B_m — рекомендуемое и предельно допустимое значение магнитной индукции в магнитопровode, которое зависит от марки примененной электротехнической стали и от частоты f .

В установках промышленной частоты ($f = 50$ Гц) рекомендуется принимать значения $B_m = (0,9 \div 1,2) T$ для горячекатаных сталей и $B_m = (1,0 \div 1,5) T$ для холоднокатаных. На средних частотах для всех марок сталей можно принимать значения $B_m = (0,5 \div 1,0) T$.

3. Как указывалось выше, из конструктивных соображений магнитопровод обычно выполняют из отдельных пактов (см. рис. 43). Число пактов приблизительно можно определить из выражения

$$m_n \approx (\pi D_n - 4b_n) / 1,5b_n, \quad (7-47)$$

где b_n — толщина пакета, м (ориентировочно можно принимать

$$b_n \approx (0,1 \div 0,15) D_1). \quad (7-48)$$

Полное сечение пакета магнитопровода, м²:

$$S_n = a_m b_n = \frac{S_m}{m_n k_c}, \quad (7-49)$$

где k_c — коэффициент заполнения пакета сталью (при изоляции листов стали лаком можно принимать $k_c \approx 0,94$ при толщине листа $\delta_c = 0,5$ мм, и $k_c \approx 0,91$ при толщине листа $\delta_c = 0,35$ мм);

a_m — радиальный размер пакета, м:

$$a_m = S_n / b_n. \quad (7-50)$$

Масса электротехнической стали магнитопровода, кг:

$$G_m = S_n k_m \rho_c m_n, \quad (7-51)$$

где ρ_c — плотность электротехнической стали, кг/м³ ($\rho_c = 7,6$ т/м³);

h_m — высота магнитопровода, м (обычно выбирается по конструктивным соображениям, ориентировочно можно принимать $h_m \approx h_1$).

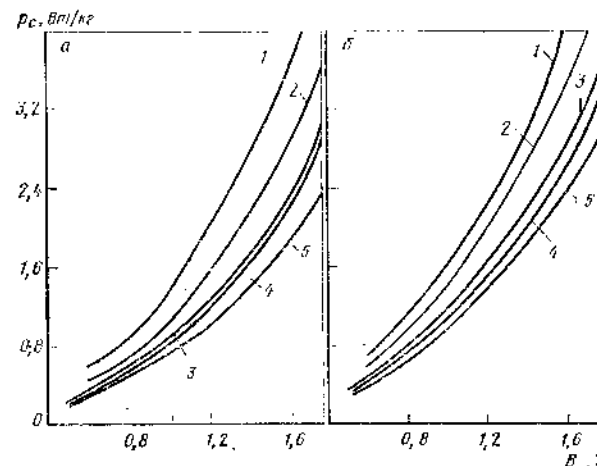


Рис. 44. Удельные потери в электротехнической стали при $b_d = 0,35$ мм (а) и $b_d = 0,5$ мм (б):
 1 — сталь 341; 2 — 342; 3 — 3310; 4 — 3320; 5 — 3330

4. Электрические потери в магнитопровode P_m можно определить, зная удельные потери в стали ρ_c . Удельные потери на гистерезис и вихревые токи зависят от марки стали и фактического значения магнитной индукции B в пакете магнитопровода и от частоты перемещения f .

На рис. 44 приведены зависимости ρ_c от индукции для некоторых марок стали при $f = 50$ Гц.

Удельные потери в стали (Вт/кг) при другой частоте f при том же значении индукции можно приблизительно определить из соотношения

$$\rho_c(f) \approx \rho_c(50) (f/50)^{1,3}. \quad (7-52)$$

Таким образом, электрические потери в магнитопровode, Вт:

$$P_m = G_m \rho_c k_d, \quad (7-53)$$

где k_d — коэффициент добавочных потерь, вызванных неоднородностью магнитного поля и дефектами изготовления магнитопровода ($k_d \approx 1,1 \div 1,8$).

§ 4. РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Для компенсации реактивной мощности установки применяют конденсаторные банки, которые обычно объединяют в конденсаторную батарею. При этом часть банок постоянно подключена к индуктору, а часть банок включена через коммутирующие устройства — эти банки подключаются по мере необходимости для подстройки колебательного контура в резонанс при изменении параметров загрузки во время нагрева.

Задачей расчета является: определение необходимого числа конденсаторных банок, а также электрических потерь в конденсаторах.

Для расчета необходимы следующие данные: частота источника питания f , напряжение на индукторе U_n , «естественный» (без компенсации) $\cos \varphi$ установки, конечное значение $\cos \varphi_k$ после компенсации, активная мощность на индукторе P_n .

Расчет проводим для схемы параллельного колебательного контура.

Последовательность расчета

1. Тип конденсаторов выбирают по справочным данным (см. табл. 4). При этом принимают во внимание частоту источника питания, напряжение на индукторе и схему соединения катушек индуктора. Номинальное напряжение конденсаторных банок $U_{б.н}$ (ему соответствует номинальная мощность $P_{б.н}$) должно быть близко к U_n , так как при $U_{б.н} > U_n$ имеет место недоиспользование банок по мощности, причем это недоиспользование составит

$$\Delta P_{к.б} = \frac{P_{б.ф}}{P_{б.н}} = \frac{U_{нф}^2 C}{U_{б.н}^2 C} = \frac{U_n^2}{U_{б.н}^2}, \quad (7-54)$$

где $P_{б.ф}$ — фактическая реактивная мощность конденсаторов при $U = U_n$.

Таким образом, недоиспользование по напряжению в два раза означает недоиспользование банок по мощности в четыре раза.

2. Реактивная мощность конденсаторной батареи $P_{к.б}$ (Var), необходимая для доведения низкого $\cos \varphi$ установки до значения $\cos \varphi_k$:

$$P_{к.б} = P_n (\lg \varphi - \lg \varphi_k) \frac{U_{б.н}^2}{U_n^2} k_б, \quad (7-55)$$

где $k_б$ — коэффициент запаса ($k_б = 1,1 \div 1,3$).

Общая емкость конденсаторной батареи, Ф

$$C_{к.б} = P_{к.б} / 2\pi f U_n^2. \quad (7-56)$$

Необходимое число конденсаторных банок

$$N_б = C_{к.б} / C_{1,0}, \quad (7-57)$$

где $C_{1,0}$ — номинальная емкость одной банки, Ф, определяемая по табл. 4.

ТАБЛИЦА 4

ДАННЫЕ КОНДЕНСАТОРОВ, ВЫПУСКАЕМЫХ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

Тип конденсаторов	Напряжение, В	Реактивная мощность, 10^3 Вар	Емкость, мкФ	Тип конденсаторов	Напряжение, В	Реактивная мощность, 10^3 Вар	Емкость, мкФ
КС-0,38-50	380	50	—	ЭСВП-0,8-2,4	800	300	31,2
КС-0,5-19	500	19	—	ЭСВ-1,6-2,4	1600		7,8
КС-0,5-36	500	36	—	ЭСВ-1-2,4	1000		19,9
КС-0,66-50	660	50	—	ЭСВП-1-2,4	1000		19,9
КСЭ-1,05-75	1050	75	—	ЭСВ-2-2,4	2000	350	4,9
КСЭК-1,2-150	1200	150	—	ЭСВ-0,5-4	500		55,7
ЭСВ-0,8-0,5	800	200	99,5	ЭСВ-0,8-4	800		21,8
ЭСВ-1-0,5	1000		63,6	ЭСВП-0,8-4	800		21,8
ЭСВ-1,6-0,5	1600		24,9	ЭСВ-1-4	1000		13,9
ЭСВ-2-0,5	2000		15,9	ЭСВП-1-4	1000	400	13,9
ЭСВ-0,8-1	800	250	62,2	ЭСВ-1,6-4	1600		5,4
ЭСВ-1-1	1000		39,8	ЭСВ-2-4	2000		3,5
ЭСВ-1,6-1	1600		15,5	ЭСВ-0,5-10	500		25,5
ЭСВ-2-1	2000		9,9	ЭСВ-0,8-10	800		9,9
ЭСВ-0,5-2,4	500	300	79,6	ЭСВП-0,8-10	800		9,9
ЭСВ-0,8-2,4	800		31,2				

3. Электрические потери в конденсаторной батарее, Вт:

$$P_{э.б} = P_{к.б} \lg \delta, \quad (7-58)$$

где $\lg \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

§ 5. ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Электрические и тепловые расчеты индукционной нагревательной или плавильной установок завершаются определением их энергетических характеристик и построением энергетического баланса. Энергетический баланс дает наглядное представление о степени соответствия вновь спроектированной установки предъявляемым к ней требованиям, а сопоставление его с энергетическим балансом действующих установок позволяет сделать вывод о степени совершенства новой установки.

Таким образом, задачей завершающего расчета является определение общего к. п. д. установки, уточнение значений основных показателей работы печи и, наконец, построение теплового и энергетического балансов установки.

Для большей наглядности построение энергетического баланса рассмотрим на примере индукционной тигельной плавильной печи.

На рис. 45, а показана принципиальная блочная схема индукционной плавильной установки, а на рис. 45, б — диаграмма

энергетического баланса. Для наглядности стрелки на диаграмме, символизирующие потери энергии в каком-либо элементе установки, указывают на соответствующий блок принципиальной схемы. На рис. 45, б приведена диаграмма теплового баланса, учитывающего также потери излучением с зеркала ванны $P_{\text{изл}}$, тепловые потери от расплава через боковую стенку тигля $P_{\text{т.б}}$, тепловые потери через днище (подину) печи $P_{\text{т.д}}$.

Данные, необходимые для построения теплового баланса печи, определяются при тепловом расчете печи (см. гл. 12).

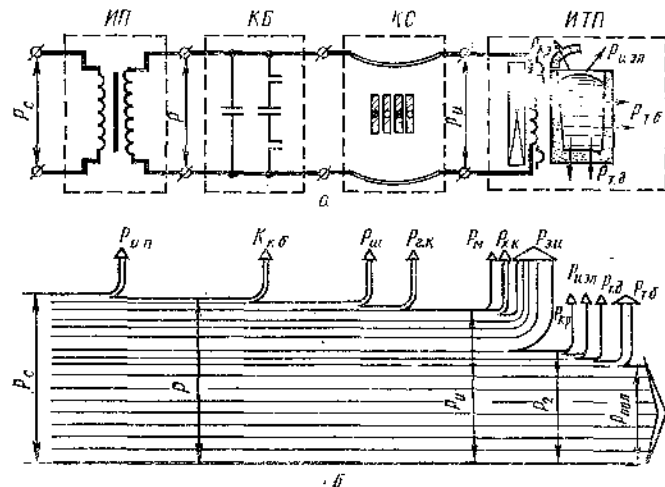


Рис. 45. Структурная схема (а) и энергетический баланс индукционной установки (б)

Данные, необходимые для расчета энергетических характеристик и построения энергетического баланса установки, определяют в основном при электрическом расчете печи, а некоторые из них — по справочным данным.

Последовательность расчета

1. Суммарные электрические потери в элементах установки

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma.н} + P_{\Sigma.п} + P_{\Sigma.т} + P_{\Sigma.б} + P_{\Sigma.л} \quad (7-59)$$

Определим составляющие суммарных электрических потерь, Вт:

а) электрические потери в индукторе: без учета потерь в холостых катушках

$$P_{\Sigma.н} = I_1^2 r_1, \quad (7-60)$$

с учетом потерь в холостых катушках

$$P_{\Sigma.н} = P_{\Sigma} \left[(1 - \eta_{\Sigma}) + 0,5 \frac{h_{\Sigma}}{h_1} \right]; \quad (7-61)$$

б) потери в магнитопроводе

$$P_{\Sigma} = G_m p_c k_d; \quad (7-62)$$

в) потери в токоподводе

$$P_{\Sigma.т} = \sum_{i=1}^n I_{\Sigma.т.и}^2 r_i, \quad (7-63)$$

где $I_{\Sigma.т.и}$, r_i — сила тока и активное сопротивление соответствующего участка токоподвода (кабельной линии, короткой сети и гибких кабелей);

г) потери в конденсаторной батарее

$$P_{\Sigma.б} = P_{\Sigma.б} \lg \delta; \quad (7-64)$$

д) электрические потери в источнике питания (или в трансформаторе)

$$P_{\Sigma.п} = P_f \left(\frac{1}{\eta_{пр}} - 1 \right), \quad (7-65)$$

где P_f — мощность, забираемая от преобразователя,

$$P_f = P_{\Sigma} + P_{\Sigma}, \quad (7-66)$$

$\eta_{пр}$ — к. п. д. преобразователя (или трансформатора), зависит от типа преобразователя и от использования номинальной мощности (P/P_n), рис. 46.

2. Мощность, подводенная к колебательному контуру, Вт:

$$P_{\Sigma.к} = P_f - P_{\Sigma.л}, \quad (7-67)$$

где $P_{\Sigma.л}$ — потери в кабельной линии, Вт.

3. Активная мощность, потребляемая от сети, Вт:

$$P_{\Sigma} = P_f + P_{\Sigma.п}. \quad (7-68)$$

4. Общий к. п. д. индукционной установки

$$\eta_{\Sigma} = P_{\Sigma.к} / P_{\Sigma}, \quad (7-69)$$

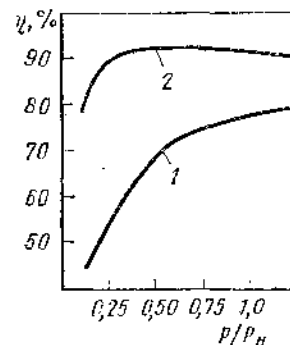


Рис. 46. К. п. д. машинных (1) и статических (2) преобразователей частоты

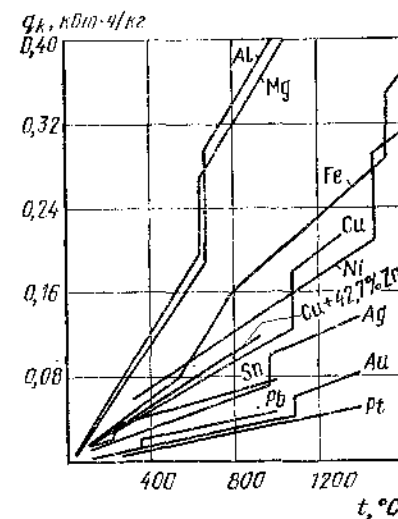


Рис. 47. Энтальпия различных металлов

где $P_{\text{пол}}$ — полезная мощность, идущая на плавление и перегрев металла до конечной температуры, Вт:

$$P_{\text{пол}} = P_2 - P_{\text{т.п}}, \quad (7-70)$$

здесь $P_{\text{т.п}}$ — суммарные тепловые потери от расплава, Вт:

$$P_{\text{т.п}} = P_{\text{исл}} + P_{\text{т.б}} + P_{\text{т.д.}} \quad (7-71)$$

5. Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т:

$$q = q_k / \eta_y, \quad (7-72)$$

где q_k — энтальпия металла при конечной температуре, кВт·ч/т ($q = 2,78 \cdot 10^{-4} q_k / \eta_y$ кВт·ч/т, если q_k задано в джоулях на килограмм). Величину q_k различных металлов можно определить по графикам, приведенным на рис. 47.

6. Длительность плавки, ч:

$$\tau_{\text{пл}} = G_{\text{сл}} q / P_{\text{с}}, \quad (7-73)$$

где $G_{\text{сл}}$ — масса металла, сливаемого из печи, т.

7. Производительность по расплавлению и перегреву, т/ч

$$g = G_{\text{сл}} / \tau_{\text{пл}}. \quad (7-74)$$

Контрольные вопросы

1. Как выбирается частота источника питания?
2. Почему при расчете охлаждения необходимо обеспечивать условие $Re > 2300$?
3. Почему на средних частотах принимают допустимые значения индукции в магнитопроводе меньше, чем на промышленной частоте?
4. Для чего необходимо составлять энергетический баланс установки?

ГЛАВА 8

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЗАГРУЗКИ

§ 1. ИЗМЕНЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ТОКА И ПОГЛОЩЕНИЯ МОЩНОСТИ С РОСТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАГРУЗКИ

Активная мощность, поглощаемая цилиндрической загрузкой высотой h_2 , определяется выражением (4-16):

$$P_2 = I^2 \omega^2 \frac{\pi D_2 \rho_2}{h_2 \Delta_2} \bar{R}_2 \Psi_a.$$

Приняв во внимание, что при ярко выраженном поверхностном эффекте произведение $\bar{R}_2 \Psi_a \rightarrow 1,0$ (см. гл. 4), и подставив в уравнение (4-16) вместо Δ_2 его значение $\Delta_2 = 503 \sqrt{\rho_2 / \mu_2' f}$, перепишем выражение (4-16) в виде

$$P_2 = K \sqrt{\rho_2 \mu_2'}. \quad (8-1)$$

Величину $\sqrt{\rho_2 \mu_2'}$ часто называют коэффициентом поглощения мощности загрузкой, поскольку он характеризует интенсивность поглощения электромагнит-

ной энергии загрузкой в зависимости от ее свойств (при прочих равных условиях). Свойства эти меняются при нагреве загрузки, по мере повышения ее температуры.

Для немагнитных материалов относительная магнитная проницаемость $\mu_2' = 1,0$ и не зависит от температуры, поэтому изменения Δ_2 и P_2 определяются лишь изменением удельного сопротивления ρ_2 . Для большинства металлов и сплавов величина ρ_2 меняется плавно с изменением температуры.

Так, например, как для ферромагнитных, так и для немагнитных сталей, при комнатной температуре $\rho_2 = (1 - 2) \cdot 10^{-7}$ Ом·м. С ростом температуры ρ_2 монотонно возрастает, достигая при температуре 800—900°С величины $\sim 10^{-6}$ Ом·м.

Таким образом, в интервале 20—800°С удельное сопротивление увеличивается в 5—10 раз. При дальнейшем увеличении температуры ρ_2 продолжает расти,

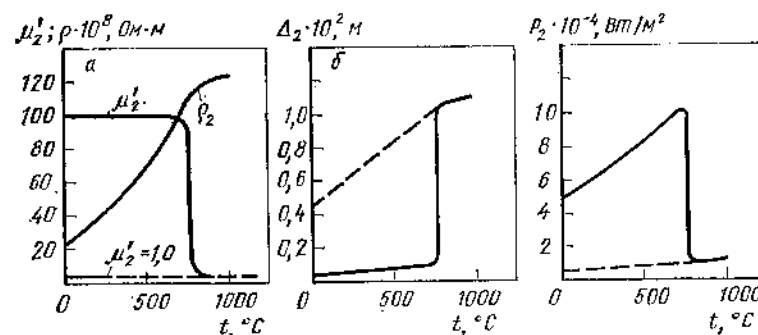


Рис. 48. Характер изменения удельного сопротивления ρ_2 , магнитной проницаемости μ_2' , а также глубины проникновения Δ_2 и активной мощности P_2 с ростом температуры стали

хотя и медленнее, причем значения ρ_2 различных сталей выравниваются и становятся почти одинаковыми [порядка $(120 - 130) \cdot 10^{-8}$ Ом·м]. Характер изменения ρ_2 для стали показан на рис. 48, а.

В соответствии с этим глубина проникновения Δ_2 и поглощаемая мощность P_2 с увеличением температуры плавно возрастают, как показано на рис. 48, б и в штриховыми линиями.

Для ферромагнитных материалов картина выглядит иначе.

Магнитная проницаемость при изменении температуры от комнатной до 650—700°С меняется мало, а затем при достижении определенной температуры, называемой точкой Кюри, она падает скачком до величины, равной магнитной проницаемости вакуума $\mu_2' = 1,0$ (рис. 48, а, сплошные линии); для большей наглядности значение μ_2' для стали взято при сравнительно малых значениях H_0 ($\sim 10^4$ А/м).

В соответствии с таким характером изменения ρ_2 и μ_2' графики изменения Δ_2 и P_2 при нагреве ферромагнитных материалов (рис. 48, б и в, сплошные линии) резко отличаются от графиков для немагнитных материалов. Как видно из сопоставления сплошных и штриховых кривых, глубина проникновения тока Δ_2 при нагреве магнитной стали от исходной температуры до точки Кюри резко возрастает при переходе через точку Кюри (в ~ 10 раз). Глубину проникновения в сталь, потерявшую магнитные свойства (при нагреве или плавке), называют горячей глубиной проникновения тока.

В том же температурном диапазоне мощность, поглощаемая магнитной сталью, значительно выше мощности, поглощаемой немагнитной сталью. При температурах, превышающих точку Кюри, эти мощности совпадают.

§ 2. РЕЖИМЫ НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ

При индукционном нагреве стали и других ферромагнитных материалов принято выделять три основные стадии нагрева, различающиеся режимом работы системы индуктор—загрузка.

1. *Холодный режим* характеризует начальную стадию нагрева, когда удельное сопротивление нагреваемого металла постоянно по всему сечению загрузки и равно исходному значению. Магнитная проницаемость μ в любой точке сечения определяется кривой намагничивания (см. рис. 72).

Поскольку напряженность магнитного поля H в точке зависит и от координаты точки (текущего радиуса r), и от температуры T металла в этой точке, то и магнитная проницаемость μ также является функцией r и T :

$$\mu = f(H) \cdot f(r, T).$$

2. *Промежуточный режим*, когда температура поверхности нагреваемого тела ниже точки Кюри, но выше исходной. Среднее значение точки Кюри для сталей можно принять $T_K \approx 750^\circ \text{C}$. На этой стадии нагрева, в отличие от предыдущей, нужно учитывать зависимость ρ_2 от координаты r , поскольку на этой стадии имеет место значительный перепад температур по радиусу загрузки.

Наибольшее изменение удельного сопротивления происходит в поверхностном слое загрузки на глубине, несколько превышающей глубину проникновения Δ_2 . В пределах этого слоя температура и удельное сопротивление изменяются, как показывает опыт, не более чем в два раза. В то же самое время магнитная проницаемость возрастает от поверхности вглубь в сотни раз. Поэтому при расчетах промежуточного режима также допустимо принимать удельное сопротивление ρ_2 постоянным по сечению, численно равным его значению на поверхности, для соответствующей температуры (обычно промежуточный режим рассчитывают при $T_{\text{пов}} \approx 600 \div 650^\circ \text{C}$).

3. *Горячий режим*, при котором поверхностный слой определенной толщины (обозначим его b_K) нагревается выше точки Кюри, а остальное сечение имеет температуру ниже точки Кюри, постепенно спадающую по направлению к оси загрузки. При этом в общем случае (начало горячего режима) непостоянным по сечению и ρ_2 , и μ_2 , причем μ_2 падает скачком на границе слоя b_K (см. рис. 48, а).

В предельном случае горячего режима, когда все сечение прогрето выше температуры магнитных превращений в стали, значения ρ_2 и μ_2 можно считать постоянными по сечению, причем $\mu_2 = 1,0$. Практически эти допущения приемлемы уже при достижении $b_K > 2 \Delta_K$, где Δ_K — горячая глубина проникновения.

Заметим, что последняя фаза нагрева для расчетов наиболее проста, причем сам расчет не отличается от расчета немагнитной загрузки, изложенного в гл. 7. Напротив, начальная фаза горячего режима наиболее сложна для расчетов.

Здесь мы рассмотрим лишь первые две стадии нагрева, характерной особенностью которых является то, что поверхностный слой загрузки, в котором происходит поглощение электромагнитной энергии поля, является ферромагнитным. Наиболее существенным является тот факт, что $\mu \neq \text{const}$, а меняется с изменением координаты точки.

Магнитная проницаемость загрузки в очень сильной степени зависит от напряженности магнитного поля, в котором помещена загрузка (рис. 49). При индукционном нагреве стали напряженность магнитного поля у поверхности загрузки во много раз превосходит критическое значение $H_{\text{кр}}$, при котором наблюдается максимум μ_2 , поэтому поверхностный слой загрузки находится в состоянии

магнитного насыщения. Однако на некоторой глубине x_1 от поверхности напряженность поля проходит через значение $H_{\text{кр}}$ и на этой глубине μ' резко возрастает и имеет свое максимальное значение μ'_{max} . На рис. 50 показан характер изменения μ' в зависимости от $x = R_2 - r$ (x — расстояние от поверхности загрузки до точки с текущим радиусом r), обусловленный затуханием амплитуды H в силу проявления поверхностного эффекта.

В случае, когда поверхностный слой детали глубиной b_K прогреет выше точки Кюри, стальная деталь может быть представлена как двухслойное тело. При этом в пределах каждого слоя удельное сопротивление ρ и магнитная проницаемость μ' принимаются постоянными: в первом слое $\rho' = \text{const}$ и $\mu' = 1,0$; во втором ρ'' и μ'' (часто принимают $\rho'' = \rho'$) и $\mu'' = \text{const} > 1,0$ (рис. 51). Эти представления положены в основу приближенного расчета горячего режима.

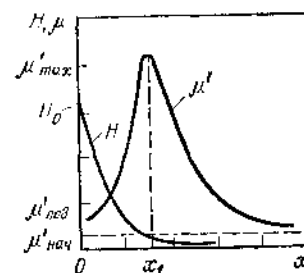


Рис. 50. Характер изменения H и μ' по глубине ферромагнитного тела

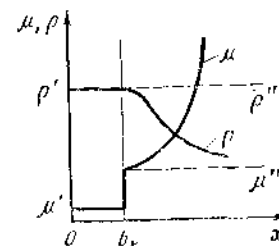


Рис. 51. Характер изменения ρ и μ' по координате x

Величина x_1 (см. рис. 50) по существу является глубиной проникновения электромагнитной волны в загрузку, причем эта величина будет меньше, чем вычисленная по значению $\mu'_2 = \mu'_{\text{пов}}$ на поверхности, если предположить, что μ'_2 не зависит от x . Это имеет место потому, что в интервале $0 < x < x_1$ возрастание μ'_2 приводит к снижению $\Delta_2 = 503 \sqrt{\rho_2 / \mu'_2 f}$. Соответственно круче будет спадать и эволюция плотности тока.

Увеличение поверхностного эффекта приводит к повышению электрического сопротивления, а следовательно, и мощности, поглощаемой загрузкой, по сравнению со случаем, когда $\mu'_2 = \mu'_{\text{пов}} = \text{const}$. Следовательно, можно сделать два важных вывода:

- 1) поверхностный эффект в ферромагнитном теле выражен гораздо более сильно, чем в немагнитном благодаря тому, что $\mu'_2 \gg 1$;
- 2) поверхностный эффект в ферромагнитной загрузке с переменной по глубине магнитной проницаемостью, вызванной изменением температуры по радиусу, выражен сильнее, чем при $\mu' = \text{const}$.

Полное электрическое сопротивление участка ферромагнитного тела высотой h_2 и диаметром D_2 находят из решения уравнений Максвелла для ферромагнитной среды.

Не приводя здесь этого решения ввиду его сложности, запишем окончательные выражения для z_2 , r_2 и $x_{2в}$ (индекс «2» при Δ_0 означает, что Δ_0 определено при значениях ρ_2 и $\mu'_{\text{пов}}$ на поверхности детали):

$$z_2 = 1,68 \rho_2 \frac{\pi D_2}{\Delta_0 h_2}; \quad (8-2)$$

$$r_2 = 1,37 \rho_2 \frac{\pi D_2}{\Delta_0 h_2}; \quad (8-3)$$

$$x_{2в} = 0,97 \rho_2 \frac{\pi D_2}{\Delta_0 h_2}. \quad (8-4)$$

Из этих выражений видно, что активное сопротивление участка ферромагнитной загрузки с учетом реального изменения μ' на 37% выше, чем сопротивление загрузки с постоянным по сечению $\mu' = \mu_{\text{пов}} = \text{const}$ (4-18). Следовательно, при одном и том же значении H_0 мощность, поглощаемая загрузкой, также будет выше. Реактивное сопротивление $x_{2\text{в}}$ и внутренняя реактивная мощность в загрузке меняются мало (см. (4-18) и (8-4)). Обратим также внимание на тот факт, что при $\mu' = \text{var}$ величины r_2 и $x_{2\text{в}}$ не равны друг другу, в отличие от случая $\mu' = \text{const}$, когда $|r_2| = |x_{2\text{в}}|$.

§ 3. ЭФФЕКТИВНАЯ ГЛУБИНА ПРОНИКНОВЕНИЯ (ГЛУБИНА АКТИВНОГО СЛОЯ)

Эффективную глубину проникновения тока в ферромагнитную загрузку при $\mu = \text{var}$ — переменная (обозначим ее ξ) можно определить, приравняв выражения для активного сопротивления при $\mu = \text{var}$ (8-3) и $\mu = \text{const}$:

$$r_2 = \rho_2 \frac{\pi D_2}{h_2 \xi} \quad (8-5)$$

$$\text{Таким образом } 1,37 \rho_2 \frac{\pi D_2}{\Delta_0 h_2} = \rho_2 \frac{\pi D_2}{h_2 \xi}, \quad (8-6)$$

$$\text{откуда } \xi = \Delta_0 / 1,37 = 366 \sqrt{\rho_2 / \mu_{\text{пов}}}. \quad (8-7)$$

Эту величину называют также глубиной активного слоя, понимая под этим величину, эквивалентную в физическом смысле глубине проникновения тока в изоэлектрическое тело (3-9). В частности, в пределах этого слоя ток считается равномерно распределенным, и на глубине, равной ξ , выделяется 86,5% всей электромагнитной энергии, проникающей в загрузку через ее поверхность.

Величина ξ используется вместо глубины проникновения тока при тепловых расчетах и при определении расчетного диаметра ферромагнитной загрузки:

$$D_2' = D_2 = \xi.$$

Введение понятия глубины активного слоя имеет также смысл при индукционном нагреве цилиндрических немагнитных тел, когда распределение плотности тока и напряженности магнитного поля перестают зависеть от частоты: при значениях относительного радиуса цилиндра $R_2 < 1,0$. Это означает, что распределение мощности по сечению также не зависит от частоты при дальнейшем ее понижении. В этих условиях понятие глубины проникновения в прежнем смысле теряет физический смысл. В этом случае ее функции при практических расчетах может с успехом выполнять величина ξ . При сильном проявлении поверхностного эффекта $\xi = \Delta_0$, а при низких частотах $\xi < \Delta_0$.

Расчеты показывают, что уже при $R_2 < 3,5$ можно приближенно считать

$$\xi = \xi_{\text{пред}} \approx 0,2 d_2. \quad (8-8)$$

Выражение (8-8) также свидетельствует о том, что при $\mu = \text{var}$ поверхностный эффект выражен ярче, чем при $\mu = \text{const}$.

Глубину проникновения электромагнитной волны x_1 при $\mu = \text{var}$ также определяют через Δ_0 :

$$x_1 = 1,457 \Delta_0. \quad (8-9)$$

Полное затухание волны происходит на расстоянии от поверхности $x_1 \rightarrow \infty$, однако, как показывают расчеты, уже на глубине, равной $x \approx 1,5 \Delta_0$, выделяется ~95% всей мощности, проникающей в загрузку. Следовательно, с точностью до 5% можно считать, что на глубине $x_1 \approx 1,5 \Delta_0$ выделяется вся мощность.

Контрольные вопросы

1. Что такое «горячая глубина проникновения»?
2. Поясните, чем различаются три стадии нагрева ферромагнитной загрузки?
3. Что такое «глубина активного слоя» и какова связь между ξ и Δ ?

ЧАСТЬ II

ИНДУКЦИОННЫЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

ГЛАВА 9

КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННЫХ КАНАЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

§ 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ДОСТОИНСТВА КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ

На рис. 3, а показана схема индукционной печи с открытым каналом. Именно такую конструкцию имели первые каналные электропечи. В дальнейшем были разработаны более совершенные электропечи этого вида, имеющие закрытый канал. Печи с закрытым плавильным каналом в подавляющем большинстве случаев используются и в настоящее время.

Устройство такой печи схематически дано на рис. 52. Основная масса расплавленного металла 7 располагается в ванне печи 5. Ванна сообщается с плавильным каналом 2, также заполненным расплавом. Расплав в канале и прилегающем участке ванны образует замкнутое проводящее кольцо. Внутрь этого кольца вставляется индуктор 4, навитый на стержень замкнутого магнитопровода 3. Система индуктор—магнитопровод называется п е ч н ы м т р а н с ф о р м а т о р о м.

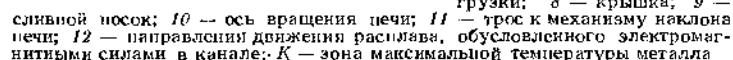
В канале с расплавом индуктируется ток и выделяется тепловая энергия, идущая на расплавление шихты, перегрев и выдержку расплава. Футеровка, образующая плавильный канал, называется п о д о в ы м к а м н е м 1.

Система, состоящая из печного трансформатора и подового камня с каналом, называется и н д у к ц и о н н о й е д и н и ц е й. Канальная электропечь часто имеет несколько индукционных единиц. В свою очередь каждая индукционная единица может содержать несколько плавильных каналов.

Индукционная каналная электропечь нормально работает лишь в непрерывном режиме, т. е. допускается только частичный слив расплавленного металла и догрузка соответствующего количества новой шихты. Это вызвано необходимостью постоянно иметь замкнутый путь с присмлемым электросопротивлением для тока, индуктируемого в каналах и прилегающей части расплава в ванне.

Минимальная емкость расплавленной загрузки в печи, обеспечивающая непрерывный режим работы, называется о с т а т о ч н о й м и н и м а л ь н о й м а с с о й з а г р у з к и. Максимальная емкость расплавленного металла, который одновременно

1) минимальный угар (окисление) и испарение металла, так как нагрев происходит снизу. К наиболее нагретой части расплава,

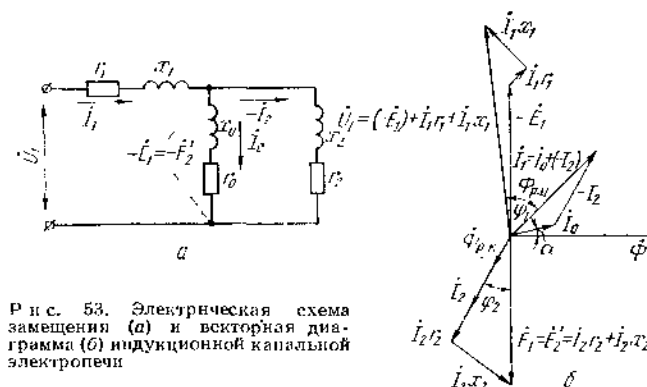


1 — подовый камень; 2 — плавильный канал; 3 — магнитопровод; 4 — индуктор; 5 — ваина печи; 6, 7 — уровни расплавленного металла соответственно, после и до слива полезной массы загрузки; 8 — крышка; 9 — трос к механизму наклона обдувающего электромагнитной температуры металла

3) однородность химического состава металла в ванне благодаря циркуляции расплава, обусловленной электродинамическими и тепловыми усилиями. Циркуляция способствует также ускорению процесса плавки.

3) шлак на поверхности ванны имеет низкую температуру. Это затрудняет проведение плавных металлургических операций между металлом и шлаком. По этой же причине, а также ввиду малой циркуляции расплава вблизи поверхности затруднено расплавление стружки и легкого скрапа.

По принципу действия индукционная капальная электропечь подобна силовому трансформатору. На рис. 53, а показана Т-образная электрическая схема замещения капальной электропечи.



Р и с. 53. Электрическая схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) индукционной капальной электропечи

В схеме приняты следующие обозначения: U_1 — подводимое к индуктору питающее напряжение; I_1 — сила тока в индукторе; r_1 — активное сопротивление индуктора; x_1 — индуктивное сопротивление индуктора, обусловленное магнитным потоком рассеяния $\Phi_{p, \text{н}}$, сцепленным лишь с витками индуктора (см. рис. 52); E_1 и $E_2' — \text{э. д. с. в индукторе и приведенная \text{э. д. с. в канале, наводимые полезным магнитным потоком } \Phi, \text{ сцепленным с индукто-}$

ром, и с каналом (см. рис. 52); I_0 — сила тока холостого хода печи (сила тока в индукторе при отсутствии в канале замкнутого кольца металла); I_2 — приведенная сила тока в канале электропечи; x_0 — индуктивная составляющая сопротивления намагничивающей цепи, обусловленная полезным магнитным потоком Φ ; r_0 — активная составляющая сопротивления намагничивающей цепи, обусловленная потерями энергии в магнитопроводе от гистерезиса и вихревых токов; x_2 — приведенное индуктивное сопротивление канала с металлом, обусловленное магнитным потоком рассеяния $\Phi_{р.к.}$, сцепленным лишь с каналом; r_2 — приведенное активное сопротивление канала с металлом.

Таким образом, электрическая схема замещения индукционной канальной электропечи подобна схеме замещения обычного трансформатора. В первом случае лишь отсутствует сопротивление вторичной обмотки, так как в печи она объединена с нагрузкой.

Однако электрические параметры канальной электропечи и обычного трансформатора заметно отличаются. Это вызвано различием в их конструкции. Как известно, в силовом трансформаторе для уменьшения вредных потоков рассеяния первичную и вторичную обмотки выполняют близкими по геометрическим размерам и располагают коаксиально с минимальным зазором одну от другой.

Естественно, что в электропечи, имеющей вторичную обмотку в виде кольца расплавленного металла, выполнить подобные требования невозможно. Плавильный канал имеет отличную от индуктора форму (обычно он значительно меньше по высоте) и находится от индуктора на относительно большом расстоянии, так как отделен от него не только электрической, но и тепловой изоляцией (воздушным зазором и футеровкой).

В связи с этим магнитные потоки рассеяния индуктора $\Phi_{р.н.}$ и канала $\Phi_{р.к.}$ значительно превышают потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток обычного силового трансформатора той же мощности, т. е. в электрической схеме замещения электропечи (см. рис. 53, а) велики значения реактивных сопротивлений x_1 и x_2 . А это, в свою очередь, приводит к тому, что энергетические показатели канальной электропечи (электрический к. п. д. и $\cos \varphi$) заметно ниже, чем у обычного трансформатора.

Кроме того, из-за повышенных магнитных потоков рассеяния для изготовления печного трансформатора требуется относительно большее количество активных материалов (трансформаторной стали и меди), чем для обычного силового трансформатора.

Действительно, как следует из рис. 52, бесполезные магнитные потоки рассеяния частично проходят по сердечнику магнитопровода, дополнительно загружая его. Для того чтобы магнитная индукция в сердечнике не превышала допустимой величины, приходится увеличивать его сечение. Соответственно увеличивается диаметр, а следовательно, и масса навиваемого на сердечник медного индуктора.

В обычном силовом трансформаторе при нормальном режиме работы благодаря весьма малому падению напряжения в обмотках справедливо соотношение

$$U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = K,$$

где U_1 и U_2 — первичное и вторичное напряжения;

ω_1 и ω_2 — число витков первичной и вторичной обмоток;

K — коэффициент трансформации.

Аналогичное соотношение в печном трансформаторе

$$U_1/E_2 \approx \omega_1/\omega_2 = \omega_1 = K$$

(где E_2 — э. д. с., наводимая в канале полезным потоком Φ), может рассматриваться лишь как приближенное, так как относительно велико индуктивное падение напряжения в индукторе.

Исходя из электрической схемы замещения (см. рис. 53, а), можно построить векторную диаграмму индукционной канальной электропечи (рис. 53, б).

Расположим горизонтально вектор полезного магнитного потока Φ . Вектор силы намагничивающего тока I_0 опережает по фазе вектор Φ на угол $\alpha = \arctg(r_0/x_0)$. Э. д. с. $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ отстает от потока Φ на угол 90° . Сила тока в канале I_2 отстает от \dot{E}_1 на угол $\varphi_2 = \arctg(x_2/r_2)$. Вектор $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ представляет собой геометрическую сумму векторов активного и индуктивного падений напряжения в канале.

Вектор силы тока в индукторе получается сложением силы намагничивающего тока I_0 и взятой с обратным знаком силы тока в канале $-I_2$. Положение вектора питающего напряжения U_1 определяется после сложения вектора $-\dot{E}_1$ с векторами активного и индуктивного падений напряжения в индукторе. Векторы потоков рассеяния индуктора $\Phi_{р.н.}$ и канала $\Phi_{р.к.}$ по фазе совпадают соответственно с векторами I_1 и I_2 .

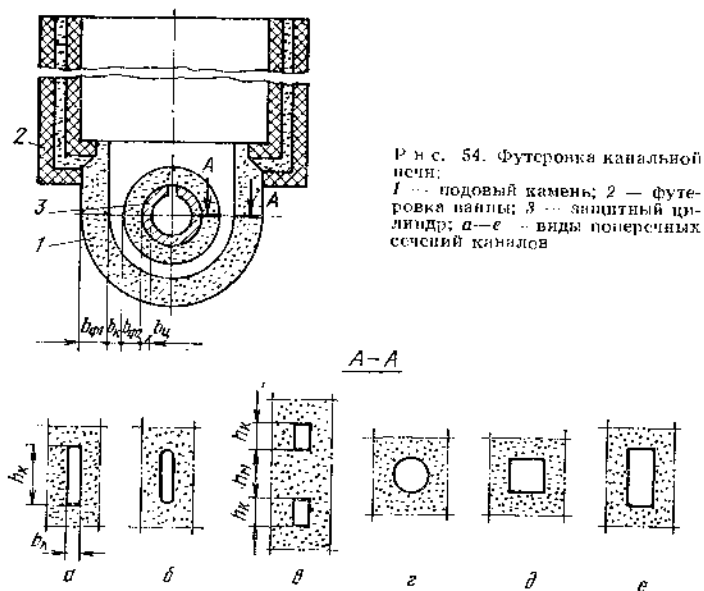
Таким образом, векторная диаграмма индукционной канальной электропечи аналогична векторной диаграмме силового трансформатора, работающего на активно-индуктивную нагрузку. Отличие состоит лишь в отсутствии треугольника внутренних падений напряжения во вторичной цепи и в относительно большей величине векторов $\Phi_{р.н.}$, $\Phi_{р.к.}$, $I_1 x_1$ и $I_2 x_2$.

§ 3. КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В настоящее время имеются канальные электропечи емкостью от десятков килограмм до ста и более тонн. Они предназначены для плавки и перегрева большого числа металлов и сплавов, имеющих разные свойства в расплавленном состоянии. Различны также технологические назначения канальных печей в общем

металлургическом цикле. Некоторые общие принципы проектирования отдельных элементов этих печей рассмотрены ниже.

Банна печи чаще всего имеет форму цилиндра круглого, иногда овального сечения с осью, располагаемой вертикально [шахтные печи (рис. 52)] либо горизонтально [барабанные печи (см. рис. 57)]. В отдельных случаях ванну выполняют прямоугольной. Футеровка канальной печи состоит из подового камня и футеровки ванны (рис. 54).



Подовый камень содержит плавильный канал, форма и размеры которого определяются в результате электрического расчета печи с учетом особенностей выплавляемого в печи металла.

Для канальной печи характерны тяжелые условия работы подового камня. Действительно, эта часть футеровки должна выдерживать гидростатическое давление всего столба металла в печи. Расплав в канале всегда нагрет до наибольшей температуры, так как именно здесь происходит выделение тепловой энергии. Обычно сложна и конфигурация футеровки, образующей плавильный канал. Вместе с тем эта футеровка не может иметь значительной толщины для получения приемлемых энергетических характеристик печи. Поэтому подовый камень обычно является наиболее сложным и ответственным элементом, от которого во многом зависит надежность работы печи в целом.

Наиболее благоприятной с точки зрения уменьшения магнитных потоков рассеяния является прямоугольная или овальная форма поперечного сечения канала с большей стороной, располагаемой параллельно оси индуктора (см. рис. 54, а и б). Для полу-

чения наибольшего электрического к. п. д. и $\cos \varphi$ ширина канала b_k выбирается в соответствии с неравенством: $b_k \leq (0,5 \div 0,7) \Delta_2$, где Δ_2 — глубина проникновения тока в расплав.

Высоту канала h_k желательно иметь близкой к высоте индуктора, так как при этом уменьшаются магнитные потоки рассеяния. Однако увеличение высоты канала снижает механическую прочность подового камня. Поэтому обычно h_k ограничивается величиной $h_k = (1,5 \div 4,0) b_k$.

Иногда для увеличения эффективной высоты «вторичной обмотки» печного трансформатора выполняют два (рис. 54, в) или даже три канала, окружающих один индуктор. В этом случае для сохранения достаточной прочности подового камня расстояние между каналами $h_{\text{к}}$ должно быть $h_{\text{к}} \leq h_{\text{м}}$.

Оптимальной с электротехнической точки зрения формой канала в продольном сечении (контур канала) является круговое кольцо, повторяющее форму индуктора и отстоящее от него на минимальное расстояние. Поэтому толщина футеровки между каналом и внутренним отверстием для индуктора $b_{\text{ф2}}$ выбирается минимально допустимой из условия ее механической прочности при данном гидростатическом давлении расплава. Обычно $b_{\text{ф2}} = (0,05 \div 0,13) \text{ м}$. Толщина наружной части футеровки канала $b_{\text{ф1}} > b_{\text{ф2}}$.

Иногда при выборе формы и размеров плавильных каналов приходится руководствоваться в основном не электротехническими, а технологическими соображениями. Например, в печах для плавки алюминия, а в отдельных случаях и цинка каналы подвержены зарастанию. Для относительного уменьшения зарастания и удобства чистки выбирают круглое, квадратное или прямоугольное поперечное сечения каналов (рис. 54, г, д и е) с шириной b_k , значительно превышающую рекомендуемую выражением, приведенным выше. Обычно в этих печах $b_k \geq 0,1 \text{ м}$ и $h_k \approx 2b_k$. С целью удобства чистки в продольном сечении каналы этих печей выполняются из прямолинейных участков, хотя это и увеличивает потоки рассеяния.

Футеровка плавильного канала должна отвечать следующим основным требованиям:

1) стойкость к значительным термическим напряжениям. Градиенты температуры по толщине внутренней стенки подового камня доходят до 200°С/см ; таким образом, близлежащие слои футеровки, имеющие сильно различающуюся температуру, в разной степени должны изменять свой объем, что и является причиной возникновения больших разрушающих усилий;

2) механическая прочность под действием гидростатического давления расплава;

3) стойкость против размывания при электродинамической циркуляции расплава в канале;

4) химическая стойкость при контакте с расплавляемым металлом и его окисью;

5) высокие электроизоляционные свойства при рабочих температурах. В противном случае в слоях футеровки, окружающих индуктор, наводятся ток и выделяется энергия, что ухудшает тепловой к. п. д. печи.

Подовый камень изготавливают одним из следующих методов: набивкой вне печи в запасной кожух или форму с последующей установкой на печь, и набивкой непосредственно в печи.

В последнее время получили распространение съемные индукционные единицы, позволяющие сократить до минимума или вообще исключить простой печи. В этом случае все стадии изготовления подового камня, вплоть до разогрева его до рабочей температуры, проходят вне печи. На установку и запуск такой индукционной единицы требуется 2—3 ч. Причем во время монтажа заменяемой единицы печь может продолжать работу на других единицах.

Для получения канала нужной формы применяют шаблоны: металлические, впоследствии расплавляемые в печи, или деревянные, выжигаемые заложенными в них нагревателями. При набивке подового камня для образования внутренней полости, в которую впоследствии вставляется сердечник с индуктором, устанавливают асбестовый или металлический цилиндр (см. рис. 54) толщиной b_n несколько миллиметров, имеющий в верхней части сквозную продольную прорезь. Этот цилиндр остается в печи и во время ее работы. Он способствует повышению прочности подового камня и предохраняет индуктор от попадания расплавленного металла в случае частичного повреждения футеровки канала.

Футеровка ванны иногда делается полностью набивной из той же массы, что и подовый камень. При этом используются шаблоны из металлических листов по форме ванны.

Часто применяют многослойную футеровку ванны, как показано на рис. 54. Между слоями внутреннего огнеупорного и наружного теплоизоляционного кирпичей располагается набивка, предохраняющая футеровку от разрушения в случае проникновения расплава в швы между огнеупорными кирпичами.

Печной трансформатор работает в тяжелых температурных условиях. Он нагревается не только за счет электрических потерь в меди и стали, как обычный трансформатор, но и за счет тепловых потерь через футеровку плавильного канала. Поэтому всегда применяется форсированное охлаждение печного трансформатора. Во внутреннюю полость подового камня, где располагается сердечник с индуктором, специальной вентиляторной установкой нагнетается охлаждающий воздух. Кроме того, часто используется водоохлаждение индуктора. Причем это не исключает необходимости одновременного воздушного охлаждения, иначе вследствие высокой температуры стенок внутренней полости подового камня произойдет повреждение электроизоляции индуктора.

Внешний вид однофазного стержневого печного трансформатора представлен на рис. 55. Основными элементами трансформатора являются магнитопровод и индуктор.

Магнитопровод печного трансформатора выполняют из электротехнической стали марок Э41, Э42, Э310 и др. Используют листы толщиной 0,35 и 0,5 мм. Для возможности быстрой и частой разборки трансформатора магнитопровод имеет одно или оба съемных

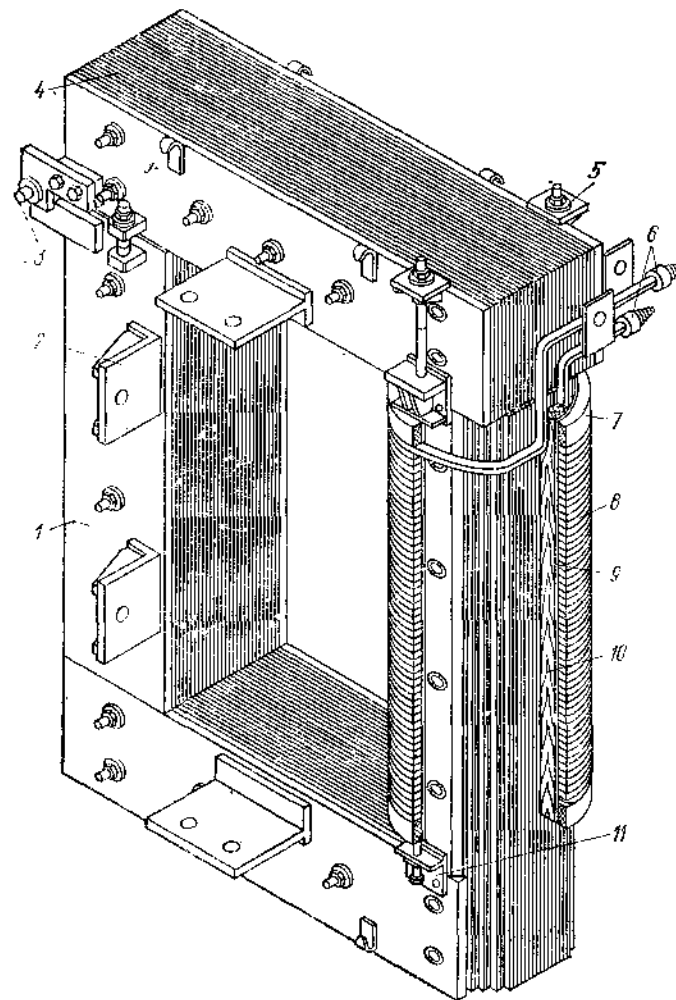


Рис. 55. Внешний вид печного трансформатора:

1 — магнитопровод; 2 — кронштейны для крепления трансформатора на каркасе подового камня; 3 — ось поворота ярма; 4 — ядро магнитопровода; 5 — узел для прижатия ярма к стержням; 6 — выводы индуктора; 7 — изоляционная прокладка; 8 — катушка индуктора; 9 — изолирующий цилиндр; 10 — изоляционный брус; 11 — узел для стяжки индуктора

прижимных ярма, хотя это и ухудшает к. п. д. в сравнении с перешитованным магнитопроводом. Для устранения нагрева в месте стыка прижимное ярмо отделяется от стержней изолирующими прокладками толщиной 0,25—0,5 мм из электрокартона или миканита.

На рис. 56, а показан применяемый способ стяжки листов трансформаторного железа, ярма и стержней. Пакет магнитопровода 1 сжимается накладками 2 из немагнитного металла с помощью стальных шпилек 3. Диаметр шпилек выбирается в пределах

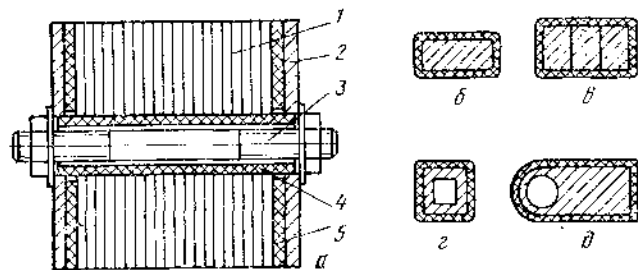


Рис. 56. Способ стяжки листов трансформаторной стали магнитопровода (а) и варианты сечений изолированного провода индуктора (б — стандартный обмоточный провод; в — составной обмоточный провод; г — трубка; д — неравностенная трубка, обращенная толстой стороной к каналу)

12—16 мм, а расстояние между ними обычно составляет 120—240 мм. Среднее давление сжатия листов должно быть не менее 0,30 МН/м². Допускаемое напряжение в шпильке до 90 МН/м². Шпильки изолируют от листов трансформаторной стали фибровыми, бакелитовыми или миканитовыми трубками 4, а накладки — листовым миканитом или асбестом 5.

Допустимая величина магнитной индукции B в магнитопроводе ввиду тяжелых условий работы принимается меньшей, чем в обычных силовых трансформаторах: $B \leq 1,3T$ для стали Э41 и Э42 и $B \leq 1,6T$ для стали Э310.

Полученный из электрического расчета диаметр индуктора определяет размеры располагаемого внутри него сердечника. Сердечник, несущий индуктор, обычно имеет ступенчатое сечение с целью увеличения его активной площади.

Индуктор представляет собой выполненную из медного проводника спиральную катушку. Как правило, катушка индуктора имеет круглое поперечное сечение. Однако в печах, имеющих прямоугольный контур плавильного канала, катушка индуктора может повторять его форму.

Для изготовления индуктора применяют либо обычные обмоточные провода прямоугольного сечения, как для силовых трансформаторов (обычно печи малой мощности (рис. 56, б и в) 1, либо при водяном охлаждении медную трубку (рис. 56, г и д).

Индуктор изолируют киперной, асбестовой лентой или лентой из стекловолокна. Межвитковое напряжение в печном трансформаторе составляет 6—7 В на малых печах и 12—20 В на больших. Между индуктором и сердечником расположен изолирующий цилиндр толщиной 5—10 мм из бакелита или стеклотекстолита. Цилиндр фиксируют на сердечнике при помощи забиваемых деревянных клиньев.

В случае, когда печь не питается от специального регулируемого силового трансформатора, от нескольких крайних витков индуктора делаются отпайки. Подавая питающее напряжение на различные отпайки, можно менять коэффициент трансформации печного трансформатора и тем самым управлять величиной, выделяемой в канале мощности.

Необходимость в этом возникает по следующим причинам:

1) в процессе эксплуатации печи обычно происходит постепенное изменение поперечного сечения плавильных каналов (уменьшение вследствие их зарастания или, наоборот, увеличение из-за разбедания или размывания футеровки). Соответственно изменяется и электрическое сопротивление кольца металла в каналах. Для поддержания заданных режимов работы в различные периоды эксплуатации необходимо компенсировать эти изменения соответствующей корректировкой коэффициента трансформации;

2) первые плавки после запуска печи для сушки и постепенного установления температурного режима футеровки следует вести при пониженной мощности в плавильных каналах, что можно осуществить работой при больших коэффициентах трансформации печного трансформатора.

В большинстве случаев разливка металла из печи осуществляется с помощью механизма наклона. Сливной носок (или летка) располагается на боковой поверхности ванны. В барабанных печах сливной носок часто находится в торцевой части ванны. Ось наклона печи, как правило, помещается вблизи сливного носка. Благодаря этому упрощается разливка, так как в процессе наклона печи не изменяется положение струи металла. Ось сливного носка может быть перпендикулярна или параллельна оси наклона.

Часто используется цевочный механизм наклона. На каркасе печи жестко закрепляют сварной обод с расположенными по его окружности цевами — стальными стержнями диаметром 40—60 мм. Цевы находятся в зацеплении со звездочкой, приводимой во вращение двигателем через редуктор.

Получил распространение также цепной привод. Для печей большой емкости часто применяют механизм с зубчатым зацеплением или же гидравлический. В последнем случае с двух сторон печи располагают два цилиндра с плунжерами. Нижний конец каждого цилиндра установлен на шарнирной опоре под печью, а верхний конец штока плунжера также шарнирно связан с цепью, закрепленной на каркасе печи.

На рис. 57 показана типовая конструкция индукционной канальной печи для плавки меди. Полезная емкость печи (без канальной части) 16 т, производительность 5,8 т/ч, установленная мощность 2400 кВт·А.

Печь состоит из ванны 1 барабанного типа. Торцовые стенки кожуха ванны для удобства демонтажа и футеровки печи сделаны съемными и крепятся на болтах. На торцовых стенках барабана

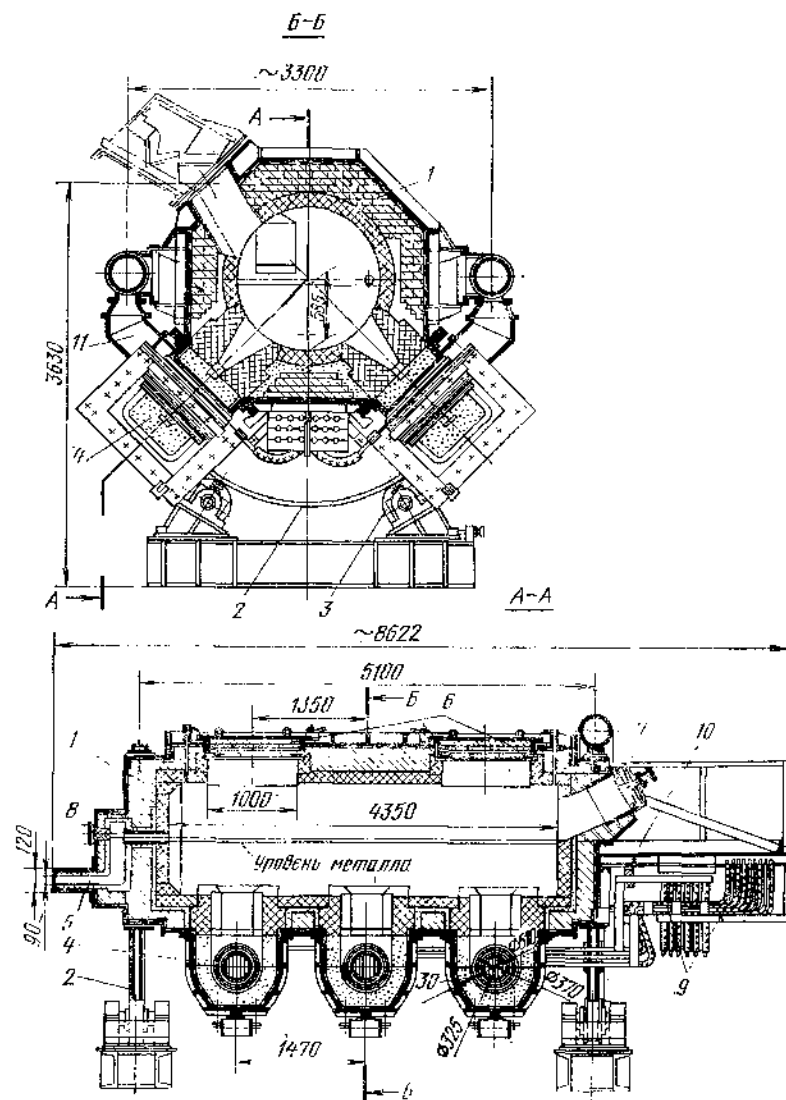


Рис. 57. Индукционная канальная печь для плавки меди

закреплены ободы 2. Печь установлена этими ободами на вращающихся ролики опор 3. Поворот печи осуществляется с помощью электромеханического привода с зубчатым механизмом наклона. Печь снабжена шестью съемными однофазными индукционными единицами 4. Установленная мощность каждой единицы 400 кВт·А.

Слив металла из печи осуществляется через летку 5 L-образной формы. Этим уменьшается вероятность попадания шлака в сливаемый металл. Выходное отверстие летки располагается на оси поворота печи.

Наклон печи используется для слива металла, а также для смены вышедшей из строя индукционной единицы. В последнем случае печь поворачивается на угол около 45° таким образом, чтобы канал поврежденной единицы освободился от расплава. Во время смены печь продолжает работать на трех единицах, заполненных металлом. Печь может работать как в периодическом, так и полунепрерывном режимах. В последнем случае для слива металла не наклоняют печь, а подбирают такой уровень расплава, чтобы при догрузке новых партий шихты лишний металл естественно сливался через летку.

Загрузка шихты осуществляется через крышки 6, снабженные рычажными механизмами подъема и поворота. Крышки 7 и 8 предназначены соответственно для загрузки флюса и сема шлака.

Токоподвод и подвод охлаждающей воды осуществлен гибкими кабелями и шлангами 9, свободная длина которых должна обеспечивать полный наклон печи в обе стороны. В качестве токоподводов к индукционным печам часто используются также гибкие водоохлаждаемые кабели.

С каркасом печи жестко соединены подвижные участки 10 рабочей площадки, используемые для обслуживания печи.

В комплекте печи имеется стационарная вентиляционная установка с поворотным уплотнением, ось которого совпадает с осью наклона печи. Разводка охлаждающего воздуха по шести индукционным единицам выполнена воздухопроводами 11.

Печь, показанная на рис. 57, с небольшими конструктивными изменениями может использоваться также для плавки сплавов на медной основе.

На основе индукционных канальных печей часто создаются автоматизированные плавильно-раздаточные агрегаты, обеспечивающие высокопроизводительные процессы получения слитков (круглых, квадратных и плоских) и фасонного литья из меди и ее сплавов.

В состав агрегата обычно входят одна или две плавильные канальные печи, канальный миксер, обогреваемый нагревателями сопротивления желоб для перелива металла из печи в миксер и литейная машина. В некоторых случаях непосредственно после кристаллизатора литейной машины еще не остывшие слитки поступают на прокатный стан для получения катанки или проволоки.

Индукционные канальные печи широко используют для плавки цветных металлов (меди и ее сплавов, алюминия, цинка и др.), а также чугуна, обеспечивая при этом хорошее качество получаемого металла и высокие экономические показатели процесса плавки.

Контрольные вопросы

1. В чем различие между индукционными канальными печами с открытым и закрытым каналом?
2. Поясните, чем отличается схема замещения НКП от схемы замещения трансформатора?
3. Почему в канальных печах нельзя полностью сливать металл из печи?

ГЛАВА 10

РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ КАНАЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

§ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПЕЧИ

Электрический расчет канальной печи выполняется подобно расчету силового трансформатора, но с учетом основных отличий между ними, рассмотренных в гл. 9.

При расчете задаются рядом известных из практики электрических параметров канальных печей для плавки того же металла, для которого предназначается проектируемая печь. В связи с этим приходится использовать метод последовательных приближений, однако число необходимых корректировок первоначального расчета обычно не превышает одной-двух.

Для расчета печи обычно задают следующие данные:

а) расплавляемый металл, температура его разливки T_p , энтальпия металла при температуре разливки c_p , удельное электро-сопротивление при температуре разливки ρ_2 ;

б) производительность печи g , длительность плавки $\tau_{пл}$ и вспомогательных операций (загрузки, выгрузки и др.) $\tau_{всп}$; либо рабочая (сливаемая) емкость печи G и длительность плавки $\tau_{пл}$;

в) питающее напряжение U ; частота тока f .

Последовательность расчета

1. Определение активной мощности печи.

Если заданы величины g , $\tau_{пл}$ и $\tau_{всп}$, то активная мощность, Вт,

$$P_a = \frac{gc_p}{\eta} \frac{\tau_{пл} + \tau_{всп}}{\tau_{пл}}, \quad (10-1)$$

где η — общий к. п. д. печи — берется для каждого выплавляемого металла по известным из практики данным (см. П-3); $(\tau_{пл} + \tau_{всп})/\tau_{пл}$ — отношение, которое учитывает увеличение потребной мощности за счет того, что нагрев осуществляется не все время цикла $\tau_{пл} + \tau_{всп}$, а лишь часть его $\tau_{пл}$.

Если заданы величины G и $\tau_{пл}$, то

$$P_a = \frac{Gc_p}{\tau_{пл}\eta}. \quad (10-2)$$

2. Полная мощность, подводимая к индуктору, В·А:

$$P_1 = U_1 I_1 \approx E_1 I_1, \quad (10-3)$$

где P_1 — принятая мощность индукционной единицы;
 U_1 , E_1 и I_1 — соответственно напряжение, э. д. с. и сила тока индуктора.

Запишем выражения для э. д. с. (В) и силы тока (А) индуктора:

$$E_1 = 4,44f\omega_1\Phi = 4,44f\omega_1 BS_c; \quad (10-4)$$

$$I_1 = \delta_1 s_1, \quad (10-5)$$

где ω_1 — число витков индуктора;

Φ — магнитный поток в сердечнике, Вб;

B — магнитная индукция в сердечнике, Вб/м²;

δ_1 — плотность тока в индукторе, А/м²;

S_c — поперечное сечение сердечника, м²;

s_1 — поперечное сечение проводника индуктора, м².

Подставив значения E_1 и I_1 из уравнения (10-4) и (10-5) в выражение (10-3), получаем P_1 , В·А

$$P_1 = 4,44f\omega_1 B\delta_1 S_c s_1. \quad (10-6)$$

3. Важной характеристикой любого трансформатора является соотношение масс заложенных в нем активных электротехнических материалов: трансформаторной стали магнитопровода и меди обмоток. От этого соотношения зависит величина общих потерь энергии в трансформаторе заданной мощности и массы. При возрастании массы магнитопровода, например, за счет увеличения сечения сердечника, при неизменном магнитном потоке Φ уменьшается индукция B , а следовательно, сокращаются потери энергии в магнитопроводе. Однако при этом увеличивается диаметр надетых на сердечник катушек с обмотками. Для сохранения же прежней общей массы трансформатора придется сократить сечение провода обмоток. При неизменной заданной силе тока в обмотках произойдет увеличение потерь в меди. Обратная картина будет в случае возрастания массы меди за счет увеличения сечения обмоток и соответствующего уменьшения сечения сердечника.

Установлено, что общие электрические потери в трансформаторе заданной мощности и заданной массы будут минимальными, если потери в стали равны потерям в меди. Поэтому для каждой конструкции трансформатора имеется оптимальное соотношение масс, примененных в нем стали и меди. Это положение мы и используем для расчета оптимального сечения сердечника печного трансформатора.

Отношение массы стали магнитопровода G_c к массе меди индуктора G_m в печном трансформаторе можно записать следующим образом:

$$\Psi = \frac{G_c}{G_m} = \frac{S_c l_c \rho_c}{s_1 \omega_1 l_m \rho_m}, \quad (10-7)$$

где l_c — общая длина магнитопровода (всех стержней и ярем), м;

l_m — длина одного витка индуктора, м;

$\rho_c = 7,7 \cdot 10^3$ и $\rho_m = 8,9 \cdot 10^3$ — плотность стали и меди, кг/м^3 .

Подставим в уравнение (10-7) значения ρ_c и ρ_m и выразим величину s_1 , м^2 :

$$s_1 = \frac{0,865 S_c l_c}{\omega_1 \Psi l_m}. \quad (10-8)$$

Подставив значение s_1 в уравнение (10-6), получим P_1 , Вт·А:

$$P_1 = 3,8 f B \delta_1 \frac{S_c l_c}{\Psi l_m}. \quad (10-9)$$

$$\text{Отсюда } S_c = 0,51 \sqrt{P_1 \Psi / f B \delta_1} \sqrt{l_m / l_c}. \quad (10-10)$$

Обозначив $c_m = 0,51 \sqrt{l_m / l_c}$, получим окончательное выражение для сечения сердечника, м^2 :

$$S_c = c_m \sqrt{P_1 \Psi / f B \delta_1}. \quad (10-11)$$

Величина c_m зависит от типа печного трансформатора: для стержневого однофазного магнитопровода принимают $c_m = 0,27 \div 0,30$, для стержневого трехфазного $c_m = 0,18$; для броневого однофазного $c_m = 0,34$.

Значение полной мощности индукционной единицы P_1 определяют из выражения:

$$P_1 = P_{\text{н}} / \cos \varphi. \quad (10-12)$$

При этом величиной $\cos \varphi$ приходится задаваться, исходя из средних статистических данных для современных канальных печей аналогичной конструкции (см. табл. П-3).

Значение Ψ , как отмечалось, выбирается исходя из минимума общих потерь в трансформаторе заданной массы, но также и с учетом его стоимости. При водяном охлаждении индуктора принимают $\Psi = 25 \div 30$ для печей, плавящих медь, алюминий и цинк, и $\Psi \approx 80$ для печей, плавящих чугун.

Плотность тока в индукторе δ_1 при воздушном охлаждении не должна превышать 4 МА/м^2 , а при водяном 20 МА/м^2 .

4. Сечение сердечника с учетом межлистовой изоляции:

$$S_c' = S_c / k_c. \quad (10-13)$$

Коэффициент заполнения k_c определяется по приведенным ниже данным:

Толщина стального листа, мм	0,35	0,50
Коэффициент заполнения k_c при изоляции из:		
бумаги толщиной 0,03 мм	0,85	0,88
лака толщиной 0,01 мм	0,90	0,92

Плавильные каналы в большинстве случаев имеют круговое продольное сечение. Соответственно для уменьшения рассеяния магнитного потока круглое сечение имеет также катушка индуктора. Поэтому для того, чтобы сократить длину индуктора, целесообразно приблизить форму сечения сердечника к кругу, т. е. выполнять его ступенчатым (см. рис. 55).

Диаметр окружности, описанной вокруг сердечника, м:

$$d_c = \sqrt{4 S_c' / \pi k_d}, \quad (10-14)$$

где k_d — коэффициент заполнения материалом сердечника окружности, описанной вокруг него.

При числе ступеней, равном 2, 3 и 4, k_d равен соответственно 0,78; 0,81 и 0,83. Чем выше мощность трансформатора, тем большим выбирается число ступеней сердечника.

Расчет индуктора

1. Учитывая, что $U_1 \approx E_1$, из выражения (10-4) определяем число витков индуктора:

$$\omega_1 = U_1 / 4,44 f B S_c. \quad (10-15)$$

Сила тока в индукторе, А:

$$I_1 = P_1 / U_1. \quad (10-16)$$

Глубина проникновения тока в материал индуктора:

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\rho_1 / f},$$

где ρ_1 — удельное электросопротивление материала индуктора (меди), Ом·м.

2. Сечение провода индуктора, м^2 :

$$s_1 = I_1 / \delta_1. \quad (10-17)$$

На рис. 58 дан эскиз индуктора.

Радиальный размер провода индуктора b_1 , или толщину стенки медной трубки, обращенную к каналу, желательно иметь равной, или несколько большей, чем $1,57 \Delta_1$ — для обеспечения минимума

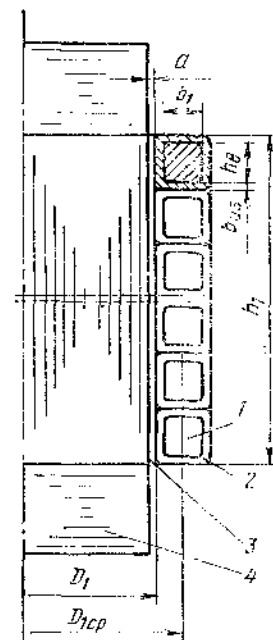


Рис. 58. Эскиз индуктора: 1 — индуктор; 2 — изоляция индуктора; 3 — изолирующий цилиндр; 4 — сердечник

электрических потерь в индукторе. В печах малой мощности допускается применение тонкостенной трубки постоянной толщины (как показано на рис. 58; радиальный размер трубки b_1 , однако, должен быть равен или превышать $1,57\Lambda_1$).

Высота индуктора, м:

$$h_1 = (h_s + 2b_{вз}) \omega_1. \quad (10-18)$$

Толщина изоляции между витками $2b_{из}$ составляет $(0,1-0,2) \cdot 10^{-2}$ м.

Внутренний диаметр индуктора (по меди), м:

$$D_1 = d_c + 2a + 2b_{вз}, \quad (10-19)$$

где a — толщина изолирующего цилиндра, $a = (0,5 \div 1,0) \cdot 10^{-2}$.

Средний диаметр индуктора, м:

$$D_{1cp} = D_1 + 2b_1. \quad (10-20)$$

3. Активное сопротивление индуктора определяется по формуле

$$r_1 = 1,15 \rho_1 \omega_1 \pi D_{1cp} / s_1, \quad (10-21)$$

где 1,15 — средний коэффициент, учитывающий неравномерное распределение тока по сечению индуктирующего провода s_1 .

4. Электрические потери в индукторе, Вт:

$$P_{э.п} = I_1^2 r_1. \quad (10-22)$$

5. Масса меди индуктора, кг:

$$G_m = s_1 \omega_1 \pi D_{1cp} \rho_m. \quad (10-23)$$

Из уравнения (10-7) определяем массу стали магнитопровода, кг:

$$G_c = \Psi G_m. \quad (10-24)$$

6. Электрические потери в стали магнитопровода (Вт) пропорциональны его массе и квадрату магнитной индукции B

$$P_c = p_c G_c. \quad (10-25)$$

где p_c — удельные потери в стали при индукции B (см. рис. 44), Вт/кг.

7. Полные электрические потери в меди и стали индукционной единицы

$$P_{э.п} = P_{э.п} + P_c. \quad (10-26)$$

Расчет канала

1. Сила тока в канале, А

$$I_2 \approx I_1 \omega_1. \quad (10-27)$$

Глубина проникновения тока в канале, м:

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\rho_2 / f},$$

где ρ_2 — удельное электросопротивление расплавленного металла в канале, Ом.

Сечение канала, м²:

$$S_2 = I_2 / \delta_2. \quad (10-28)$$

Плотностью тока в канале δ_2 задаются (см. табл. П-3).

2. Активная мощность, выделяемая в канале, Вт:

$$P_2 = P_n - P_{э.п}. \quad (10-29)$$

Длину канала определяем из условия выделения в нем расчетной активной мощности P_2 , Вт:

$$P_2 = I_2^2 r_2. \quad (10-30)$$

3. Из уравнения (10-30) находим активное сопротивление канала r_2 , которое в свою очередь можно записать в виде:

$$r_2 = \rho_2 l_2 K_{п.з} / S_2, \quad (10-31)$$

где l_2 — активная длина канала, м;

ρ_2 — удельное сопротивление жидкого металла, Ом·м;

$K_{п.з}$ — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение переменного тока по сечению канала.

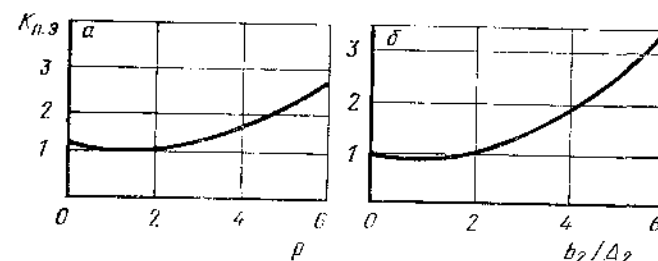


Рис. 59. Графики для определения поправочного коэффициента

Коэффициент $K_{п.з}$ зависит от размеров сечения канала, от частоты тока и удельного сопротивления металла. Для каналов круглого, овального и прямоугольного сечений с отношением сторон не более 3 : 1 $K_{п.з}$ определяют из графика рис. 59, а по аргументу

$$\rho = \sqrt{8\pi f S_2 / 10^{11} \rho_2}. \quad (10-32)$$

Для каналов овального или прямоугольного сечений с отношением сторон более 3 : 1 $K_{п.з}$ определяют из графика рис. 59, б по аргументу

$$b_2 / \Delta_2 = 2 \cdot 10^{-5} b_2 \sqrt{f / \rho_2}, \quad (10-33)$$

где b_2 — ширина канала, м.

Пользуясь уравнением (10-31), определяем активную длину канала, м

$$l_2 = r_2 S_2 / \rho_2 K_{\text{н.з.}} \quad (10-34)$$

После определения l_2 вычерчивается эскиз индукционной единицы, выбираются конструкция печи и ее основные геометрические размеры. Если полученная из чертежа величина $s_m = 0,51 \sqrt{I_m / I_c}$ значительно отличается от ранее принятой, то следует повторить расчет, задавшись полученным значением s_m . При выполнении эскиза индукционной единицы может обнаружиться несоответствие между длиной витка индуктора и расчетной длиной канала.

4. Для получения хороших энергетических характеристик индукционной единицы и одновременно обеспечения ее надежной работы толщина футеровки между индуктором и каналом должна составлять при плавке медных сплавов и цинка 65—70 мм, при плавке алюминия 70—120 мм. Если по расчету канал получается настолько коротким, что не позволяет разместить футеровку пужной толщины, то можно его удлинить за счет более протяженных устьев большего сечения, чем активная часть канала. В таких устьях будет выделяться сравнительно небольшая мощность, что позволит сохранить общую мощность единицы близкой к расчетной. Если, наоборот, расчетная длина канала слишком велика, то для уменьшения расстояния между индуктором и каналом можно увеличить сечение сердечника и соответственно диаметр индуктора.

В случае, когда расчетная длина канала значительно превосходит возможную для размещения, приходится ее искусственно сокращать. При этом для сохранения расчетной мощности в канале увеличивают силу тока в нем путем увеличения числа витков индуктора [см. (10-27)]. Одновременно приходится пропорционально возрастанию числа витков увеличивать сечение канала — для сохранения заданной плотности тока в канале. С учетом этого из выражений (10-27), (10-30) и (10-31) следует, что для компенсации уменьшения длины канала требуется пропорциональное увеличение числа витков индуктора:

$$\omega'_1 = \omega_1 l_2 / l_1 \quad (10-35)$$

где l_1 и l_2 — расчетная и принятая укороченная длина канала; ω_1 и ω'_1 — расчетное и принятое увеличенное число витков индуктора.

После корректировки параметров печного трансформатора, вызванной необходимостью размещения слишком длинного плавильного канала, следует скорректировать или даже повторить первоначальный расчет, используя полученные величины. При этом обычно приходится мириться с тем, что отношение массы стали к массе меди Ψ будет отличаться от оптимального рекомендуемого значения.

Расчет индуктивного сопротивления индукционной единицы
Расчетный эскиз системы индуктор — канал показан на рис. 60. Индуктивное сопротивление этой системы, приведенное к первичной обмотке (индуктору), рассчитывается по следующей полуэмпирической формуле:

$$x = \frac{8 f \omega_1^2 S_s K_R K_S}{h_1} 10^{-6} \quad (10-36)$$

Рассмотрим подробнее структуру этой формулы. Как и всякое индуктивное сопротивление, x пропорционально частоте тока f и зависит от геометрических параметров системы. Индуктор, к которому приводится сопротивление системы, представляет собой соленоид. Как известно, индуктивность соленоида пропорциональна квадрату числа его витков ω_1^2 и обратно пропорциональна его высоте h_1 .

Конечная длина системы учитывается коэффициентом Роговского:

$$K_R = 1 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{\pi h_1} \quad (10-37)$$

Индуктивное сопротивление системы возрастает с уменьшением отношения ее поперечного размера $b_1 + b_2 + b_3$ к ее длине h_1 . Индуктивность системы тем больше, чем больше поток рассеяния (см. рис. 52). Последний в свою очередь растет с увеличением площади пространства между индуктором и каналом. Поэтому в числителе формулы (10-36) имеется член S_s , представляющий собой «площадь рассеяния». Эта площадь расположена между ограничивающими ее штриховыми линиями на рис. 60. Как видно из рис. 60, в площадь рассеяния входят также обращенные друг к другу участки индуктора и канала шириной соответственно $b_1/3$ и $b_2/3$. Этим учитывается поток рассеяния, проходящий внутри проводников.

В случае, когда ширина индуктора b_1 или канала b_2 соответственно больше глубины проникновения тока в индуктор Δ_1 и в расплавляемый металл Δ_2 , при расчете S_s вместо $b_1/3$ и $b_2/3$ берется соответственно $\Delta_1/3$ и $\Delta_2/3$. Если контуры индуктора и канала близки к окружностям, то S_s определяется из выражения

$$S_s = \pi D_{\text{ср}} b_s \quad (10-38)$$

где b_s — ширина площади рассеяния, м; $b_s = b_1/3 + b_2/3 + b_3$; $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр кольцевой площади рассеяния, м.

Наконец, поток рассеяния увеличивается с увеличением отношения высот индуктора и канала. Это учитывается в формуле

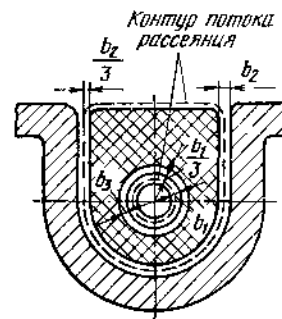


Рис. 60. Эскиз к расчету индуктивного сопротивления системы индуктор—канал

(10-36) коэффициентом K_S . Для печей с одним каналом на каждый сердечник экспериментально найдено:

$$K_S = 1 + \frac{\alpha_1}{3,5} \left(1 + \frac{\pi h_1}{b_s} \cdot \frac{1}{3} \alpha_1 \right). \quad (10-39)$$

для печей с двумя каналами на каждый сердечник:

$$K_S = 1 + \frac{\alpha_2}{4,5} \left(1 + \frac{\pi h_1}{b_s} \cdot \frac{1}{4} \alpha_2 \right), \quad (10-40)$$

где $\alpha_1 = (h_1 - h_2)/h_1$; $\alpha_2 = (h_1 - 2h_2)/h_1$.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧИ

Естественный коэффициент мощности печи

$$\cos \varphi = r/z. \quad (10-41)$$

Активное сопротивление индукционной единицы, Ом:

$$r = r_1 + r'_2, \quad (10-42)$$

где r'_2 — активное сопротивление канала, приведенное к индуктору, Ом,

$$r'_2 = r_2 \omega_2^2. \quad (10-43)$$

Полное сопротивление индукционной единицы, Ом:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}. \quad (10-44)$$

Если получившийся из выражения (10-41) $\cos \varphi$ близок к принятому в начале расчета, то расчет можно считать правильным. В противном случае либо приходится вносить в расчет коррективы (при незначительном несовпадении), либо полностью повторить его, приняв в начале расчета получившееся значение $\cos \varphi$.

Электрический к. п. д. печи

$$\eta_z = P_z / (P_z + P_{\Sigma.п}). \quad (10-45)$$

После расчета окончательно определяется геометрия индукционных единиц, уточняются электрические параметры и вычерчивается общий вид печи.

Тепловой к. п. д. печи находится по результатам расчета тепловых потерь через футеровку печи. Этот расчет аналогичен тепловому расчету в тигельных печах и поэтому здесь не рассматривается.

Контрольные вопросы

1. На действующей канальной электропечи необходимо увеличить потребляемую мощность. Какими изменениями в конструкции индукционных единиц можно этого добиться?

2. Канальная печь, использовавшаяся для плавки меди, переведена на плавку лагуни. Как при этом изменяется электрический к. п. д. и $\cos \varphi$ электропечи?

ГЛАВА 11

КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

§ 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ДОСТОИНСТВА ТИГЕЛЬНЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Принцип действия индукционных тигельных печей (ИТП), которые также называют индукционными печами без сердечника, был описан в гл. 1, схематическое изображение печи показано на рис. 3, б. Печь представляет собой плавильный тигель, как правило, цилиндрической формы, выполненный из огнеупорного материала и помещенный в полость индуктора, подключенного к источнику переменного тока. Металлическая шихта (материал, подлежащий плавлению) загружается в тигель и, поглощая электромагнитную энергию, плавится.

Достоинства тигельных плавильных печей:

а) выделение энергии непосредственно в загрузке, без промежуточных нагревательных элементов;

б) интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в тигле, обеспечивающая быстрое плавление мелкой шихты и отходов, быстрое выравнивание температуры по объему ванны и отсутствие местных перегревов, и гарантирующая получение многокомпонентных сплавов, однородных по химическому составу;

в) принципиальная возможность создания в печи любой атмосферы (окислительной, восстановительной, нейтральной) при любом давлении (вакуумные или компрессионные печи, см. гл. 13);

г) высокая производительность, достигаемая благодаря высоким значениям удельной мощности (особенно на средних частотах);

д) возможность полного слива металла из тигля и относительно малая масса футеровки печи, что создает условия для снижения тепловой инерции печи благодаря уменьшению тепла, аккумулированного футеровкой. Печи этого типа весьма удобны для периодической работы с перерывами между плавками и обеспечивают возможность для быстрого перехода с одной марки сплава на другую;

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

ж) высокая гигиеничность процесса плавки и малое загрязнение воздушного бассейна.

К недостаткам тигельных печей следует отнести: относительно низкую температуру шлаков, наводимых на зеркало расплава с целью его технологической обработки (шлак в ИТП разогревается от металла, поэтому его температура всегда ниже), а также сравнительно низкая стойкость футеровки при высоких рабочих температурах расплава и при наличии теплосмен (резких колебаний температуры футеровки при полном сливе металла).

Однако преимущества тигельных печей перед другими плавильными агрегатами настолько значительны, что они нашли в последние годы чрезвычайно широкое применение в самых разных отраслях промышленности.

В зависимости от того, идет ли процесс плавки на открытом воздухе или в вакууме (в защитной атмосфере), различают печи: открытые (плавка на воздухе), вакуумные (плавка в вакууме), компрессионные (плавка под избыточным давлением). По организации процесса во времени различают печи: периодического действия, полупрерывного действия, непрерывного действия.

По конструкции плавильного тигля различают печи: с керамическим (футерованным) тиглем, с проводящим металлическим тиглем, с проводящим графитовым или графитошамотным тиглем, с холодным тиглем (водоохлаждаемым металлическим тиглем, см. гл. 14).

§ 2. КОНСТРУКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧИ

Индукционные тигельные печи имеют в общем случае следующие основные узлы: индуктор, каркас (или кожух) печи, магнитопроводы или электромагнитные экраны, плавильный тигель, крышку и подину, механизм наклона печи.

Рассмотрим конструктивные особенности упомянутых элементов печи.

Индуктор

Индуктор является основным элементом печи, предназначенным для создания электромагнитного поля, индуцирующего ток в загрузке. Кроме своего основного назначения, он должен выполнять также функцию важного конструктивного элемента, воспринимающего механическую и тепловую нагрузку со стороны плавильного тигля и во многом определяющего надежность работы печи в целом.

Как мы выяснили ранее (см. гл. 5), на индуктор действуют значительные радиальные электродинамические усилия: витки индуктора подвержены вибрациям (особенно значительным в печах промышленной частоты), которые могут приводить к разрушению изоляции индуктора; расширяющаяся в процессе нагрева футеровка тигля создает значительные осевые усилия, стремящиеся сместить витки индуктора в осевом направлении; наконец, механические изгибающие усилия, возникающие при наклоне печи, могут также привести к деформации витков индуктора. Поэтому вопросу обеспечения достаточной жесткости индуктора уделяется самое серьезное внимание.

Кроме этого, охлаждение индуктора должно обеспечивать отвод тепла, вызываемого электрическими потерями, а электрическая изоляция витков индуктора должна исключать возможность электрического пробоя, приводящего к прожогу трубки индуктора и к возникновению аварийной ситуации.

Таким образом, индуктор тигельной плавильной печи должен обеспечивать: минимальные электрические потери, требуемый расход охлаждающей воды, необходимую механическую прочность и достаточную жесткость, надежную электроизоляцию витков.

Указанные требования удовлетворяются в реальных конструкциях ИТП следующим образом.

Обычно индуктор тигельной печи представляет собой цилиндрическую однослойную катушку (соленоид), витки которой уложены в виде спирали (спиральный индуктор) с постоянным углом

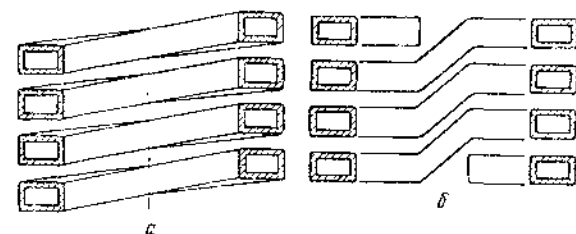


Рис. 61. Индукторы со спиральной навивкой (а) и с транспозицией витков (б)

наклона витков, определяемым шагом навивки (рис. 61, а), или катушку, все витки которой располагаются в горизонтальных плоскостях, а переходы между соседними витками осуществляются короткими наклонными участками, такой индуктор обычно называют индуктором с транспозицией витков (рис. 61, б).

Достоинством первой конструкции является простота навивки (такой индуктор навивают на барабан, укладывая виток к витку), однако торцовые плоскости индуктора при этом не горизонтальны, что затрудняет осевую стяжку индуктора. Изготовление индуктора с транспозицией сложнее, так как требуются специальные приспособления для выполнения транспозиции, однако торцы индуктора при этом оказываются лежащими в горизонтальных плоскостях, что облегчает стяжку витков индуктора с помощью торцовых плит, нажимных колец и т. п.

Ввиду больших токовых нагрузок индуктор ИТП практически всегда выполняют с водяным охлаждением.

Для обеспечения минимальных электрических потерь в индукторе, как было показано в гл. 4, необходимо соблюдение следующих условий: а) материал индуктора должен обладать малым удельным электросопротивлением; б) он должен быть немагнитным; в) толщина индуцирующего витка $b_{тр}$, обращенная к расплаву, должна быть $b_{тр} \geq 1,57\lambda$. Эти условия могут быть удовлетворены, если индуктор выполнять из медной полый трубки круглого (рис. 62, а), прямоугольного равностенного (рис. 62, б), прямоугольного разностенного (рис. 62, в) или специального (рис. 62, г) сечений.

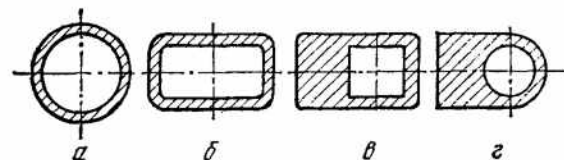
При этом равностенные трубки используются, как правило, для печей повышенной частоты, а разностенные — преимуще-

ственно для печей промышленной частоты. Широкое распространение получил, в частности, профиль, показанный на рис. 62, г.

Электроизоляция индуктора должна иметь высокую диэлектрическую прочность, быть пыле- и влагонепроницаемой, противостоять вибрациям и повышенным температурам (порядка 200—300° С), быть ремонтоспособной.

На практике применяется несколько способов выполнения межвитковой электроизоляции:

а) воздушная изоляция, когда промежуток между соседними витками выполняется достаточно большим (порядка 10—20 мм), чтобы исключить возможность возникновения пробоя. Воздушная



Р и с. 62. Профили медной трубки, используемой для изготовления индукторов

изоляция используется при сравнительно невысоком уровне напряжения на индукторе, в тех случаях, когда имеется возможность жестко закрепить каждый виток в отдельности (на печах малой емкости);

б) обмоточная изоляция, когда на индуктирующие витки (на предварительно подготовленную поверхность) наносится слой изоляционного лака, а затем витки индуктора обматываются лентой с высокими диэлектрическими свойствами (например, стекломикалентой). Лента наматывается обычно «вполуперекрышку». Обмоточная изоляция используется довольно широко;

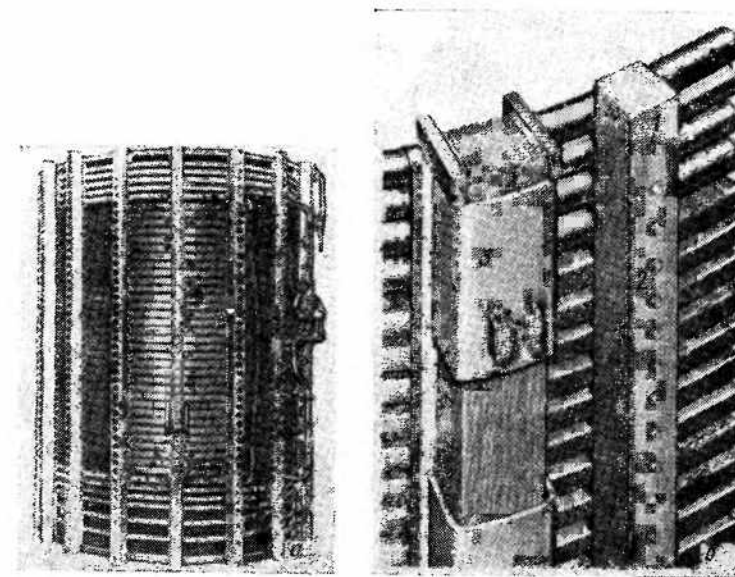
в) прокладочная изоляция, когда в зазор между витками закладывают прокладки, выполненные, например, из стеклотекстолита. Индуктирующий провод предварительно покрывают изоляционным лаком, а прокладки приклеивают к виткам специальным клеем на эпоксидной основе. Этот вид изоляции применяется, в частности, на печах большой емкости;

г) напыленная изоляция, когда на индуктирующий провод, на предварительно подготовленную его поверхность (обычно производится дробеструйная очистка и обезжиривание) газопламенным или плазменным способом наносится тонкий слой окиси алюминия (Al_2O_3) или двуокиси циркония (ZrO_2), обладающих высокими диэлектрическими свойствами и хорошо сцепляющихся с медью индуктора. Сверху на этот слой наносится обычно также слой лака. Этот вид электроизоляции получает широкое распространение в настоящее время;

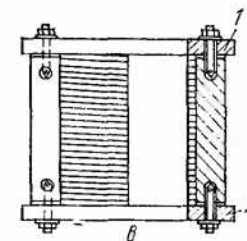
д) монолитная изоляция индукторов с применением полиэфирного компаунда находит ограниченное применение (на некоторых заводах) из-за сложности выполнения ремонта индуктора при местных повреждениях трубки или самой изоляции.

Для обеспечения жесткости и механической прочности индуктора применяются следующие способы крепления его витков:

1) с помощью шпилек, выполняемых обычно из латуни, и припаянных или приваренных к наружной стороне трубки индуктора, каждый его виток крепится к вертикальным изоляционным стой-



Р и с. 63. Способы крепления индуктора



кам (выполненным из текстолита, асбоцемента или твердых пород дерева).

На рис. 63, а показан общий вид индуктора плавильной печи промышленной частоты, каждый виток которого закрепляется с помощью шпилек 1 и вертикальных реек 2 (рис. 63, б) в данном случае их шестнадцать, на малых печах бывает достаточно четырех реек. С помощью этих реек индуктор фиксируется в корпусе печи. Между рейками устанавливаются пакеты магнитопроводов 3;

2) с помощью верхнего 1 и нижнего 2 нажимных колец или фланцев все витки индуктора вместе стягиваются в осевом направлении продольными стяжками, а радиальная фиксация витков

осуществляется вертикальными рейками, выполненными из изолирующего материала или пакетами магнитопроводов (если они имеются). Пример выполнения индуктора описанной конструкции показан на рис. 63, в. Здесь осевая стяжка реализуется с помощью нажимных фланцев и вертикальных стоек;

3) необходимая жесткость индуктора может быть обеспечена также заливкой его в компаунд.

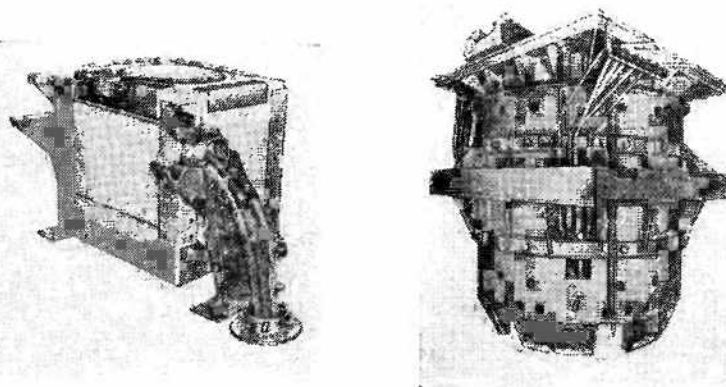


Рис. 64. Конструктивные схемы каркасов ИТП

Каркас печи

Каркас (кожух) служит конструктивной базой для крепления всех основных элементов печи. При этом к каркасу предъявляются два основных требования:

- 1) обеспечение максимальной жесткости всей конструкции в целом;
- 2) минимальное поглощение мощности элементами каркаса (поскольку они находятся в магнитном поле рассеяния индуктора).

В настоящее время в тигельных печах применяют следующие две основные конструктивные схемы каркаса:

1) каркас, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, ребра (рис. 64, а) которого выполнены из немагнитного материала (например, из дюралюминиевого уголка или из немагнитной стали), а грани закрыты асбоцементными листами. С такими каркасами изготавливают печи малой емкости (менее 0,5 т) и лабораторные печи. С целью уменьшения нагрева металлических уголков каркаса отдельные его металлические элементы изолируют друг от друга изоляционными прокладками для исключения в раме каркаса кольцевых токов. Индуктор в таком каркасе обычно прикрепляют к нижней и верхней асбоцементным плитам;

2) металлический каркас, обычно цилиндрической формы, выполненный в виде сплошной обечайки из толстого стального листа с вырезами («окнами») для доступа к индуктору (рис. 64, б);

или в виде «беличьей клетки», образованной вертикальными металлическими стойками приваренными к верхнему и нижнему опорным кольцам. Между стойками имеется доступ к индуктору. Такие каркасы применяют обычно в печах средней и большой емкости.

Магнитопроводы и экраны

На практике применяются три способа уменьшения потерь в каркасе от полей рассеяния:

а) удаление металлических элементов каркаса на достаточное расстояние от индуктора с устранением замкнутых контуров тока в каркасе;

б) применение пакетов магнитопроводов, устанавливаемых между индуктором и каркасом и выполненных из листовой электротехнической стали толщиной 0,2; 0,35 или 0,5 мм;

в) применение электромагнитных экранов в виде сравнительно

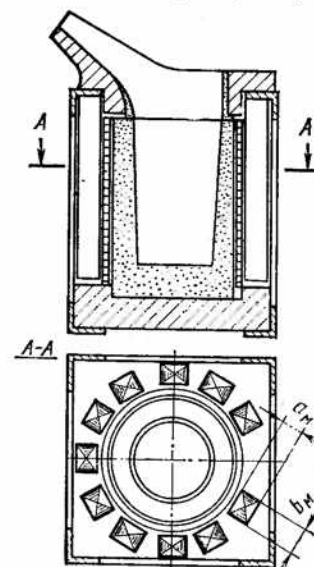


Рис. 65. Размещение пакетов магнитопровода в печи

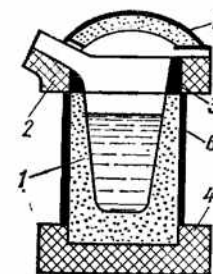


Рис. 66. Футеровка тигельной печи

тонких (превышающих, однако, глубину проникновения тока) медных или алюминиевых листов, и располагающихся непосредственно у внутренней поверхности кожуха.

Поскольку металлический корпус (рис. 64, б) образует замкнутый контур вокруг индуктора, то применение экранов в этом случае оказывается неизбежным. Как правило, в промышленных печах используют магнитные экраны (магнитопроводы). На рис. 65 схематически показано размещение пакетов магнитопровода в печи.

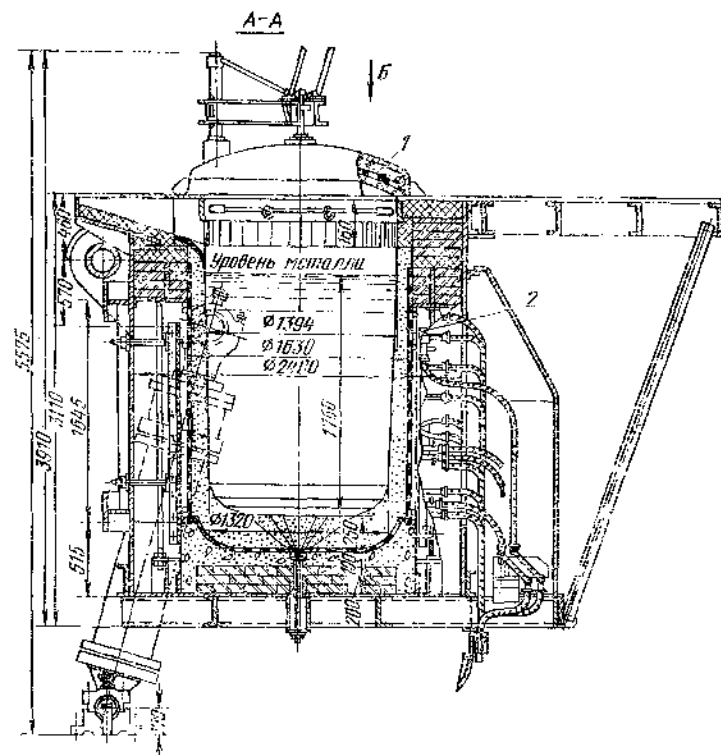
Магнитопроводы, кроме своего основного назначения (проведения внешнего магнитного потока внутри каркаса), выполняют функцию конструктивного элемента, обеспечивающего жесткость индуктора и печи в целом. Это достигается благодаря тому, что фиксацию и радиальную стяжку индуктора осуществляют пакетами магнитопроводов, прижимаемых к индуктору специальными

нажимными болтами, смонтированными в корпус печи. Усилие нажатия может регулироваться. Фиксация индуктора в осевом направлении может осуществляться с помощью кронштейнов, приваренных к боковым щекам магнитопроводов (к верхним скобам) и шпалек, притягивающих пакеты магнитопроводов к днищу печи. Благодаря такому конструктивному решению все усилия, возникающие при работе печи и воспринимаемые индуктором, передаются через магнитопроводы на корпус и на днище, что позволяет разгрузить футеровку и повысить ее стойкость и надежность печи в целом.

Применение магнитопроводов позволяет уменьшить габариты печи, дает возможность изготавливать кожух из ферромагнитной (конструкционной) стали и тем самым уменьшить стоимость печи.

Плавильный тигель, крышка и подина

Футеровка тигельной печи состоит (рис. 66) из плавильного тигля 1 со сливным носком 2 и, так называемым, «воротником» 3, подины 4, крышки 5 и слоя тепловой изоляции 6.



Р и с. 67. Индукционная тигельная печь
1 — крышка с механизмом подъема; 2 — установка индуктора; 3 —
печи; 6 — пакеты магнитопровода;

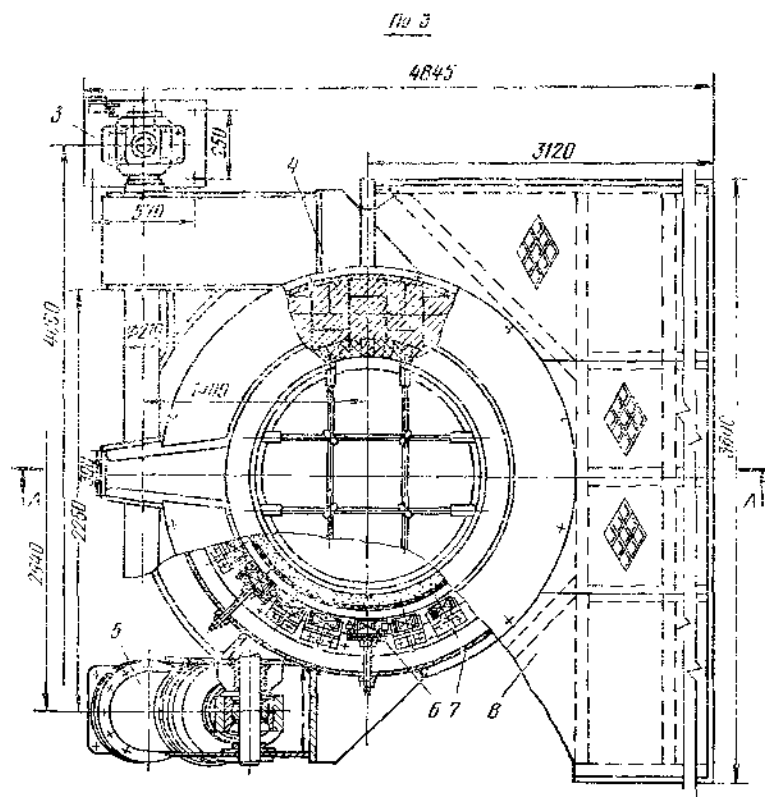
Правильный тигель является одним из самых ответственных узлов печи, в значительной степени определяющим ее эксплуатационную надежность. Поэтому к тиглю и к используемым футеровочным материалам предъявляются следующие требования:

1) огнеупорные материалы должны обладать высокой огнеупорностью и термостойкостью, а также химической стойкостью по отношению к расплавленному металлу и шлаку при рабочих температурах;

2) материал тигля должен сохранять изоляционные свойства (иметь минимальную электропроводность) во всем диапазоне температур (до 1600—1700° С, для черных металлов);

3) тигель должен иметь по возможности минимальную толщину стенки для получения высокого значения электрического к. п. д.;

4) тигель должен быть механически прочным в условиях воздействия высоких температур, большого металлостатического давления, значительных механических усилий, возникающих при



установка подшипников; 4 — футеровка; 5 — плунжер механизма поворота
7 — кожух печи; 8 — рабочая площадка

наклонах печи, ударных нагрузках, возникающих при загрузке и осаживании шихты и чистке тигля;

5) материал тигля должен иметь малый коэффициент линейного (объемного) расширения для исключения возникновения трещин в тигле в условиях высоких значений градиента температур в стенке (до $3 \cdot 10^4$ С/м) и для снижения термических напряжений в тигле;

6) технология изготовления и конструкция футеровки и тепловой изоляции печи должны обеспечивать условия для существования в течение всей кампании печи неспекшегося (буферного) наружного слоя, прилегающего к индуктору, и исключающего образование сквозных трещин и проникновение расплава к виткам индуктора.

В индукционных тигельных печах в зависимости от марки выплавляемого металла, уровня температуры и особенностей технологического процесса применяют три вида футеровок: кислую, основную и нейтральную.

Кислая футеровка выполняется из огнеупорной массы, содержащей более 90% (до 98%) окиси кремния (SiO_2), небольшое количество окислов других металлов (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO и др.) и 1—1,5% борной кислоты. Стойкость кислых тиглей 80—100 плавов.

Основная футеровка выполняется из массы, содержащей преимущественно магнезит (окись магния MgO) — до 85%, примеси других окислов (CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 и др.) и жидкое стекло. Стойкость тиглей колеблется от 40—50 (для малых печей) до 18—20 (для печей емкостью свыше 1 т) плавов.

Нейтральная футеровка содержит в основном окислы Al_2O_3 и ZrO_2 с добавкой плавленого магнезита. Стойкость тиглей, выполненных из нейтральной футеровочной массы, во многих случаях выше, чем в двух предыдущих случаях. В последнее время нейтральная футеровка получает широкое применение для тигельных печей.

Плавильный тигель изготавливают обычно путем набивки его непосредственно в печь. Для этого предварительно устанавливают по оси индуктора шаблон, имеющий форму внутренней поверхности тигля и выполненный из листовой стали, а внутреннюю поверхность индуктора покрывают специальной обмазкой и устанавливают тепловую изоляцию (обычно используют для этой цели листовую асбест). Приготовленную огнеупорную массу (обычный зерновой состав 0,5—3,0 мм) засыпают в пространство между шаблоном и теплоизоляцией и послойно уплотняют (трамбуют) вручную или пневматической трамбовкой. После набивки тигля его сушат, спекают, проводят обжиговую или промывочную плавку, а затем ведут рабочие плавки.

Для контроля футеровки в процессе эксплуатации печи применяют сигнализатор состояния футеровки тигля, который дает сигнал на отключение печи при уменьшении толщины стенки ниже

допустимой величины, а также в случае прохода металла в трещины.

Подина печи, служащая основанием, на которое устанавливают тигель и индуктор, обычно выполняется из шамотных кирпичей или блоков (для больших печей) или из асбоцементных плит, уложенных одна на другую (для малых печей).

Крышка печи, служащая для уменьшения тепловых потерь излучением, выполняется обычно из конструкционной стали и футеруется изнутри. Открывание крышки осуществляется либо вручную с помощью системы рычагов (на малых печах), либо с помощью специального привода (гидро- или электромеханического).

Механизм наклона печи

Для слива металла из тигля после окончания плавки печь наклоняют на угол 95—100°. Чтобы уменьшить длину струи при разливе и не перемещать разливочный ковш в соответствии с перемещением сливного носка печи, ось наклона печи стремятся размещать вблизи носка или непосредственно под ним.

Наклон печи осуществляют одним из способов:

с помощью ручного привода или рычагов и длинных рукояток (применяется только в лабораторных печах);

с помощью тельфера или другого подъемного механизма, установленного в цехе, при этом крюк подъемного механизма зацепляют за специальную скобу, предусмотренную на каркасе печи;

с помощью электромеханического привода, состоящего обычно из электродвигателя, редуктора и цепной передачи, устанавливаемых на опорной раме печи;

с помощью гидропривода, включающего маслонапорную установку для создания давления жидкости в системе, плунжеры или гидроцилиндры, шарнирно связанные с корпусом печи и осуществляющие ее наклон.

Последний тип привода получил наибольшее распространение в промышленных тигельных печах, он применяется в печах емкостью от 100 кг до 60 т. Плунжеры располагают вертикально или наклонно, причем их оси смещают ближе к оси поворота печи, что позволяет сократить ход и вписаться в габариты печи, но приводит к необходимости увеличения давления в системе (до 50—200 ат). Маслонапорную установку монтируют рядом с печью, вне рабочей площадки. Пульт управления механизмом наклона располагают на рабочей площадке в месте удобном для наблюдения за процессом слива металла из тигля.

§ 3. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИГЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Отечественной промышленностью выпускаются серийно индукционные тигельные печи различной емкости и мощности для плавки стали (серия ИСТ), чугуна (серии ИЧТ и ИЧТМ), алюминиевых (ИАТ) и медных (ИМТ) сплавов.

Наиболее распространенным типом индукционных печей являются печи средней частоты (500—2400 Гц) емкостью 0,06—1,0 т, предназначенные для плавки стали, но широко используемые также для плавки чугуна и цветных металлов. Эти печи хорошо вписываются в литейные цехи, они удобны для фасонного литья, когда отбор жидкого металла должен осуществляться мелкими порциями (до 50—100 кг). Плавка в этих печах ведется в периодическом режиме с полным сливом металла после каждой плавки.

Широкое применение нашли тигельные печи для плавки (серия ИЧТ) и выдержки (серия ИЧТМ) чугуна, в том числе для получения синтетического чугуна из отходов производства.

Для экономичной работы печи при плавке мелкой шихты остаточная емкость тигля должна составлять 60—70% от номинальной емкости (но не менее 25—30%).

Индукционные тигельные печи серии ИАТ предназначены для плавки алюминия и сплавов на его основе. Они выпускаются в двух исполнениях: на промышленной и на средних частотах.

Применение для плавки алюминиевых сплавов индукционных печей средней частоты рекомендуется в тех случаях, когда к металлу предъявляются особые требования по чистоте от окисных и газовых загрязнений. Эти печи конструируются таким образом, чтобы плавка алюминия велась без разрыва защитной поверхностной окисной пленки вследствие циркуляции расплава.

Индукционные тигельные печи промышленной частоты серии ИЛТ предназначены для плавки медных сплавов (медь, латунь, бронза и др.). Печи серии ИЛТ используют как при непрерывном, так и при периодическом режимах работы.

На рис. 67 в качестве примера показана индукционная тигельная печь промышленной частоты для плавки алюминиевых сплавов емкостью 6,0 т (ИАТ-6).

Индукционные плавильные электропечи в силу своей специфики имеют и свои особенности эксплуатации, ведения процесса плавки, выполнения профилактических ремонтов.

Так, в печах промышленной частоты необходимым условием нормальной эксплуатации является работа печи с неполным сливом расплавленного металла, т. е. с остаточной емкостью («болотом»). Экспериментально установлено, что с увеличением «болота» производительность печи заметно возрастает. Это объясняется, с одной стороны, улучшением условий теплопередачи от жидкого металла к твердой шихте (благодаря интенсивному движению жидкого металла), а с другой, — увеличением потребляемой печью мощности. При одном и том же напряжении мощность, потребляемая печью, пропорциональна величине заполнения тигля жидким металлом (в области рабочих витков индуктора). Наиболее рациональным режимом работы печей промышленной частоты являются частые отборы металла небольшими порциями. Величина этих порций определяется опытным путем, но находится в области 20—30% от емкости тигля.

В печах средней частоты, которые обычно работают с полным сливом металла, производительность во многом зависит от плотности укладки шихты в тигле и ее чистоты. В этом случае (при плотной укладке) потребляется мощность, близкая к номинальной, и плавка по времени производится быстро — близко к расчетному времени.

Ускорения времени плавки можно достичь также периодическим уплотнением шихты, погружая нерасплавленные куски шихты в уже расплавленный металл, а также поддерживая электрический режим на номинальном уровне, т. е. напряжение, сила тока, мощность, $\cos \varphi$ должны быть близкими к номинальным значениям. Возможны случаи, когда из-за большой индуктивности, при номинальной силе тока возбуждения генератора, напряжение на печи меньше номинального, в этом случае необходимо $\cos \varphi$ поддерживать емкостным.

Возможным приемом ускорения плавки является последовательность загрузки шихты. Например, при выплавке отдельных сплавов алюминия, имеющих температуру плавления меньшую, чем чистый алюминий (если шихта состоит из возврата и алюминия), вначале следует загружать возврат, а алюминий — в конце плавки. При выплавке синтетического чугуна, например, когда шихта состоит частично из чугунового скрапа и стального лома, стружки и пр., стальная шихта загружается в конце плавки.

При применении указанной технологии загрузки шихты создаются благоприятные условия для стойкости тиглей, так как облегчается температурный режим плавки и уменьшается химическое взаимодействие между плавильной массой тигля и отдельными составляющими шихты.

При эксплуатации индукционных электропечей нужно строго следить за температурным режимом плавки, поскольку даже незначительное (20—50° С) превышение температуры против допустимой для данного материала тигля резко уменьшает срок его службы. При расплавлении не следует форсированно перегревать металл выше температуры разлива, так как такой перегрев ведет к размягчению футеровки и ее быстрому разрушению. Кроме того, форсированный (быстрый) перегрев металла с последующим отключением печи для раздачи металла в ковш (часто добиваются такого перегрева металла, чтобы за время простоя печи в ожидании разлива и при самой разливке металл подстуживался не ниже температуры заливки) производится при максимальных мощностях, что сопровождается интенсивным движением металла в ванне печи и, следовательно, повышенным износом (размыванием) тигля, особенно в нижней его части. Это явление особенно заметно на печах промышленной частоты.

Для уменьшения износа футеровки перегрев следует вести до температуры слива (на несколько градусов выше температуры заливки) и затем переключать печь на пониженную мощность

(в случае вынужденного простоя и других причин), называемую мощностью холостого хода.

Значительный перегрев металла допускается лишь в отдельных случаях, например, когда тигель печи сильно зашлакован и необходимо произвести его чистку. Допускать зашлаковывания не следует, так как в этом случае уменьшается полезный объем тигля и могут значительно ухудшиться технико-экономические показатели печи. Чистку стенок тигля при эксплуатации печи необходимо осуществлять после каждой плавки. Производиться она должна при наполненном металлом тигле, так как в этом случае шлак размягчен и сравнительно легко счищается. Чистый тигель позволяет также проводить визуальный контроль его состояния (наличие трещин, разрушения и т. д.). При износе тигля (уменьшении толщины стенок) до 20—30% тигель необходимо заменять (перенабивать).

В процессе эксплуатации следует непрерывно наблюдать за режимом охлаждения печи, состоянием электроаппаратуры и своевременно осуществлять профилактические осмотры и ремонты. Одним из необходимых условий нормального режима должно быть поддержание температуры воды на входе в индуктор выше температуры точки росы для данного помещения. В противном случае возможна обильная конденсация водяных паров на трубках индуктора, что приведет к электропробою между витками индуктора и выходу его из строя.

При работе печи опасен и чрезмерный перегрев воды, выходящей из индуктора. В этом случае происходит интенсивное отложение солей (образование накипи) и различных примесей на стенках труб индуктора, что нарушает условия теплообмена между стенкой трубки и охлаждающей водой и ведет к выходу печи из строя.

Образование накипи происходит и при нормальных условиях, поэтому требуется периодическая промывка водоохлаждаемых полостей, например, 40%-ным раствором соляной кислоты.

Профилактика электрооборудования должна заключаться в периодическом осмотре коммутирующей аппаратуры (реле, магнитных пускателей, контакторов и др.), своевременной зачистке контактов и поддержании в исправности их механической части. Электроизмерительные приборы должны проходить регулярную и периодическую проверку.

Контрольные вопросы

1. Опишите достоинства и недостатки индукционных тигельных печей.
2. Какими средствами на практике достигаются минимальные электрические потери в индукторе и его необходимая механическая прочность и жесткость?
3. Какова роль магнитопроводов в тигельных печах?
4. Почему в печах промышленной частоты необходимо работать с полным сливом металла из тигля, а в печах средней частоты такой необходимости нет?

ГЛАВА 12

РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

§ 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА

Задание на проектирование индукционной тигельной печи должно содержать следующие данные:

1) наименование расплавляемого металла или марку сплава и его состав, конфигурацию и характерные размеры кусков шихты;

2) исходную температуру загружаемой шихты $T_{ш}$ и конечную температуру перегрева расплава T_k ;

3) теплофизические свойства переплавляемого металла: температуру плавления металла (сплава) $T_{пл}$, плотность шихты $\gamma_{ш}$ и расплавленного металла γ_2 ;

удельное электросопротивление шихты $\rho_{ш}$ в диапазоне температур $(T_{ш} - T_{пл}) - \rho_{ш}$ и расплавленного металла ρ_2 при температуре T_k ; среднюю теплоемкость металла $c_{ш}$ в диапазоне температур $(T_{ш} - T_{пл})$ и теплоемкость расплава $c_{ж}$ в диапазоне $(T_{пл} - T_k)$; скрытую теплоту плавления $q_{пл}$; магнитную проницаемость исходной шихты $\mu_{ш}$ или кривую намагничивания $B = f(H)$;

4) емкость тигля G или производительность печи g (часовую производительность по расплавлению и перегреву $g_{пл}$ или суточную производительность g_c);

5) циклограмму процесса плавки и технологической обработки металла в печи или следующие данные:

длительность процесса плавки и перегрева металла до конечной температуры $\tau_{пл}$;

длительность вспомогательных операций (загрузки, выгрузки, скачивания шлака, технологической обработки и т. п.) $\tau_{всп}$;

6) особенности технологического процесса — указывается, должен ли процесс идти на твердой загрузке с полным сливом металла из тигля или допускается плавка с остаточной емкостью тигля G_0 . В последнем случае уточняется объем металла, сливаемого из тигля одновременно $G_{сл}$;

7) параметры питающей сети (в частности, напряжение и мощность подстанции, к которой предполагается подключить печь). Данные питающей сети необходимы для выбора силового трансформатора или двигателя преобразователя частоты, а также для определения допустимости подключения однофазной печи к трехфазной сети напрямую или необходимости подключения ее через симметрирующее устройство, обеспечивающее равномерное распределение нагрузки по фазам.

Задачей расчета является определение основных геометрических размеров, тепловых и электрических параметров печи, параметров системы охлаждения, выбор частоты источника питания, а также определение энергетических характеристик проектируемой печи. В общем случае выполняются также расчеты на проч-

ность элементов конструкций и механизма наклона печи (здесь не рассматриваются).

В соответствии с изложенным, обычно придерживаются следующего порядка расчета: выбирают частоту источника питания, определяют емкость тигля и геометрию системы индуктор — садка, выполняют тепловой расчет печи и находят необходимую мощность и тепловой к. п. д. печи, выполняют электрический расчет печи и определяют параметры индуктора и магнитопроводов, параметры системы охлаждения индуктора и энергетические характеристики печи.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ В СИСТЕМЕ ИНДУКТОР — ЗАГРУЗКА И ВЫБОР ЧАСТОТЫ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Задачей расчета является определение основных размеров системы индуктор — загрузка (рис. 68) и минимальной частоты тока.

Последовательность расчета

1. Емкость тигля печи определяется величиной одновременного слива металла из тигля $G_{сл}$ и величиной остаточной емкости тигля («болота») G_0 , которые в свою очередь зависят от технологии процесса и требуемой производительности печи. В общем случае

$$G = G_{сл} / (1 - \bar{G}_0), \quad (12-1)$$

где \bar{G}_0 — относительное значение остаточной емкости тигля,

$$\bar{G}_0 = G_0 / G_n, \quad (12-2)$$

здесь G_n — номинальная емкость тигля, кг.

Обычно при плавке малогабаритной шихты в печах промышленной частоты принимают $\bar{G}_0 = 0,6 \div 0,8$.

Рис. 68. Эскиз к электрическому расчету тигельной печи

Если задана суточная производительность g_c и время цикла $\tau = \tau_{пл} + \tau_{всп}$, то емкость печи, кг:

$$G = \frac{g_c}{1 - \bar{G}_0} \cdot \frac{\tau_{пл} + \tau_{всп}}{\tau_{см} n_{см}}, \quad (12-3)$$

где $\tau_{см}$ — длительность одной смены;

$n_{см}$ — число смен работы печи в сутки ($n = 3$).

2. Полезный объем тигля, м³:

$$V = G / \gamma_2. \quad (12-4)$$

Геометрию тигля определяют, исходя из установившихся на практике значений отношения $h_2/D_2 = \bar{h}_2$, в зависимости от емкости печи (рис. 69).

Внутренний диаметр плавильного тигля (в среднем сечении), м:

$$D_2 = \sqrt[3]{4V/\pi \bar{h}_2} \quad (12-5)$$

и высота расплава в тигле, м:

$$h_2 = D_2 \bar{h}_2. \quad (12-6)$$

Высота внутренней полости тигля, м:

$$h_1 = (1,2 \div 1,4) h_2. \quad (12-7)$$

Коэффициент 1,2—1,4 учитывает наличие мениска, условия загрузки шихты в тигель, технологические факторы и т. п.

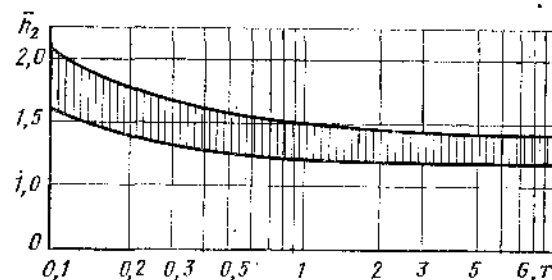


Рис. 69. График к определению геометрии тигля

3. Внутренний диаметр индуктора, м:

$$D_1 = D_2 + 2b_{ф} + 2b_{из}, \quad (12-8)$$

где $b_{из}$ — толщина тепловой изоляции, располагаемой между футеровкой и индуктором;

$b_{ф}$ — толщина футеровки в среднем сечении тигля, м; приближенно может быть определена по эмпирической формуле:

$$b_{ф} \approx 0,08 \sqrt[3]{G}, \quad (12-9)$$

здесь G — емкость печи, т.

Высота индуктора (без учета холостых витков), м:

$$h_1 = h_2 \bar{h}_1, \quad (12-10)$$

где \bar{h}_1 — относительная высота индуктора, м:

$$\bar{h}_1 = h_1/h_2. \quad (12-11)$$

Обычно в тигельных печах $\bar{h}_1 = 1,0 \div 1,2$.

Взаимное расположение индуктора и загрузки, а также индуктора и магнитопровода определяют, исходя из конструктивных соображений. В печах средней частоты (открытых и вакуумных) обычно принимают симметричное расположение индуктора по от-

пошению к загрузке. В печах промышленной частоты верхний уровень индуктора располагают на 10—30% ниже номинального уровня расплава. Для выравнивания температурного поля в стенке тигля непосредственно над рабочими витками индуктора устанавливают «холостую» водоохлаждаемую катушку, не подключаемую к источнику питания.

4. Минимальная частота тока при жидкой закалке или при плавке с остаточной емкостью тигля $\bar{C}_0 \geq 0,6$ определяется по формуле (4-28).

При плавке кусковой шихты без остаточной емкости ($\bar{C}_0 = 0$) необходимо определить характерный поперечный размер среднего куска шихты $d_{ш}$. Минимальная частота, Гц, в этом случае определяется из выражения

$$f_{\min} \geq \pi 10^6 \frac{\rho_{ш}}{\mu_{ш} d_{ш}^2} \quad (12-12)$$

Для немагнитной шихты следует подставлять в уравнение (12-12) значения $\mu_{ш} = 1,0$ и $\rho_{ш}$ при начальной температуре шихты $T_{ш}$. При плавке ферромагнитной кусковой шихты рекомендуется брать $\rho_{ш}$ и $\mu_{ш}$ при температуре потери магнитных свойств $T_{ш}$ ($\mu_{ш} = 1,0$).

Если шихта очень мелкая и по уравнению (12-12) получается $f_{\min} > 10^4$ Гц, необходимо, если это возможно, изменить способ укладки шихты, увеличив ее характерный размер $d_{ш}$, или перейти к плавке с относительной остаточной емкостью тигля $\bar{C}_0 \geq 0,6$.

Если выбор f_{\min} по уравнению (12-12) осуществляется, исходя из необходимости достижения максимального значения электрического к. п. д., то конкретный выбор источника питания, удовлетворяющего условию (12-12), должен производиться, исходя из технико-экономического расчета с учетом капитальных затрат и затрат на эксплуатацию установки, а также с учетом необходимого уровня циркуляции металла в тигле (см. гл. 5). Частота источника питания выбирается из стандартного ряда 50, 500, 1000, 2400, 4000, 8000 и 10 000 Гц.

§ 3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Задачей расчета является определение температуры наружной поверхности футеровки, расчет тепловых потерь и теплового к. п. д. печи.

Для расчета необходимы следующие данные: состав футеровки и тип тепловой изоляции; внутренний диаметр индуктора D_1 и тигля D_2 и высота расплава h_2 ; толщина отдельных слоев футеровки b_i и тепловой изоляции $b_{из}$; теплопроводность i -того слоя футеровки λ_i и изоляции $\lambda_{из}$.

Тепловые потери рассчитывают для установившегося теплового режима при номинальном заполнении тигля расплавом, причем температуру внутренней стенки тигля и крышки принимают рав-

ной T_{κ} . Эскиз печи для теплового расчета показан на рис. 70. Расчеты тепловых потерь ведут методом последовательных приближений до сходимости значений температур на границах слоев футеровки (в пределах заданной точности расчета).

Последовательность расчета

1. Тепловые потери через боковую стенку тигля, Вт:

$$P_{т.б} = \frac{2\pi h_2 (T_{\kappa} - T_{из})}{\frac{1}{\lambda_{ф}} \ln \frac{D_1 - 2b_{из}}{D_2} + \frac{1}{\lambda_{из}} \ln \frac{D_1}{D_1 - 2b_{из}}}, \quad (12-13)$$

где $T_{из}$ — допустимая температура наружной поверхности тепловой изоляции (на границе с электрической изоляцией индуктора); для расчетов можно принять $T_{из} \approx 423$ К;

$\lambda_{ф}$ и $\lambda_{из}$ — теплопроводность футеровки и теплоизоляции при средней температуре соответствующего слоя

$$T_{i\text{ ср}} = (T_i + T_{i+1})/2. \quad (12-14)$$

На первом этапе расчета значениями T_i и T_{i+1} задаются произвольно, на последующих этапах их уточняют, а затем по ним уточняют значения $\lambda_{ф}$ и $\lambda_{из}$.

2. Тепловые потери излучением с зеркала ванны, Вт:

$$P_{изл} = \epsilon c_0 \left[\left(\frac{T_{\kappa}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \frac{\pi D_2^2}{4} \zeta, \quad (12-15)$$

где ϵ — степень черноты расплава;

T_0 — температура окружающего воздуха, К;

ζ — коэффициент диафрагмирования;

c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5,7$.

3. Тепловые потери, Вт, через крышку находим, полагая крышку плоской:

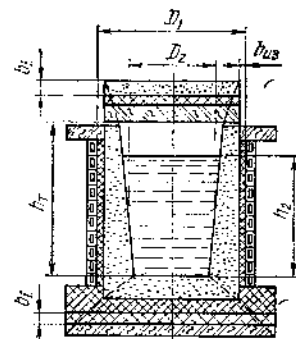
$$P_{т.к} = \frac{T_{\kappa} - T_0}{\sum_{i=1}^m \frac{b_i}{\lambda_i S_{i\text{ ср}}} + \frac{1}{\alpha_{\kappa} S_{\kappa}}}, \quad (12-16)$$

где S_{κ} — площадь наружной поверхности крышки, м²;

$S_{i\text{ ср}}$ — площадь среднего сечения i -того слоя футеровки крышки, м²;

$S_{i\text{ ср}} = (S_i + S_{i+1})/2$, если $S_{i+1}/S_i \leq 2,0$;

$S_{i\text{ ср}} = \sqrt{S_i S_{i+1}}$, если $S_{i+1}/S_i > 2$;



Р и с. 70. Эскиз футеровки печи к тепловому расчету

α_k — коэффициент теплоотдачи естественной конвекцией с наружной поверхности крышки, Вт/(м²·К);

m — число слоев футеровки крышки.

4. Тепловые потери через подину, Вт:

$$P_{т.п} = \frac{T_k - T_o}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i S_{i\text{ ср}}} + \frac{1}{\alpha_n S_n}}, \quad (12-17)$$

где n — число слоев футеровки подины.

При расчете потерь по уравнениям (12-16) и (12-17) нужно учитывать, что допустимая температура наружной поверхности крышки и подины не должна превышать ~600 К.

5. При расчете методом последовательных приближений температуры на границе наружной поверхности ($i+1$)-го слоя футеровки (начиная с первого слоя, от $T_i = T_1 = T_k$ и далее), К:

$$T_{i+1} = T_i - P_{ti} R_{ti}, \quad (12-18)$$

где R_{ti} — тепловое сопротивление i -того слоя, К/Вт:

$$R_{ti} = b_i / \lambda_i S_{i\text{ ср}}; \quad (12-19)$$

P_{ti} — тепловые потери через соответствующий элемент печи (боковую стенку, крышку, подину), определенные по формулам (12-13), (12-16), (12-17).

6. Суммарные тепловые потери печи, Вт:

$$P_{г\sum} = k_d \left(P_{т.с} + P_{исл} \frac{\tau_{всп}}{\tau_{пл}} k_{\tau} + P_{т.к} k_{\tau} + P_{т.п} \right), \quad (12-20)$$

где k_d — коэффициент дополнительных (неучтенных расчетом) тепловых потерь, обычно принимают $k_d \approx 1,1 \div 1,2$;

k_{τ} — коэффициент, учитывающий время работы печи с закрытой крышкой; $k_{\tau} = \tau_{пл} / (\tau_{пл} + \tau_{всп})$.

7. Полезная мощность, необходимая для нагрева шихты до температуры плавления, расплавления загрузки и перегрева расплава до конечной температуры T_k , Вт:

$$P_{пол} = g_{ш} [c_{ш} (T_{пл} - T_{ш}) + c_{ж} (T_k - T_{пл}) + q_{пл}], \quad (12-21)$$

где $c_{ш}$ — среднее значение удельной теплоемкости шихты в интервале температур $T_{ш} - T_{пл}$, Дж/(кг·К);

$c_{ж}$ — среднее значение удельной теплоемкости расплава в интервале температур $T_{пл} - T_k$, Дж/(кг·К).

Если задана энтальпия металла при конечной температуре q_k , Дж/кг (энтальпия некоторых металлов дана на рис. 47):

$$P_{пол} = q_k g_{пл}. \quad (12-22)$$

8. Активная мощность, которую нужно подвести к загрузке, чтобы обеспечить требуемую производительность:

$$P_2 = P_{пол} + P_{г\sum}. \quad (12-23)$$

9. Тепловой к. п. д. печи

$$\eta_T = P_{пол} / P_2. \quad (12-24)$$

10. Далее следует приближенно оценить величину удельной мощности $P_{уд}$, разрабатываемой печи и сопоставить ее с предельно допустимым значением для данной частоты.

Предел мощности при заданной геометрии системы индуктор — загрузка обусловлен интенсивностью электродинамических явлений: скоростью циркуляции расплава у стенки тигля и величиной мениска (опасностью возникновения выбросов). Значения $P_{пред}$, обусловленные этими явлениями, приведены на рис. 71.

В ряде случаев предел мощности обусловлен чисто технологическими требованиями. Так, например, при плавке чугуна в крупных печах удельная мощность ограничивается интенсивностью образования газовых пузырей CO, способствующих появлению выбросов металла из тигля. При плавке чистого алюминия удельная мощность ограничивается значением, при котором происходит разрыв окисной пленки на зеркале и замешивание ее в металл, ведущее к повышенному содержанию окислов в металле и ухудшающее его качество.

Поэтому при выборе величины $P_{уд}$ необходимо иметь информацию о целесообразном уровне циркуляции металла и особенностях технологического процесса.

В связи со сказанным необходимо оценить величину $P_{уд}$, Вт/кг:

$$P_{уд} = P_2 / \eta_2 \eta_T G, \quad (12-25)$$

где η_2 — электрический к. п. д. тигельной печи (при плавке алюминия можно принять $\eta_2 = 0,5 \div 0,6$, при плавке чугуна и стали $\eta_2 = 0,7 \div 0,8$).

Если окажется, что $P_{уд} > P_{пред}$, то следует соответственно увеличить смкость тигля, добиваясь, чтобы $P_{уд} < P_{пред}$.

В общем случае выбор оптимального значения $P_{уд}$ (как и частоты источника питания f) следует осуществлять на основании технико-экономических расчетов с учетом упомянутых выше ограничений.

§ 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

В задачу расчета входит: определение эквивалентных сопротивлений системы индуктор — загрузка ИТП в горячем и в холодном режимах и параметров системы водоохлаждения индук-

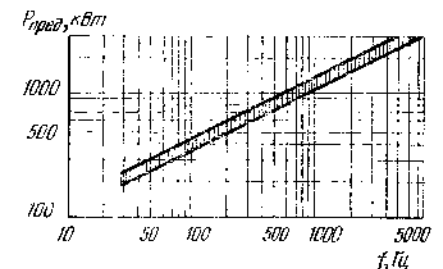


Рис. 71. Зависимость предельных значений удельной мощности тигельных печей от частоты

тора, расчет магнитопровода и конденсаторной батареи печи и построение энергетического баланса плавильной установки.

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Определяют эквивалентные сопротивления системы индуктор — загрузка в горячем режиме, т. е. при номинальном заполнении тигля расплавом, при конечной температуре металла T_k . Расчет проводят в полном соответствии с методикой, приведенной в § 1, гл. 7. Этот расчет является базовым расчетом, служащим основой для выбора основных параметров печи.

2. Выполняют поворочный расчет печи в холодном режиме с целью уточнения параметров индуктора на начальной стадии нагрева кусковой шихты (в общем случае — ферромагнитной) и в промежуточных режимах.

3. Осуществляют расчет конденсаторной батареи в соответствии с методикой, изложенной в § 4, гл. 7, с тем, однако, условием, что необходимое число банок находят, исходя из большего значения реактивной мощности $P_{к.б.}$ определенного по уравнению (7-55) для горячего и холодного режимов.

4. Рассчитывают магнитопровод печи (методика расчета не отличается от методики, изложенной в § 3, гл. 7.).

5. Выполняют расчет системы водоохлаждения индуктора для того режима работы печи, в котором суммарные (тепловые и электрические) потери $P_{охл.}$ имеют максимальное значение. Расчет выполняют в полном соответствии с § 2, гл. 7.

6. Определяют энергетические характеристики печи и строят энергетический баланс плавильной установки (см. § 5, гл. 7).

Поскольку методика выполнения всех упомянутых выше (кроме п. 2) расчетов изложена в гл. 7, рассмотрим здесь лишь расчет печи в холодном режиме.

Расчет параметров индуктора при нагреве кусковой шихты.

Расчет основан на составлении схемы замещения индуктора с кусковой шихтой (в общем случае ферромагнитной) по методу, изложенному в гл. 7. Изменения касаются, главным образом, расчета сопротивления загрузки и замены параметров расплава на параметры шихты. Если шихта ферромагнитна, то расчет схемы замещения проводится методом последовательных приближений до сходимости результатов в пределах выбранной точности. Для немагнитной шихты в выполнении расчетов по методу последовательных приближений нет необходимости.

Кусковая шихта в первом приближении может быть представлена в виде совокупности эквивалентных цилиндров (см. гл. 4), расположенных вертикально в тигле, причем диаметр цилиндров численно равен характерному размеру среднего куска шихты $d_{ш.}$, а высота их равна расчетной высоте загрузки h_2^* . Предполагается, что электрический контакт между отдельными эквивалентными цилиндрами отсутствует.

1. Число эквивалентных цилиндров, имитирующих шихту и размещающихся в плавильном тигле диаметром D_2 , приближенно можно определить из выражения (см. гл. 4)

$$N_{ц} \approx \pi D_2^2 / 4 d_{ш.}^2. \quad (12-26)$$

2. Глубина проникновения тока в шихту, м:

$$\Delta_{ш} = 503 \sqrt{\rho_{ш} / \mu'_{ш} f}, \quad (12-27)$$

где $\mu'_{ш}$ — относительное значение магнитной проницаемости шихты, которое зависит от напряженности магнитного поля H (см. рис. 49). В начальной стадии расчета в условиях плавки в ИТП можно ориентировочно принять $\mu'_{ш} \approx 25 \div 30$, на каждой последующей стадии значение $\mu'_{ш}$ подлежит уточнению в соответствии с истинным значением H_0 .

3. Относительный радиус эквивалентного единичного цилиндра, м:

$$\bar{R}_{ш} = d_{ш} / \sqrt{2} \Delta_{ш}. \quad (12-28)$$

4. Активное сопротивление всей кусковой шихты (совокупности цилиндров), Ом/виток²:

при $\mu'_{ш} = 1,0$

$$r_{ш} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{d_{ш}^2}{\Lambda_{ш}^2 h_2^*} \rho_{ш} N_{ц} \Psi'_{ш}, \quad (12-29)$$

при $\mu'_{ш} > 1,0$

$$r_{ш} = 0,97 \frac{\pi d_{ш}^2}{\Lambda_{ш}^2 h_2^*} \rho_{ш} N_{ц} \Psi''_{ш}, \quad (12-30)$$

где Ψ'_a и Ψ''_a — значения вспомогательной функции Ψ_a , определяемые на рис. 23 для соответствующего значения $\bar{R}_{ш}$.

5. Внутреннее реактивное сопротивление шихты $x_{ш.в.}$, Ом/виток²:

при $\mu'_{ш} = 1,0$

$$x_{ш.в.} = r_{ш} \Psi'_p / \Psi'_a, \quad (12-31)$$

при $\mu'_{ш} > 1,0$

$$x_{ш.в.} = 0,71 r_{ш}, \quad (12-32)$$

где Ψ'_p определяется по рис. 23 для соответствующего значения $\bar{R}_{ш}$.

6. Реактивное сопротивление воздушного зазора, Ом/виток²:

$$x_3 = \frac{2\pi}{h_2^*} f \left(D_1^2 - \frac{\pi}{4} D_2^2 \right) 10^{-7}. \quad (12-33)$$

7. Реактивное сопротивление обратного замыкания определяется по формуле (7-11).

8. Коэффициент приведения параметров шихты к силе тока индуктора

$$C_{пр} = \frac{1}{\left(\frac{r_{ш}}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{ш.в} + x_3}{x_0}\right)^2} \quad (12-34)$$

9. Приведенные активное и реактивное сопротивления шихты, Ом/виток²:

$$r'_{ш} = C_{пр} r_{ш}, \quad (12-35)$$

$$x'_{ш} = C_{пр} \left[(x_{ш.в} + x_3) + \frac{(x_{ш.в} + x_3)^2 + r_{ш}^2}{x_0} \right], \quad (12-36)$$

10. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора с шихтой, Ом/виток²:

$$r_3 = r_1 + r'_{ш}; \quad (12-37)$$

$$x_3 = x_{1в} + x'_{ш}; \quad (12-38)$$

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2}. \quad (12-39)$$

11. Сила тока в индукторе в режиме плавки шихты, А:

$$I_1 = U_1 / z_3 w^2. \quad (12-40)$$

12. Напряженность магнитного поля у поверхности загрузки, А/м:

$$H_0 = I_1 w \sqrt{C_{пр}} / h_1. \quad (12-41)$$

13. Относительная магнитная проницаемость шихты определяется по рис. 49 или по формуле

$$\mu'_{ш} = B / \mu_0 H_0, \quad (12-42)$$

где B — магнитная индукция в шихте (для стали значение B определяется по рис. 72).

Если полученное значение $\mu'_{ш}$ значительно отличается от значения, принятого на предыдущей стадии расчета, то следует, подставив в уравнение (12-27), уточненное значение $\mu'_{ш}$, повторить расчет по формулам (12-27) — (12-42), найдя эквивалентные параметры индуктора с шихтой.

Если в результате расчета режима нагрева шихты выяснится, что потребляемая от источника мощность при этом выше, чем в номинальном горячем режиме, то следует предусмотреть возможность переключения витков индуктора при переходе от одного режима к другому или скорректировать величину напряжения для холодного режима.

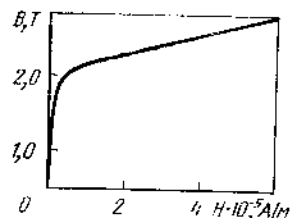


Рис. 72. Зависимость магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H , усредненная для разных марок сталей

Контрольные вопросы

1. Как определяется минимальная частота источника питания для печи при плавке в ней кусковой шихты без остаточной емкости?
2. Как определяется тепловой к. п. д. печи?
3. Чем отличается расчет при «холодном» режиме от расчета при «горячем» режиме тигельной печи?

ГЛАВА 13

КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННЫХ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ

Индукционная вакуумная плавка занимает особое место в качественной металлургии благодаря целому ряду достоинств. В индукционной вакуумной печи (ИВП) могут быть выплавлены сложные сплавы практически любого химического состава.

Заметное развитие этот вид плавки получил в связи с возросшими потребностями в качественных сплавах таких отраслей промышленности, как авиационная, атомная, радиоэлектроники, химического машиностроения и др.

В настоящее время в ИВП выплавляют сотни различных марок сталей и сплавов на основе железа, никеля, кобальта и других металлов. Благодаря универсальности метод выплавки сплавов в ИВП завоевывает все большую популярность.

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ

Индукционные вакуумные печи отличаются большим разнообразием конструкций и параметров.

По назначению ИВП можно условно разделить на три группы:

- 1) лабораторные печи;
- 2) печи для производства слитков;
- 3) печи для фасонного литья;

По основному конструктивному признаку они делятся на:

- 1) печи с индуктором, расположенным внутри вакуумной камеры (печи с металлической вакуумной камерой);
- 2) печи с индуктором, вынесенным за пределы вакуумного пространства (печи с неметаллической, как правило, кварцевой вакуумной камерой).

По характеру выполнения вакуумной камеры (корпуса печи) ИВП делятся на:

- 1) печи с вертикальной осью камеры;
- 2) печи с горизонтальной осью камеры;
- 3) печи с откатной камерой.

Наконец, по организации процесса плавки ИВП можно разделить на:

- 1) печи периодического действия;
- 2) печи полупрерывного действия.

В печах периодического действия после каждой плавки осуществляют разгерметизацию корпуса, открывают вакуумную камеру, вынимают изложницу со слитком или залитую форму, производят чистку тигля и загрузку в тигель новой порции шихты; затем устанавливают пустую изложницу или форму, печь закрывают, откачивают с помощью вакуумных насосов и проводят очередную плавку.

Печи полунепрерывного действия дают возможность проводить без разгерметизации печи не одну плавку, а серию плавок, длительность которой обычно определяется стойкостью плавильного тигля. В этих печах смена изложниц, а также загрузка печи осуществляются с использованием шлюзовых устройств — камер, отделяемых от основной (плавильной) камеры вакуумными затворами. Благодаря этому в основной камере производится плавка в вакууме, в то время как в камере изложниц или в камере загрузки при атмосферном давлении проводятся соответствующие операции по подготовке изложниц или по установке в загрузочном устройстве корзины с новой порцией шихты, подлежащей плавке.

Печи полунепрерывного действия имеют ряд преимуществ по сравнению с печами периодического действия, в частности:

устраняется необходимость откачки печи перед началом каждой плавки, что повышает фактическую производительность установки;

улучшаются условия работы футеровки плавильного тигля, поскольку в этих условиях она не испытывает длительных и глубоких колебаний температуры во время остывания печи;

исключаются потери времени на остывание изложниц или форм перед выемкой их из камер;

уменьшается окисление металла и его загрязнение из-за напуска в печь атмосферного воздуха.

В отличие от промышленных лабораторные печи обычно работают в периодическом режиме, так как при металлургических исследованиях вопросы снижения производительности не имеют существенного значения.

Дадим классификацию и краткую характеристику вакуумных печей по конструктивному исполнению.

ИВП с поворотной вакуумной камерой

Вакуумная камера (кожух) 3 (рис. 73, а) этих печей имеет возможность поворачиваться вокруг горизонтальной оси на угол до 90—100° С. Индуктор 1 с плавильным тиглем 2 жестко закреплены на кожухе. При повороте кожуха жидкий металл сливается через носок тигля в изложницу 4, закрепленную в кармане кожуха.

Токоподвод к индуктору осуществляется через патрубок 8.

Конструкция кармана 5 обеспечивает возможность качания изложницы вокруг горизонтальной оси. При этом изложница под действием собственного веса в процессе разливки постоянно занимает вертикальное положение, что уменьшает размывание ее

стенки струей расплава и позволяет получать слитки более высокого качества.

Печи такой конструкции имеют следующие недостатки:

- 1) необходимость поворота всей печи вместе с кожухом;
- 2) откачной патрубок, имеющий обычно довольно большой диаметр, необходимо выполнять с подвижным уплотнением, так как вакуумная система печи обычно стационарная.

Печи с поворотным тиглем и неподвижным кожухом

Печи этого типа (рис. 73, б) имеют ряд преимуществ перед предыдущими. В частности, отказ от поворотных уплотнений поз-

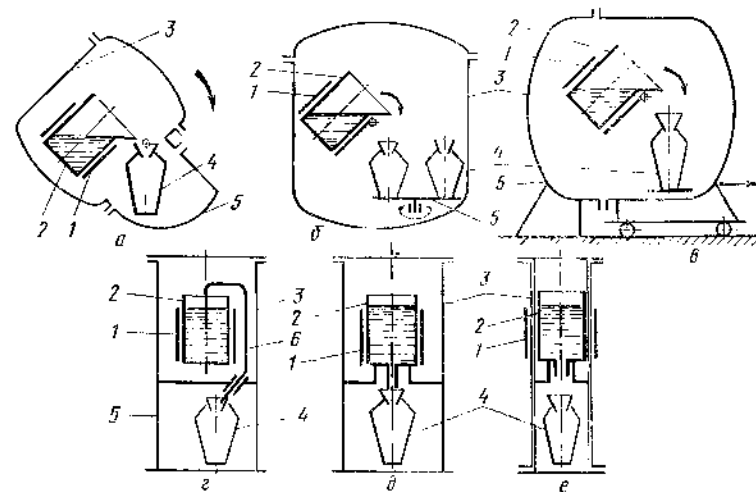


Рис. 73. Классификация индукционных вакуумных печей по конструктивному исполнению

воляет использовать мощные откачные системы, требующие откачные патрубки больших диаметров. Такие печи могут быть выполнены на большую емкость, так как кожух печи остается неподвижным при разливке.

Печь такого типа представляет собой неподвижную вакуумную камеру 3, внутри которой на поворотной платформе располагается индуктор 1 с плавильным тиглем 2. Узел индуктора через поворотное вакуумное уплотнение сравнительно небольшого диаметра соединен с механизмом наклона, расположенным вне вакуумной камеры. Выводы индуктора также проходят внутри поворотного уплотнения.

Из-за необходимости откачки камеры перед началом каждой плавки, а также охлаждения изложниц перед выемкой из печи фактическая производительность этих печей снижается. С целью увеличения производительности в некоторых печах разливка производится последовательно в несколько изложниц 4, установленных на поворотном столе 5.

Для увеличения механической прочности кожух печи обычно выполняют цилиндрическим (с вертикально или горизонтально расположенной осью), а днища и крышки кожуха полусферическими или эллиптическими.

Печи с поворотным тиглем внутри стационарного кожуха применяют для получения слитков и для фасонного литья. На корпусе печи устанавливают специальные загрузочные устройства, позволяющие вводить в расплав легирующие присадки для получения различных сплавов, и устройства, позволяющие отбирать пробы для экспресс-анализа в ходе плавки.

Печи с откатывающимся кожухом

Такие печи получили широкое распространение в последние годы. В печах этой конструкции (рис. 73, в) индуктор 1 с тиглем 2 жестко прикрепляется к неподвижной крышке 5 камеры, через которую проходит токоподвод индуктора, и на которой расположены откачной патрубок вакуумпривода и механизм наклона тигля. Кожух 3 печи на рельсах откатывается в сторону, открывая с трех сторон доступ к тиглю и индуктору, что существенно облегчает уход за ними и ремонт. Изложницы 4 или формы помещаются в корпусе печи.

Печи с сифонной разливкой металла из тигля

Тигель 2 в этих печах (рис. 73, г) неподвижен, а кожух разделен на две камеры 3 и 5, причем в верхней камере располагается индуктор 1 с тиглем 2, а в нижней — изложница или литейная форма 4. Изложница соединяется с плавильным тиглем с помощью огнеупорной трубы (сифона) 6. В процессе плавки в обеих камерах поддерживается необходимый вакуум. Для заливки металла в изложницу в плавильную камеру подают нейтральный газ, создавая в ней избыточное давление, под действием которого металл перетекает по сифону в изложницу.

Печи с донной разливкой металла

В этих печах (рис. 73, д) разливка металла осуществляется через отверстие в дне тигля. Тигель 2 с индуктором 1 при этом закреплены неподвижно в вакуумной камере 3, что способствует повышению стойкости футеровки. Разливка через дно способствует также улучшению качества слитка, поскольку образующиеся при плавлении шлаки, находящиеся на зеркале металла в тигле, не попадают в слиток, а остаются в тигле.

Эвакуация металла из плавильного тигля через отверстие в дне производится одним из следующих способов: применением стопорного устройства, через расплавляемую пробку или через скалываемую насадку.

В первом случае сливное отверстие закрывается стопором (пробкой), который в момент слива удаляется внутрь тигля или наружу. При удалении стопора внутрь тигля возможно размывание тянущего штока и дополнительное загрязнение расплава. Стопор должен плотно притираться к сливному отверстию, что создает герметичность при повторной его установке, поскольку отверстие

может в процессе разливки как размываться, так и зарастать.

Разливка через расплавляемую пробку осуществляется проще, однако при сливе металла нерасплавившаяся часть пробки может попасть в изложницу 4, нарушая однородность структуры слитка.

Разливку с применением скалываемой насадки обычно используют при плавке в графитовом тигле. В этом случае насадку выполняют в виде графитового стаканчика, по контуру которого сделана кольцевая проточка, облегчающая скалывание стаканчика в момент слива металла. Скалывание производится специальным штоком. Сколотая часть насадки, попадая в изложницу, всплывает на поверхность, и затем удаляется вместе с прибыльной частью слитка.

Печи с индуктором, расположенным вне вакуумной камеры

Вакуумные печи с индуктором, расположенным внутри вакуумной камеры (рис. 73, е), имеют, как правило, значительные габариты и сравнительно сложный узел токоподвода. Кроме того, к изоляции и конструкции индуктора предъявляются повышенные требования для обеспечения безопасности процесса из-за большей вероятности возникновения электрического пробоя в вакууме и возможного попадания воды в расплав при повреждении трубки индуктора. Этих недостатков не имеют индукционные вакуумные печи с индуктором 1, вынесенным за пределы вакуумной камеры 3.

Однако к кожуху такой печи предъявляются специфические требования: он должен быть выполнен из достаточно термостойкого неэлектропроводного и вакуумплотного материала. Во многих случаях кожух выполняется из кварцевого стекла. Поскольку промышленностью выпускаются кварцевые трубы сравнительно малого диаметра, емкость таких печей ограничена несколькими килограммами. Уплотнение кварцевой камеры осуществляется на верхнем и нижнем торцах. На крышках предусматриваются устройства для загрузки, патрубки для откачки и т. п. Между плавильным тиглем 2 и кварцевой трубой 3 имеется экранная тепловая изоляция, предотвращающая перегрев трубы. Индуктор устанавливается непосредственно за кварцевой трубой, с небольшим зазором, обеспечивающим разборность конструкции. Разливка металла производится в изложницу 4.

Электрический к. п. д. печей с вынесенным индуктором несколько ниже, чем у печей, рассмотренных выше, механическая прочность кварцевых труб также недостаточна. Поэтому такие печи имеют ограниченное применение — преимущественно для лабораторных исследований.

§ 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ

Вакуумная камера (кожух) печей с индуктором, расположенным внутри камеры, представляет собой обычно замкнутую металлическую обечайку (как правило, цилиндрической формы с го-

горизонтальной или вертикальной осью). Поэтому для уменьшения электрических потерь в кожухе, вызываемых магнитным потоком рассеяния, должны приниматься специальные меры. К этим мерам относятся:

выполнение кожуха из немагнитной листовой стали;
диаметр кожуха должен быть в 2—2,5 раза больше диаметра индуктора;

применяют магнитопроводы или медные экраны, предохраняющие кожух от нагрева.

Для предохранения от перегрева кожух и крышки печей охлаждаются водой. Применяют два варианта охлаждения:

1) к кожуху приваривают трубку (змеевик), по которой пропускают воду (в этом случае кожух выполняют однослойным, из немагнитной стали);

2) с помощью сплошной водяной рубашки, образованной внутренней и наружной обечайкой кожуха. В этом случае внутреннюю обечайку выполняют из немагнитной стали, а наружная может быть из обычной конструкционной стали.

Изнутри поверхность кожуха и крышек должна быть хорошо обработана (в некоторых случаях — отполирована) с целью облегчения откачки газов за счет уменьшения их адсорбции на шероховатой поверхности, а также для облегчения удаления с поверхности пеллета конденсата, образующегося в результате возгонки летучих компонентов из сплавов.

Откачная система печи. Типы вакуумных насосов, применяемых для откачки газов из печей, выбираются, исходя из требуемой глубины вакуума и количества откачиваемых газов. В индукционных печах различного назначения находят применение насосы следующих типов: механические (ротационные) для низкого и среднего вакуума (порядка 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст.), пароструйные (бустерные) для создания среднего и высокого вакуума (порядка 10^{-2} — $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.), и диффузионные высоковакуумные для создания вакуума порядка 10^{-1} — 10^{-7} мм рт. ст.

Бустерные и высоковакуумные насосы не могут выбрасывать откачиваемый газ непосредственно в атмосферу, поэтому к их выходным патрубкам подключают механические насосы, создающие предварительный вакуум (форвакуум) и выбрасывающие откачиваемый газ в атмосферу.

На рис. 74 для примера показана схема откачной системы вакуумной печи, включающей один бустерный *БН* и два ротационных *РВН* насоса. Предварительная откачка печи до давления 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. производится правым ротационным насосом, а окончательная откачка до давления 10^{-4} мм рт. ст. — блоком бустерного насоса и левого форвакуумного насоса *РВН*.

Индуктор вакуумной печи при расположении его внутри кожуха находится в гораздо более трудных условиях, чем в открытых тигельных печах. Это связано с возможностью возникновения электрического пробоя, так как электрическая прочность газовой

среды резко снижается при уменьшении давления в камере и достигает минимума (около 300 В) при вакууме порядка 1 мм рт. ст. Высокая температура расплава, а также наличие в камере конденсата (паров металла) еще более увеличивают вероятность возникновения электрического пробоя. Поэтому в индукционных печах стремятся снижать напряжение на индукторе, что неизбежно приводит к большим значениям рабочего тока и к возрастанию потерь энергии в индукторе и токоподводе.

В этих условиях индуктор должен иметь надежную, механически прочную и термически стойкую электрическую изоляцию. Обычно изоляцию выполняют в виде нескольких слоев кремнийорганического лака, наносимого на тщательно подготовленную и очищенную поверхность индуктирующего провода. Каждый последующий слой наносится после полного просыхания предыдущего. Поверх лака на индуктор наматывается несколько слоев специальной ленточной изоляции.

Существуют и другие способы изоляции индукторов ИВП: напыление на поверхность электроизоляционного огнеупорного слоя (например, плазменное нанесение окиси алюминия Al_2O_3), погружение индуктора в термостойкие смолы (например, эпоксидные) с последующей их запечкой и т. п.

С точки зрения исключения пробоя индуктор не должен иметь острых углов, граней и резких переходов от одного сечения к другому, а также резьбовых соединений внутри камеры. Поэтому, например, не допускается шпильчатое крепление витков индуктора (рис. 63), а используется, как правило, стяжная конструкция (рис. 75): все витки индуктора *1* стягиваются с помощью верхних 2 и нижних 3 фланцев, и вертикальных стоек 4, выполненных, например, из стеклотекстолита. При необходимости перехода с одного сечения на другое (см., например, узел уплотнения 5) переход осуществляется плавно. Места сварки и пайки тщательно зачищаются.

Серьезные требования предъявляются также к жесткости индуктора, так как относительные взаимные перемещения соседних витков ведут к повреждению изоляции и к возникновению электрического пробоя. В некоторых случаях для обеспечения жесткости производят заливку индуктора в жаростойкий бетон.

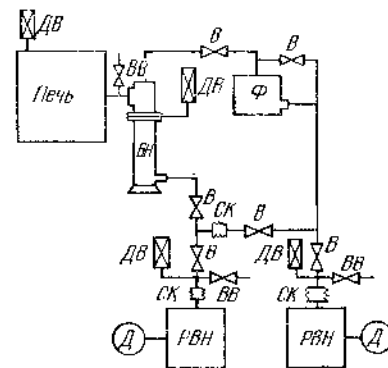


Рис. 74. Схема откачной системы вакуумной печи:

Ф — фильтр; В — вентиль или затвор;
РВН — ротационный вакуумный насос;
СК — силовый конденсатор;
ДВ — датчик вакуумметра; БН — бустерный насос; Д — дифференциальный насос.

Для уменьшения электрических потерь в кожухе в месте токоподвода в камеру в тех случаях, когда это возможно, стремятся выполнять токовод коаксиальным.

Футеровка печи. Как правило, индукционные вакуумные печи выполняются с набивным тиглем, к которому предъявляются повышенные требования: материалы, используемые для набивки, должны иметь минимальные газовыделения при рабочей температуре, не должны образовывать летучие, легко диссоциирующие с расплавом соединения и т. п.

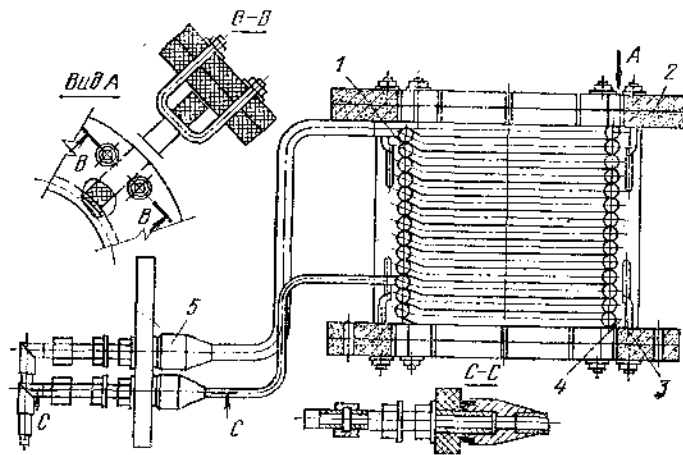


Рис. 75. Конструктивное исполнение индуктора вакуумной печи

В качестве исходных материалов для футеровки ИВП чаще всего используются окись алюминия, окись магния и двуокись циркония. Конкретные составы футеровочных масс определяются маркой выявляемого сплава и емкостью тигля. Наиболее распространенными материалами для тиглей при выплавке жаропрочных сплавов в ИВП емкостью до 2,5 т являются смеси плавного магнетита и электроплавленного корунда.

Плавильные тигли для печей большой емкости могут изготавливаться из огнеупорных кирпичей с заполнением швов специальными обмазками.

Устройства для загрузки шихты и присадок. Загрузка печей периодического действия производится при снятой крышке, когда печь заполнена воздухом, поэтому устройства для загрузки шихты мало отличаются от аналогичных устройств для открытых печей.

Для загрузки полунепрерывных печей без нарушения вакуума печь оборудуется загрузочной шлюзовой камерой, которая через вакуумный затвор соединяется с плавильной камерой. Внутри загрузочной камеры на тросе или на цепи подвешивается загрузоч-

ная корзина, выполненная из тонколистовой стали. Дно корзины выполняется из отдельных лепестков, скрепляемых проволокой из легкоплавкого металла. При опускании корзины в тигель проволока, скрепляющая лепестки, плавится, они под действием веса шихты раскрываются и шихта высыпается в тигель.

Для предварительного подогрева шихты в загрузочной камере устанавливаются нагревательные элементы и металлические тепловые экраны, предохраняющие стенки камеры от чрезмерного нагрева. Загрузочная камера монтируется обычно на поворотном кронштейне, что позволяет отводить ее в сторону при загрузке корзины в камеру и выгрузке из нее.

В процессе вакуумной плавки для получения сплавов нужного химического состава в расплавленный металл нужно вводить различные твердые добавки (присадки). Их загрузка осуществляется с помощью дозаторов, обычно представляющих собой цилиндрический сосуд, разделенный на секции, причем число секций равно или больше числа вводимых присадок. В каждую секцию закладываются отдельные компоненты в той последовательности, в какой они должны поступать в расплав. Поворотом рукоятки, установленной на крышке дозатора, на определенный угол опорожняют поочередно секцию за секцией, вводят таким образом присадки в расплав. Известны также и другие конструкции дозаторов.

Механические манипуляторы различного назначения (для ликвидации образующихся «мостов», для осаживания зависшей шихты, для зачистки стенок тигля и т. п.) выполняются обычно в виде водоохлаждаемого штока, совершающего возвратно-поступательные и вращательные движения в шаровых вакуумных уплотнениях. На конце штока может закрепляться сменный рабочий инструмент. Для наблюдений за манипуляциями внутри печи во время плавки вакуумная камера оснащается одной или несколькими гляделками, а иногда и внутренней подсветкой.

Устройства для замера температуры и взятия проб жидкого металла конструктивно похожи. Они представляют собой трубчатые штоки (иногда — охлаждаемые), имеющие на концах зажимные приспособления для крепления термометры или пробирки для взятия пробы на экспресс-анализ. Пробирка и шток термометра могут быть выполнены из кварца или другого огнеупорного материала.

Термометры (их называют термометрами кратковременного погружения) обычно предназначены не для постоянного (длительного) замера температуры металла, а лишь для контроля работы радиационного пирометра, объектив которого смонтирован на одной из гляделок, имеющей приспособления для очистки стекла от конденсата.

С целью извлечения взятой пробы из вакуумной камеры описанные устройства размещаются в специальном «кармане», отделенном от камеры вакуумным затвором.

§ 3. ПАРАМЕТРЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ

Всесоюзным научно-исследовательским институтом электро-термического оборудования (ВНИИЭТО) разработана серия вакуумных индукционных печей для лабораторных и промышленных целей.

Литейные печи широко распространены в черной и цветной металлургии, в машиностроении и других отраслях промышлен-

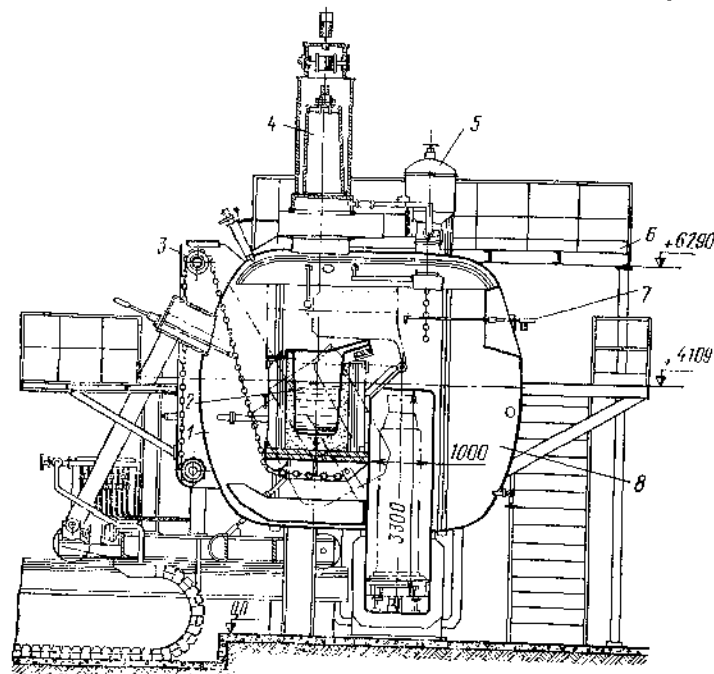


Рис. 76. Индукционная вакуумная печь полупрерывного действия емкостью 2,5 т (ИСВ-2,5 НИ)

ности. В этих печах производят простые отливки, литье по выплавляемым моделям, центробежное литье, в них отливают детали турбин авиационных двигателей из жаропрочных сплавов. Этот класс печей характеризуется высокой скоростью плавления благодаря большой удельной мощности. Оптимальным считается такой режим работы печи, когда продолжительность плавления и дегазации примерно одинаковы.

Наиболее крупные отечественные вакуумные печи, работающие в промышленности — это печи полупрерывного действия емкостью 1 и 2,5 т: ИСВ-1, ОНИ и ИСВ-2,5НИ. Они аналогичны по конструкции и различаются только емкостью тигля и вакуумной системой.

Вакуумная камера печи (рис. 76) состоит из двух частей: неподвижного горизонтально расположенного цилиндрического кор-

пуса 8 с глухой торцевой полусферической крышкой и подвижной крышки 1, установленной на самоходной тележке с электроприводом. На подвижной крышке, наклоняемой с помощью механизма 3, на кронштейнах смонтирован индуктор с плавильным тиглем 2. Индуктор имеет четыре или восемь катушек с отпайкой. Плавильный тигель оснащен сигнализатором состояния футеровки тигля.

Сверху на камере расположен ломик для пробивки образующихся мостов; телескоп радиационного пирометра для измерения температуры расплава; дозатор 5, состоящий из восьми секций (емкость каждой секции 12 л). Камера загрузки 4 с механизмом подъема загрузочной корзины смонтирована на поворотной колонне с траверсой. На противоположном конце траверсы смонтировано устройство для измерения температуры. Камера загрузки и устройство для измерения температуры могут попеременно устанавливаться над вакуумным затвором, отделяющим их от плавильной камеры. Подача загрузочной корзины осуществляется по рольгангу.

На глухой крышке установлен ломик 7 для зачистки тигля. Внутри кожуха размещается механизм перемещения тележки с изложницами. Камера изложниц 9 прямоугольной формы через вакуумный затвор соединена с корпусом печи. Рядом с камерой изложниц установлен специальный стенд, предназначенный для установки тележки с изложницами перед их закатыванием в камеру и после выхода из печи. Обслуживание печи производится с рабочей площадки 6.

Печь ИСВ-1, ОНИ питается от двух машинных преобразователей частоты мощностью по 500 кВт каждый, включенных параллельно, типа ВГО-500-1000. Печь ИСВ-2,5НИ питается от преобразователя ВГВФ-1500-1000 мощностью 1500 кВт. Обе печи работают на частоте 1000 Гц.

§ 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОЙ ВАКУУМНОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ

Весь цикл плавки в индукционной вакуумной печи состоит из следующих основных этапов:

- а) загрузки твердой шихты или заливки жидкого металла;
- б) откачки печи до рабочего давления;
- в) расплавления загруженной шихты и догрузки дополнительных порций шихты, не вошедших в тигель при первой загрузке;
- г) рафинирования жидкого металла;
- д) легирования металла и раскисления;
- е) разливки металла из тигля.

Продолжительность отдельных операций различна и зависит от мощности и емкости печи и принятого технологического процесса. Для примера ниже приведены данные о длительности различных операций (в процентах к общей длительности) для случая

выплавки стали в печи емкостью 0,5 т (общая длительность процесса 3,5 ч).

Откачка	4,2
Загрузка	2,4
Расплавление	70,0
Рафинирование	18,7
Выпуск	2,4
Чистка тигля	2,3

Рассмотрим подробнее технологические операции.

Загрузка печи. Индукционные вакуумные печи могут работать как на твердой шихте, так и на жидком полупродукте.

В качестве твердой шихты применяют отходы прокатного производства, собственные литейные отходы, мелкую шихту. Перед загрузкой шихта подвергается дробеструйной очистке для удаления поверхностных загрязнений. Для удаления влаги и масла может производиться предварительный подогрев и прокалка шихты. Поскольку в вакуумной печи труднее предотвратить образование «мостов», чем в открытых тигельных печах, объем твердой шихты, единовременно загружаемой в тигель, не может превышать объем жидкого металла более чем в 1,2—1,3 раза. Поэтому обычно шихту загружают двумя-тремя корзинами. Необходимо предусматривать защиту тигля от ударов массивными кусками шихты.

Крупные печи в настоящее время работают на жидком полупродукте. В качестве полупродукта применяют полураскисленную сталь, выплавленную в открытой дуговой печи. Перед заливкой тигель подогревают до 700° С. Для устранения разбрызгивания металла заливку в тигель осуществляют через специальную трубу, повышая давление в камере перед заливкой. При работе печи на жидком полупродукте длительность процесса уменьшается примерно в два раза.

Расплавление шихты. После загрузки шихты и создания в камере требуемого давления подают напряжение на индуктор и осуществляют нагрев и плавление шихты, продолжая производить откачку выделяющихся газов в процессе плавки. При переплавке отходов стали наблюдается бурное газовыделение при переходе металла в жидкое состояние. Слишком быстрое расплавление в этом случае приводит к «кипению» жидкой ванны, к выбросу расплава из тигля. Поэтому скорость плавления должна соответствовать производительности вакуумных насосов печи. Образующиеся в процессе плавки «мостики» разрушают с помощью специального инструмента.

Рафинирование и раскисление металла. После расплавления всей шихты проводят технологические операции, необходимые для удаления из металла растворенных в нем газов, углерода, серы, примесей цветных металлов. Одновременно происходит раскисление расплава содержащимся в нем углеродом благодаря взаимодействию его с растворенным в металле кислородом. Выдержка для раскисления под вакуумом обычно производится до полного успокоения ванны (прекращения «кипания»).

Чем дольше расплав выдерживают под вакуумом, тем больше удаляется из него вредных газов и летучих компонентов. Однако увеличение выдержки приводит к загрязнению сплава кислородом и неметаллическими включениями, образующимися в результате взаимодействия расплава с футеровкой тигля. Чем выше температура, тем интенсивнее взаимодействие расплава с футеровкой. В то же время, чем выше температура, тем с большей скоростью протекают процессы рафинирования. Поэтому для каждого сплава существует оптимальный режим рафинирования.

Раскисление металла может производиться также с помощью водорода, который продувают через жидкую ванну, либо путем введения в расплав металлических раскислителей, таких как алюминий, алюминий с церием, кальций или магний в виде лигатур с никелем (для раскисления сплавов на никелевой основе).

Легирование. В процессе выдержки под вакуумом производят легирование металла введением в расплав легирующих присадок, в качестве которых могут применяться хром, ванадий, кальций, бор, редкоземельные металлы. Сначала вводят более тугоплавкие компоненты, а ближе к концу процесса — более легкоплавкие присадки. При этом отводят некоторое время для того, чтобы неметаллические включения успели всплыть на зеркало ванны.

Разливка металла. Разливку готового сплава осуществляют, как правило, в вакууме (в некоторых конструкциях разливка производится на открытом воздухе). В некоторых случаях с целью повышения плотности отливок разливку жаропрочных сплавов (особенно при получении сложных и тонкостенных фасонных отливок) производят после подачи инертного газа в печь. Разливку осуществляют через дно или наклоном тигля в зависимости от конструкции печи (см. рис. 73).

Применение электромагнитного перемешивания металла. Серьезным вопросом, особенно при выплавке сплавов в крупных ИВП, является перемешивание жидкой ванны. Опыт эксплуатации вакуумных печей, работающих на повышенной частоте, показал, что на частотах от 1,0 до 8,0 кГц интенсивность перемешивания недостаточна, в результате чего ухудшается качество отливок. Поэтому для интенсификации массообменных и физико-химических процессов в печах применяют специальные устройства электромагнитного перемешивания (УЭМП), питающиеся от сети 50 Гц, и работающие либо одновременно с плавильным индуктором, либо последовательно — после окончания процесса плавления. Индуктор УЭМП обычно выполняется двух- или трехфазным — при этом создается одноконтурное движение расплава в тигле (см. рис. 33, справа).

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества печей полупрерывного действия перед печами периодического действия?
2. Назовите основные конструктивные узлы индукционных вакуумных печей.
3. Из каких операций состоит процесс вакуумной плавки?

МЕТОДЫ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ ОСОБО ЧИСТЫХ И АГРЕССИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Значительно возросшая в последние годы потребность в полупроводниковых материалах, металлах высокой чистоты, сплавах на основе химически активных и тугоплавких металлов, а также в плавленых огнеупорных материалах повышенной чистоты, получение которых в печах с керамической футеровкой практически невозможно, привела к разработке ряда новых методов индукционной плавки и соответствующих типов индукционных установок, обеспечивающих плавку упомянутых выше материалов без каких-либо загрязнений и при гораздо более высоких температурах, чем это позволяют делать печи с футерованной емкостью (ИТП или ИКП).

§ 1. ИНДУКЦИОННАЯ ГАРНИССАЖНАЯ ПЛАВКА

Гарниссажной называют плавку, при которой расплавленный металл соприкасается только с твердой фазой того же химического состава, что и расплав, исключаяющий его непосредственный контакт с конструктивными элементами тигля.

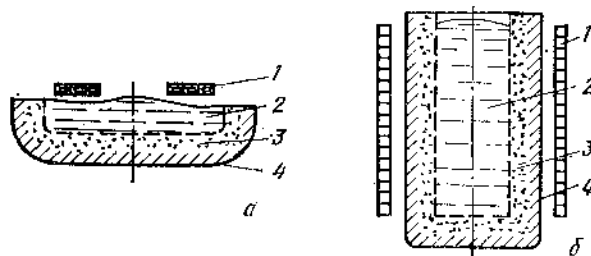


Рис. 77. Схемы индукционной гарниссажной плавки: а — нагрев сверху; б — нагрев сбоку; 1 — индуктор; 2 — расплав; 3 — гарниссаж; 4 — охлаждаемая поверхность

Известны две схемы индукционной гарниссажной плавки, отличающиеся методом подведения энергии: через открытое зеркало ванны, минуя гарниссаж (рис. 77, а), или через боковую поверхность загрузки — сквозь гарниссаж (рис. 77, б). В последнем случае обеспечивается хорошая магнитная связь индуктора с загрузкой.

Достоинством первой схемы является отсутствие электрических потерь в гарниссаже. По тепловой и технологической схемам она не отличается от других видов гарниссажной плавки с верхним вводом тепла (дуговой, электроннолучевой, плазменной и др.). В то же время из-за низкого электрического к. п. д., обусловлен-

ного плохой магнитной связью торцевого индуктора с загрузкой, этот метод плавки не находит практического применения.

При введении энергии через боковой гарниссаж, наоборот, проявляются достоинства, присущие индукционной плавке, в частности, достигается равномерность температурного поля по высоте расплава.

При индукционной гарниссажной плавке металла с подведением 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 малоэлектро- и теплопроводными и выполняют функцию футеровки. Аналогичный способ используется для плавки огнеупорных материалов.

Однако практическая реализация индукционной гарниссажной плавки с боковым подводом энергии через гарниссаж в чистом виде также затруднена. Значительно более перспективным оказался процесс плавки материалов в холодном тигле (см. § 5).

§ 2. ИНДУКЦИОННАЯ СТРУЙНАЯ ПЛАВКА

В этом методе (рис. 78) исходный материал в виде чешуек, губки, порошка или гранул прессуется в заготовки — стержни 1, которые затем перемещаются с определенной скоростью через индуктор 2. В индукторе происходит оплавление конца стержня, и жидкий металл 3 каплями или (при достаточной мощности индуктора) непрерывной струей стекает в изложницу или в охлаждаемый кристаллизатор 4, образуя слиток нужного размера. Такой метод переплава может быть назван индукционным струйным (иногда его называют капельным) переплавом (ИСП). По назначению и схеме осуществления он полностью идентичен широко используемому в промышленности вакуумному дуговому переплаву (ВДП). 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 оплавляемом стержне (интенсивное охлаждение верхнего торца).

Нагрев и расплавление заготовки при ИСП происходят благодаря протеканию индуктированного (кольцевого) тока по боковой

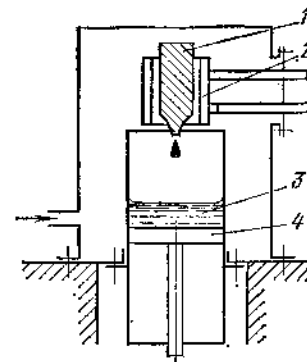


Рис. 78. Схема индукционной струйной плавки

поверхности заготовки на глубине, равной глубине проникновения. Поэтому оплавление стержня, перемещаемого сквозь индуктор, происходит также и по боковой поверхности, в отличие от ВДП, где расходимый электрод оплавляется только с торца. По мере оплавления жидкий металл стекает вниз по заготовке и отрывается под действием сил 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 низкой частоты приводит к образованию на оплавляемой 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 2,4 — 220 кГц.

§ 3. ПЛАВКА ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ

Наибольшую чистоту процесса обеспечивает индукционная плавка в специальном индуктирующем устройстве, в котором жидкий металл свободно висит в пространстве, удерживаемый электромагнитными силами (рис. 79).



Рис. 79. Плавка металла во взвешенном состоянии:
1 — индуктор; 2 — расплав

Физические особенности метода. Суть метода индукционной плавки во взвешенном состоянии (иногда ее называют плавкой в электромагнитном тигле) состоит в следующем. В индуктор или в систему индукторов, создающих переменное магнитное поле определенной конфигурации, помещают кусок металла, подлежащий плавлению. При включении питания индуктора и достаточно большой силе взаимодействия между токами, индуцированными в металле, и магнитным полем индуктора возникает состояние парения металла в магнитном поле. При этом металл стремится занять зону с минимальной напряженностью магнитного

поля (эту зону принято называть потенциальной ямой). При выходе металла из этой зоны силы отталкивания увеличиваются и металл возвращается в исходное положение. Если мощность, подводимая к индуктору, достаточна, металл расплавляется в высокочастотном поле и продолжает парить (висеть) 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 весу металла, а напряженность поля увеличивалась в радиальном направлении от оси к периферии.

Одной из основных особенностей метода, с которыми приходится считаться при его практическом осуществлении, является то обстоятельство, что независимо от конструкции индуктора, в силу вихревого характера поля, существуют зоны ослабленного поля и так называемые особые линии или точки, в которых вес жидкого металла не может быть уравновешен электромагнитным давлением. При этом невозможно создать электромагнитный тигель, у которого особые точки располагались бы только сверху, т. е. невозможно избежать «щелей» в нижней части электромагнитного тигля. Жидкий металл удерживается во взвешенном состоянии и не выливается через эти «щели» лишь благодаря силам поверхностного натяжения.

Экспериментальные исследования показали, что жидкий металл будет висеть, если глубина проникновения поля Δ меньше или равняется радиусу кривизны поверхности в нижней точке его объема R_n , вычисленному по формуле:

$$\rho gh = 2\sigma \left(\frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_b} \right)$$

и вытечет из поля, если $\Delta > R_n$.

Для взвешенной плавки применяют частоты от 66 до 440 кГц.

В случае бестигельной плавки изменение подводимой к индуктору мощности приводит к изменению положения тела в индукторе. При этом вследствие неоднородности магнитного поля индуктора, конфигурация поля и его значение у поверхности тела меняются, а следовательно, меняется и значение действующей на него силы, и мощность, выделяющаяся в теле. Поэтому количественные соотношения, определяющие потребление активной мощности металлом для конкретных конструкций индуктора, получают эмпирическим или полумэмпирическим путем.

Индукторы для взвешенной плавки. В первых промышленных устройствах для плавки во взвешенном состоянии была использована лишь одна катушка. Однако стабилизация расплава в этих условиях была недостаточной и даже малое возмущение могло привести к выбросу металла из поля. Поэтому основное внимание при конструировании конкретных индукторов уделяется созданию неоднородного магнитного поля с ярко выраженной «потенциальной ямой».

В результате теоретических и экспериментальных работ было установлено, что взвешенную каплю удастся стабилизировать введением второй катушки, коаксиальной первой и расположенной сверху над расплавом, причем направления токов в катушках должны быть противоположны. В некоторых случаях верхнюю катушку заменяют проводящим замкнутым кольцом (короткозам-

кнутым витком). Индуцированный в нем ток приводит к созданию необходимого локализованного стабилизирующего поля.

При создании плавильного устройства важно обеспечить максимальную надежность его работы.

Наименее надежными элементами установки оказались многовитковые индукторы. Поэтому, несмотря на то, что такие индукторы обеспечивают лучшее согласование с высокочастотным генератором и более высокий к. п. д., чем индукторы с малым числом витков, они применяются реже.

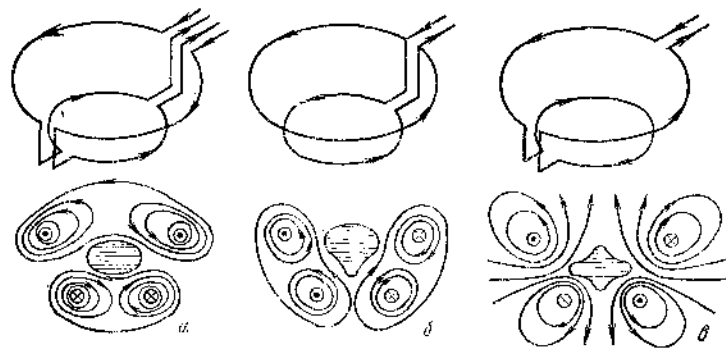


Рис. 80. Схема протекания тока и магнитное поле индуктора-лодочки (а), индуктора с параллельным (б) и с последовательным (в) обратным витком

Разработано несколько типов индукторов с минимальным числом витков, питаемых большим током при низком напряжении, что обеспечивает значительно более высокую надежность в условиях вакуума. На практике используются в основном следующие три конструкции: индуктор-лодочка (рис. 80, а); индуктор с обратным витком (рис. 81, б и в); и индуктор с короткозамкнутым витком.

На рис. 80 схематически показаны токи в индуктирующем витке и силовые линии магнитного поля, наиболее часто применяемых типов индуктирующих систем.

Индуктор-лодочка представляет собой систему из двух витков, поставленных рядом один с другим, причем направление тока в одноименных проводниках одинаково (рис. 80, а).

В индукторе с обратным витком в любых двух соседних проводниках текут противоположно направленные токи. Конструктивно он может быть выполнен из двух отдельных витков, расположенных друг над другом и включенных параллельно (индуктор с параллельным обратным витком, рис. 80, б) или последовательно (индуктор с последовательным обратным витком, рис. 80, в).

Максимальный вес расплава, удерживаемого во взвешенном состоянии, не превышает нескольких десятков грамм, поэтому

метод не нашел промышленного применения. Зато он широко используется в лабораториях при физико-химических исследованиях металлов и сплавов.

§ 4. ЗОННАЯ ПЛАВКА

Основные технологические процессы, осуществляемые методом зонной плавки. 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 перемещается 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 образца очищается. Степень очистки тем выше, чем больше число проходов (число единичных зон, прошедших через образец).

Зонная очистка может быть использована как для удаления из образца вредных примесей, так и для концентрирования нужных примесей (например, для аналитического определения малых количеств примесей, не поддающихся определению обычными методами). С помощью метода зонной очистки удалось довести чистоту множества химических веществ до уровня, недостижимого другими средствами, причем для ряда материалов полученная чистота позволила впервые определить их истинные свойства.

Второй 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 (и, 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 уже находит промышленное применение.

Имеется еще одна разновидность зонной плавки, получившая название зонной плавки с градиентом температуры. Этот вид плавки значительно отличается от описанных выше. Жидкая зона здесь имеет форму листочка, проволоочки или точки с минимальными размерами порядка сотых долей миллиметра. Содержание примеси в зоне достигает обычно 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, налагаемого в сечении загрузки. Эта разновидность зонной плавки используется для бестигельного выра-

щивания монокристаллов, изучения диффузии в жидкостях и измерения ее скорости, 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.

В силу описанных особенностей метод зонной плавки оказался исключительно эффективным при получении полупроводниковых материалов — от простых (германий и кремний) до сложнейших в технологическом отношении соединений (арсенид галлия, фосфиды галлия и индия и др.). Использование метода для глубокой очистки различных металлов оказалось также весьма успешным. В настоящее время зонная плавка применяется для очистки почти всех используемых на практике металлов. Известно много примеров применения зонной плавки при решении задач физической химии, теории твердого тела, геохимии и т. д.

Таким образом, зонная плавка представляет собой мощное средство управления распределением примесей в кристаллах и может быть использована для всех веществ, которые можно расплавить без разложения и для которых характерна неодинаковая концентрация примеси в расплаве и в твердой фазе.

Физические особенности метода. Для всех разновидностей метода зонной плавки характерно медленное перемещение узкой расплавленной зоны через сравнительно длинный твердый образец, в результате чего достигается перераспределение примесей.

Перемещающаяся по слитку расплавленная зона имеет две поверхности раздела между жидкой и твердой фазами — плавящуюся и затвердевающую. Способность зоны перераспределять примеси обусловлена главным образом процессами на затвердевающей поверхности. На плавящейся поверхности твердое вещество смешивается с содержимым зоны. На затвердевающей поверхности концентрация примеси в только что закристаллизовавшейся части обычно отличается от ее концентрации в жидкости. Если примесь понижает температуру плавления растворителя, то ее концентрация в затвердевшей части будет меньше, чем в жидкой. В этом случае примесь будет оттесняться затвердевающим веществом и собираться в жидкой зоне. Если примесь повышает температуру плавления растворителя, то ее концентрация в затвердевшей части будет больше, чем в жидкой. Таким образом, при перемещении фронта кристаллизации одни примеси как бы оттесняются от него, а другие как бы притягиваются к нему.

Задача создания и сохранения жидкой зоны при зонной плавке сводится к установлению в узком участке стержня максимальной температуры, превышающей температуру плавления твердой фазы, и сохранения холодных участков с температурой ниже температуры плавления твердой фазы — по обе стороны от этого участка. Исключение составляет зонная плавка с градиентом температуры, при которой в зоне не устанавливается максимальная температура.

Индукционный метод нагрева позволяет проводить очистку как в вакууме, так и в любой защитной атмосфере, исключает возможность загрязнения обрабатываемого материала, обеспечивает достаточно высокую концентрацию подводимой мощности. За счет электромагнитных сил происходит непрерывное и интенсивное перемешивание расплава в зоне, которое облегчает диффузию примеси от фронта кристаллизации в глубь расплава и позволяет значительно увеличить скорость движения зоны, а значит, и производительность процесса.

Как правило, для зонной плавки используются относительно высокие частоты (200 кГц — 5,0 МГц).

При индукционном методе нагрева существует по крайней мере три способа осуществления процесса зонной плавки: в неохлаждаемом контейнере, в охлаждаемом контейнере, бестигельная зонная плавка.

Первый способ пригоден лишь для веществ с относительно низкой температурой плавления. Плавка в охлаждаемом контейнере аналогична индукционной плавке металла в холодном тигле.

Наибольший интерес с точки зрения чистоты процесса представляет последний из упомянутых способов, реализуемый на практике в двух видах: при вертикальном и при горизонтальном перемещении жидкой зоны.

Вертикальная бестигельная плавка. При этом методе индуктор создает расплавленную зону, которая удерживается на месте электромагнитными силами и силами поверхностного натяжения (рис. 81, а). Метод бестигельной зонной плавки широко применяется при получении и обработке кремния, часто используется в лабораторных исследованиях тугоплавких металлов, полупроводниковых материалов и различных неорганических соединений.

При бестигельной зонной плавке уменьшение длины зоны позволяет увеличить диаметр обрабатываемого слитка. При этом возрастает производительность. Для того чтобы энергию высокочастотного поля сконцентрировать на небольшом участке вертикального стержня, применяют в основном четыре типа индуктирующих систем:

низкий индуктор с минимальным числом витков (один-два витка из круглой трубки малого диаметра или из сплюсненной трубки);

плоский многovitковый индуктор — спираль;

индуктор с противовитками или с короткозамкнутыми витками, расположенными над и под индуктором;

высокий многovitковый индуктор в сочетании с разрезным концентратором магнитного поля.

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

Горизонтальная бестигельная зонная плавка. Суть этого метода состоит в следующем. Образец, жестко закрепленный в держате-

лях, размещен горизонтально. Вдоль по образцу пропускают постоянный ток. В месте создания расплавленной зоны накладывают постоянное магнитное поле, направленное горизонтально и перпендикулярно к оси образца (рис. 81, б). Подбирая величину силы тока и напряженность магнитного поля можно полностью уравновесить силу тяжести. Таким образом, удастся получить стабильную зону. Расплавление рабочей зоны осуществляют при помощи специального независимого нагревателя.

Устойчивость расплавленной зоны можно повысить, располагая ее между двумя полюсами магнита, расположенными ниже оси

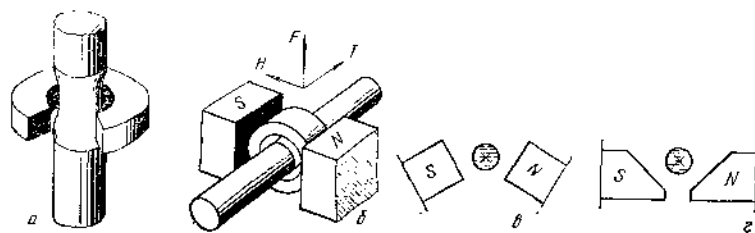


Рис. 81. Бестигельная зонная плавка:
а — вертикальная; б—г — горизонтальная

стержня и под углом один к другому (рис. 81, в), или между скошенными полюсами (рис. 81, г). В этом случае расплав принимает в поперечном сечении форму овала и устойчив в вертикальном направлении.

§ 5. ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА В ХОЛОДНОМ ТИГЛЕ

Физические особенности процесса. Индукционная плавка в холодном тигле представляет собой разновидность плавки, при которой энергия электромагнитного поля передается расплаву через металлический (обычно медный) охлаждаемый тигель (рис. 82). Температура тигля в процессе плавки поддерживается достаточно низкой для исключения взаимодействия расплава с материалом тигля.

При плавке металлов на средней частоте, т. е. при ярко выраженном поверхностном эффекте, между боковой поверхностью холодного тигля и расплавом образуется тонкий слой микрогарниссажа, толщина которого составляет доли миллиметра. Микрогарниссаж снижает тепловые потери от расплава к стенке тигля. Дальнейшее снижение тепловых потерь может быть достигнуто благодаря частичному (рис. 82, б) или полному (рис. 82, в) отжатию расплава от стенок тигля с помощью магнитного поля индуктора. Во втором случае в принципе можно вообще отказаться от боковых стенок тигля, оставив лишь охлаждаемое основание.

Холодные тигли всегда выполняются с продольными (по отношению к полю) разрезами, препятствующими замыканию в них

кольцевых токов, экранирующих загрузку. В зависимости от числа разрезов (секций) тигли по конструкции можно условно разбить на:

- 1) малосекционные (рис. 83, а и б), у которых азимутальный размер секции значительно больше радиального;
- 2) многосекционные или трубчатые (рис. 83, в), у которых радиальный и азимутальный размеры секции близки друг другу;
- 3) пластинчатые или шихтованные (рис. 83, г), у которых азимутальный размер одной секции меньше глубины проникновения тока в материал тигля.

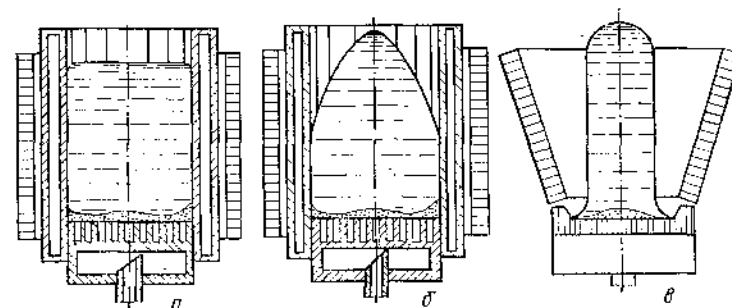


Рис. 82. Индукционная плавка в холодном тигле при наличии контакта расплава с тиглем (а), при частичном (б) и полном (в) электромагнитном отжатии расплава

Внутренняя поверхность тигля, прилегающая к расплаву, может непосредственно контактировать с расплавом (рис. 83, а и в) или покрываться слоем изоляции (рис. 83, б). В последнем случае обычно используется плазменное нанесение на металлическую стенку тонкого слоя (толщиной 20—200 мкм) окиси алюминия или двуокиси циркония.

На рис. 83 показана идеализированная схема протекания электрического тока в системе индуктор — тигель — расплав как при отсутствии (рис. 83, б), так и при наличии (рис. 83, а, в, г) электрического контакта расплава с тиглем. Картина протекания тока, показанная на рис. 83, б, имеет место в следующих практических случаях: при нанесении на внутреннюю поверхность тигля слоя окиси алюминия или двуокиси циркония; при электромагнитном отжатии расплава от стенок тигля; при наличии на стенке слоя неэлектропроводного гарниссажа или слоя шлака.

В индукционных печах с холодным тиглем (ИПХТ) могут быть осуществлены различные схемы технологических процессов:

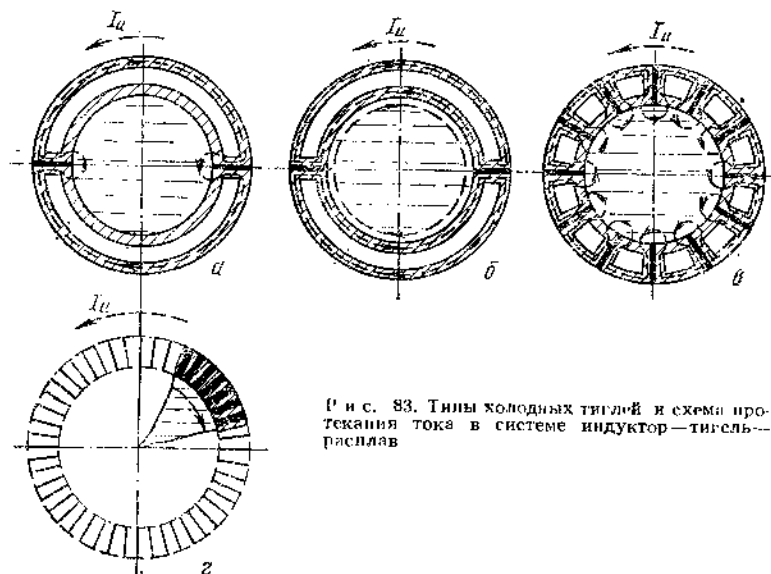
накопление расплава в тигле с последующей разливкой его наклоном тигля через сливной носок (рис. 84, а);

наплавка слитка в глухой тигель-кристаллизатор с последующей выемкой слитка из тигля (рис. 84, б);

непрерывное вытягивание слитка из тигля-кристаллизатора (рис. 84, в);

накопление расплава в тигле с последующей разливкой его через дно тигля (рис. 84, з).

Энергетические характеристики ИПХТ. Как легко можно видеть из рис. 83, в условиях ИПХТ холодный тигель и загрузка должны рассматриваться как единая электромагнитная система. При этом холодный тигель оказывает очень серьезное влияние на величину мощности, выделяющейся в жидкой загрузке. Так, например, в малосекционном тигле, не имеющем изоляционного слоя на внутренней поверхности (рис. 83, а), мощность, выделяющаяся в расплаве, весьма мала, так как магнитное поле индуктора



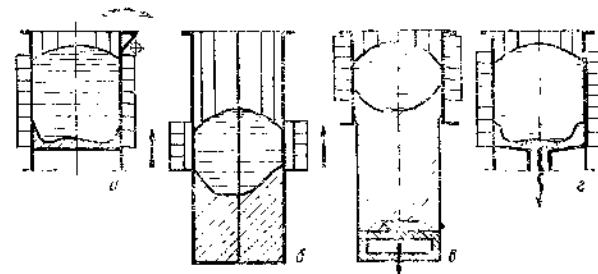
Р и с. 83. Типы холодных тиглей и схема протекания тока в системе индуктор—тигель—расплав

проникает к поверхности загрузки только через зазоры (щели) между секциями, и мощность в расплаве выделяется лишь на небольшом участке поверхности металла, прилегающей к зазору. В то же время электрические потери в самом холодном тигле, пропорциональные длине пути тока в теле тигля, могут быть весьма значительны. Иными словами, металлический тигель, находящийся в поле индуктора, является потребителем энергии, выделяющейся в нем в виде джоулевых потерь. Величина потерь зависит от конструкции тигля.

Для оценки эффективности той или иной конструкции холодного тигля удобно ввести величину $\eta_{х.т.}$, характеризующую соотношение между мощностью, поглощаемой загрузкой P_z , и электрическими потерями в тигле $P_{э.т.}$

Эта величина может быть названа электрическим к. п. д. системы тигель—расплав или электрическим к. п. д. холодного тигля.

На рис. 85 приведены зависимости $\eta_{х.т.} = f(n_c)$ при плавке нержавеющей стали в медном трубчатом тигле (см. рис. 83, в) диаметром 0,1 м при использовании разных частот. Оптимальное число секций $n_{опт}$ определяется электропроводностью расплава и материала тигля, диаметром тигля и частотой.



Р и с. 84. Схемы технологических процессов, осуществляемых в ИПХТ

В настоящее время реальные значения к. п. д. индукционных печей с холодным тиглем при плавке в них сплавов с электропроводностью, близкой к электропроводности сталей, лежат в диапазоне 0,25—0,40.

Требования к конструкции холодного тигля. При проектировании ИПХТ основное внимание уделяется конструированию

холодного тигля, к которому при плавке металлов и сплавов предъявляются следующие требования:

- 1) отсутствие взаимодействия материала тигля с расплавом (достигается при температуре стенки медного тигля $T_{ст} \leq 300^\circ \text{C}$);
- 2) минимальные электрические потери в тигле и максимальный к. п. д. ИПХТ (обеспечивается при $n_c = n_{опт}$);

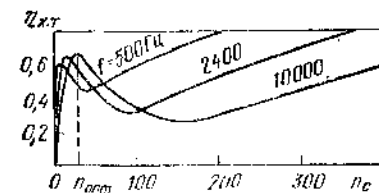
3) минимальные зазоры и надежная электроизоляция между секциями тигля (достигаются при использовании в качестве изоляции окиси алюминия, наносимой на поверхность секций методом плазменного напыления);

4) достаточная механическая прочность тигля (обеспечивается радиальной стяжкой секций);

5) возможность получения слитка непосредственно в тигле или разливки металла из тигля по окончании плавки.

На рис. 86 показана одна из конструкций трубчатого холодного тигля, предназначенного для наливки слитка в вакуумной ИПХТ.

Особенности плавки в холодном тигле огнеупорных материалов и полупроводников. Полупроводники обладают электронной проводимостью, слабой при комнатной температуре, но сильно возра-



Р и с. 85. Зависимость к. п. д. холодного тигля $\eta_{х.т.}$ от числа секций n_c при плавке стали в медном тигле $d_0 = 0,1$ м

стающей с ростом температуры. Огнеупорные материалы (окислы, нитриды) характеризуются очень слабой проводимостью (удельное электрическое сопротивление около $100 \text{ кОм} \cdot \text{м}$) до температуры порядка 1000°С . Выше этой температуры проявляется ионная проводимость; у некоторых материалов она становится значительной еще до плавления, у других — только в жидком состоянии.

Поэтому индукционная плавка огнеупорных материалов невозможна до тех пор, пока материал не нагреет до некоторой критической температуры, при которой его электрическая проводимость становится достаточной для того, чтобы глубина проникновения тока в материал стала сопоставимой с поперечными размерами расплавляемой заготовки. Предварительный нагрев до указанной температуры называют стартовым нагревом.

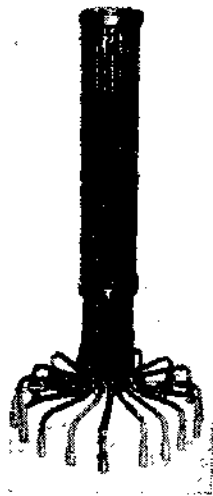


Рис. 86. Трубчатый холодный тигель для наплавки слитка в вакуумной печи

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 компонент;
- 4) применение дополнительного внешнего источника нагрева;
- 5) нагрев телом экзотермической реакции окисления металла.

При плавке полупроводников и диэлектриков и наличии неэлектропроводного гарниссажа картина протекания индуцированного тока в расплаве не отличается от таковой при плавке металла в тигле с изоляционным слоем (рис. 83, б). Поскольку при этом электрическая проводимость расплава значительно ниже электрической проводимости материала тигля и индуктора, электрический к. п. д. ИПХТ при плавке оксидных материалов может быть очень высоким (превышающим 90%).

Для плавки огнеупорных материалов используют высокие частоты ($400 \text{ кГц} - 100 \text{ МГц}$).

Холодные тигли горизонтального или вертикального исполнения довольно широко применяют при обработке полупроводниковых материалов с целью их зонной очистки и получения монокристаллов. В отдельных случаях для полного исключения загрязнения переплавляемого материала холодные тигли изготавливают из серебра.

Контрольные вопросы

1. При каких условиях и какими способами может быть реализована индукционная плавка металлов без загрязнений?
2. Изобразите картину магнитного поля индуктора с короткозамкнутым витком (аналогично показанному на рис. 80) для взвешенной плавки металла?
3. Производится зонная очистка стержня при вертикальной бестигельной плавке (рис. 81, а). На каком конце стержня будет скапливаться примесь, если известно, что примесь повышает температуру плавления материала стержня?
4. Какие требования предъявляются к конструкции холодного тигля?
5. Производится индукционная плавка немагнитной стали $\rho = 130 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в холодном тигле диаметром $d_0 = 0,1 \text{ м}$ с числом секций $n_c = 16$ на частоте $f = 2400 \text{ Гц}$. Как изменится (и почему) к. п. д. процесса, если число секций тигля увеличить в пять раз?

ГЛАВА 15

ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА

§ 1. ОСОБЕННОСТИ СКВОЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Сквозной индукционный нагрев металлических заготовок применяется перед пластической деформацией (ковкой, штамповкой, гибкой, прессованием, прокаткой и др.) и для различных видов термообработки (отжига, нормализации, закалки, спекания и др.).

Установка для сквозного нагрева должна обеспечивать: равномерность нагрева заготовок по сечению и по длине, минимальное время нагрева, высокий электрический и тепловой к. п. д.

В отдельных, редких случаях требуется заданное неравномерное распределение температуры по длине заготовки. Малое время нагрева обеспечивается благодаря возможности подводить индукционно к загрузке большую удельную мощность. Частоту тока при сквозном нагреве выбирают достаточно низкой, чтобы существенная часть заготовки (на глубину более 30% ее радиуса) нагревалась непосредственно током, индуцированным в поверхностном слое заготовки. Внутренние слои заготовки нагреваются за счет теплопроводности.

Имеется возможность дополнительного сокращения времени нагрева путем соответствующего изменения мощности, подводимой к загрузке в ходе нагрева.

На рис. 87 приведены графики изменения температуры поверхности T_0 и центра T_c заготовки при обычном индукционном нагреве, выполняемом при примерно постоянной во времени удельной мощности и при ускоренном нагреве. В последнем случае в начальный период времени t_1 к заготовке подводится максимально возможная удельная мощность. Благодаря этому добиваются быстрого нагрева поверхностного слоя до заданной конечной температуры. Образовавшийся значительный перепад температур и соответственно

большой тепловой поток между поверхностью и центром заготовки способствует быстрому прогреву внутренних слоев заготовки. В дальнейшем подводимая к заготовке мощность снижается таким образом, чтобы температура поверхности оставалась постоянной и равной заданной конечной величине.

Как видно из рис. 87, благодаря программному изменению подводимой к загрузке мощности удастся значительно (обычно в 2—3 раза) сократить время нагрева загрузки до конечной температуры при заданном перепаде температуры ΔT между поверхностью и центром заготовки. После отключения установки при остывании заготовки температура поверхностного слоя вскоре становится ниже температуры центра.

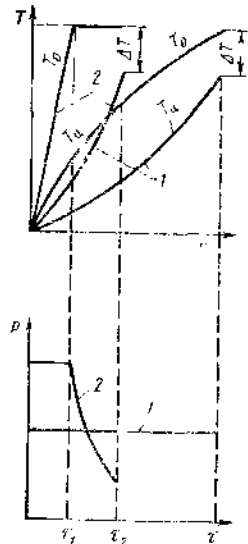


Рис. 87. Изменение температуры заготовки и мощности в процессе обычного (1) и ускоренного (2) индукционного нагрева

При сквозном нагреве металла индукционные установки имеют следующие преимущества по сравнению с другими нагревательными агрегатами (пламенными и печами сопротивления):

значительно более высокая (часто в десятки раз) производительность на единицу занимаемой площади;

малое время нагрева, что позволяет снизить окалинообразование, экономит металл (в среднем 20 кг/т) и увеличивает примерно на 20% срок службы штампов, износу которых способствует наличие твердой окалины;

легкость автоматизации и встройки в поточные линии;

постоянная готовность к действию, ремонтоспособность;

улучшение условий труда (минимум тепловыделений и загрязнений в цехе).

В отдельных случаях для сокращения времени нагрева и уменьшения удельного расхода энергии целесообразно использовать две различные частоты тока. Так, например, при нагреве стальных заготовок диаметром 80—120 мм в холодном («магнитном») режиме до температуры 750°С можно использовать частоту 50 Гц, а после потери сталью магнитных свойств нагрет до конечной температуры 1250°С ведут, например, при 1000 Гц. В результате на всем протяжении нагрева обеспечивается оптимальное отношение глубины проникновения тока к диаметру загрузки.

Двухчастотный нагрев применяют иногда также для создания равномерного распределения температуры в загрузке прямоугольного или более сложного поперечного сечения.

Однако индукционным установкам для сквозного нагрева присущи и ряд недостатков:

более высокая стоимость оборудования;

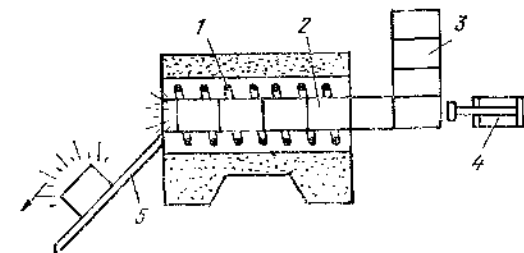
более высокий удельный расход энергии (для стали в среднем 500 кВт·ч/т);

для каждого типоразмера деталей необходим свой индуктор; трудности обеспечения равномерного нагрева деталей сложной формы.

§ 2. КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВОК

Конструкция индукционной установки для сквозного нагрева определяется ее производительностью, формой и размером нагреваемых заготовок. В настоящее время в промышленности работают

Рис. 88. Схема методического индукционного нагревателя для мерных заготовок: 1 — индуктор; 2 — нагреваемые заготовки; 3 — буикер с входными заготовками; 4 — толкатель; 5 — лоток для нагретых заготовок



установки мощностью от нескольких киловатт (например, для гибки или штамповки мелких деталей) до десятков мегаватт (для нагрева крупных слитков и слябов перед прокаткой или прессованием).

Современные индукционные установки для сквозного нагрева характеризуются высокой степенью механизации и автоматизации загрузки заготовок в индуктор. Их выгрузка, а также поддержание заданного режима нагрева производятся автоматически. Сигнал на выдачу нагретой заготовки подается от фотопирометра, термопары, реле времени или от реле расхода энергии.

В серийном производстве, когда велики партии однотипных заготовок, обычно используются установки непрерывного действия (рис. 88), обеспечивающие наиболее высокую производительность, полную загрузку источника питания во времени и стабильность электрического режима.

В методических нагревателях мерные заготовки через равные интервалы времени перемещаются вдоль индуктора. Длина индуктора, число заготовок и скорость их перемещения согласуются таким образом, чтобы выходящая из индуктора заготовка имела заданную температуру и заданный перепад температуры по сечению.

Общий вид одной из методических индукционных установок средней частоты для нагрева мерных заготовок показан на рис. 89.

Основными элементами установки являются индуктор 1, конденсаторная батарея 2, шкаф управления (на рис. 89 не показан), механизмы загрузки 3 и выгрузки 4. Заготовки с наклонного загрузочного лотка или из бункера с отсекателем поступают на исходную позицию перед входом в индуктор. Перемещаемый с помощью электромеханического привода транспортер с прижимными роликами 5 вводит холодную заготовку 6 в индуктор, продвигая одновременно на один шаг весь находящийся в индук-

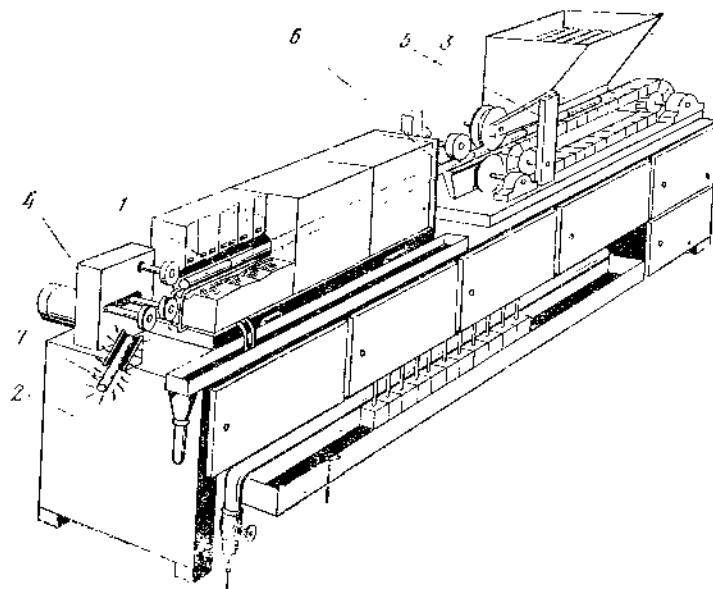


Рис. 89. Индукционная установка для методического нагрева мерных заготовок

торе ряд заготовок. При этом последняя, нагретая заготовка 7, выходит из индуктора, поступая на разгрузочный лоток.

Для обеспечения равномерного нагрева торцевой части последней заготовки индуктор обычно выступает за пределы ряда находящихся в нем заготовок. В этих случаях для извлечения последней заготовки используют механизмы выгрузки в виде приводного рольганга 4 с верхним прижимным роликом или специальные «таскатели», захватывающие выходящий из индуктора конец заготовки.

Методические индукционные установки, работающие на промышленной частоте, предназначаются для нагрева заготовок большого диаметра (свыше 130 мм) и обычно имеют несколько иную компоновку.

Установки большой мощности выполняются, как правило, трехфазными или же комплектуются статическими индуктивно-емкостными устройствами симметрирования нагрузки по фазам.

Индукторы, включаемые в разные фазы, располагаются встык либо разнесены по длине. В первом случае достигается компактность установки. Однако на стыках соседних индукторов вследствие сдвига фаз тока ослаблено электромагнитное поле и соответственно ниже температура загрузки.

В установках с разнесенными фазами (рис. 90) это явление отсутствует; кроме того, при этом облегчается механизация установки, что особенно существенно при нагреве крупных слитков и высоком темпе выдачи. Показанная на рис. 90 установка ИНМ предназначена для нагрева стальных слитков диаметром 130—270 мм, длиной 400—700 мм до 1250° С перед прессованием. Располагаемые линейно три однофазных индуктора 1 соединены в симметричную трехфазную систему.

Механизм загрузки 2 пропускает с наклонного стола 3 очередную заготовку, которая затем гидравлическим толкателем 4 вдвигается в первый индуктор, одновременно выталкивая из него нагретый слиток. Этот слиток попадает на промежуточный рольганг 5 и толкателем механизма перемещения 6 вдвигается во второй индуктор.

Механизм выгрузки 7 на выходе третьего индуктора передвигает нагретую заготовку к прессу. Мощность установки 3000 кВт, производительность до 10 т/ч. Установка имеет отдельное регулирование мощности каждого индуктора, для чего предусмотрены вольтодобавочные трансформаторы с переключаемыми первичными обмотками. Последний по ходу движения заготовок индуктор имеет дополнительную самостоятельно регулируемую секцию для подогрева торца заготовки. Это необходимо, так как, несмотря на заглубление заготовок в индуктор, магнитное поле в этой зоне ослаблено, и, кроме того, с торца последней заготовки велики тепловые потери. Температура заготовок в каждом индукторе контролируется радиационными пирометрами. Установка содержит следующие основные узлы: индукционный нагреватель, щит управления, щит пирометрический, контакторные панели, вольтодобавочные трансформаторы, конденсаторные батареи, установленные в подвальном помещении под индукторами, маслonaпорную установку с гидроаппаратурой и систему водоохлаждения индуктора. Установка комплектуется съемными индукторами, обеспечивающими нагрев с высоким к. п. д. всего диапазона диаметров заготовок. Предусмотрена возможность корректировки режима нагрева в случае перерывов в работе прессового оборудования длительностью не более 20 мин.

Пересбор в работе прессового оборудования являются серьезной трудностью для работы методического индукционного нагревателя. В отличие от печей с внешним источником тепла, где максимальная температура заготовок не превышает заданной температуры в камере печи (установки с резистивным или газовым нагревом) в случае высоко интенсивного индукционного нагрева при прекращении выдачи нагретых заготовок необратимо пару-

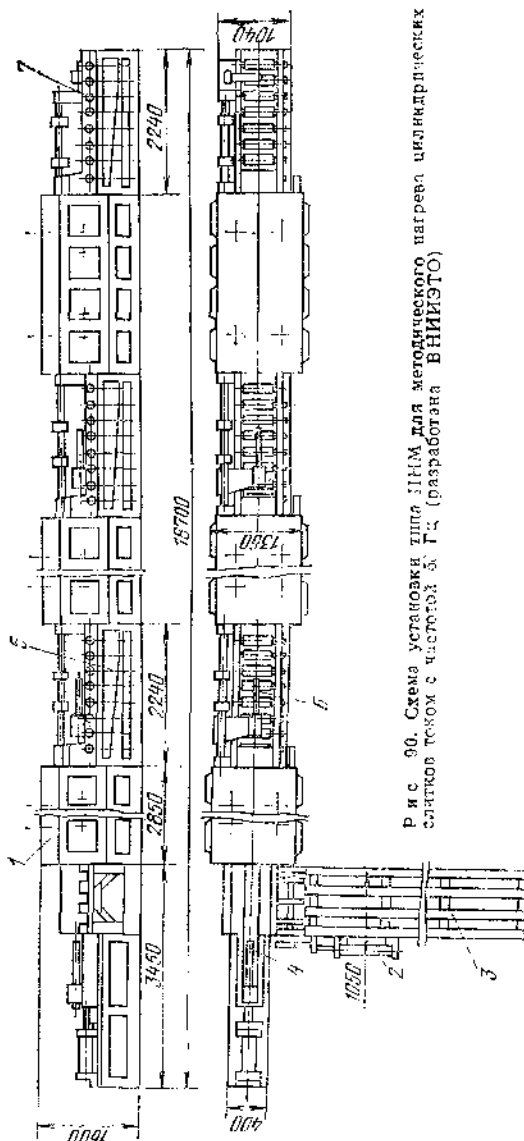


Рис. 90. Схема установки типа ИИМ для периодического нагрева цилиндрических слитков титаном с частотой 3 Гц (разработана ВНИИЭТО)

шается температурный режим в находящемся в индукторе ряде заготовок. Это приводит к тому, что при относительно длительных паузах приходится полностью освобождать индуктор от частично нагретых заготовок и начинать работу с запуска установки на новых, холодных заготовках.

При запуске методического индукционного нагревателя для получения номинального электрического режима индуктор полностью загружается слитками, которые с заданным темпом продвигаются вдоль нагревателя. Однако все слитки, кроме последнего, не могут быть использованы для обработки давлением, так как они не прошли полного цикла нагрева. Эти слитки называются балластными и применяются лишь для запуска установки.

Аналогично, по окончании работы установки не используются находящиеся в индукторе нагретые до различной температуры заготовки. Этих недостатков лишены индукционные нагреватели периодического действия. Такие нагреватели удобнее при мелкосерийном производстве, когда часто требуется переналадка режима нагрева из-за меняющихся размеров заготовок. Кроме того, они допускают поддержание нагреваемой заготовки в режиме «ожидания» при перерывах в работе технологического оборудования. При нагреве особо крупных слитков в периодических установках легче выполнить теплоизоляцию и механизмы перемещения загрузки.

Установки периодического действия обычно состоят из нескольких отдельных нагревателей, в каждом из которых находится один слиток. Установки объединены общей системой механизации, питания и управления. Нагретые слитки выдаются к обрабатывающему оборудованию из нагревателей поочередно. Установки бывают с горизонтальным и вертикальным расположением индукторов. В последнем случае часто используется механизация по принципу элеваторных печей: слитки перемещаются под нагревателями транспортной тележкой. Загрузка слитков в индукторы и выгрузка из них осуществляется гидроподъемниками. Создано оборудование для обработки давлением, в которое встроены индукционные нагреватели, составляющие органическую часть единого технологического агрегата.

§ 3. ИНДУКТОРЫ УСТАНОВОК ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА

Наиболее распространенный тип индуктора для сквозного нагрева — соленоидный многовитковый (рис. 91). Форма катушки индуктора зависит от вида сечения нагреваемых заготовок. Индуктор 1 выполняется из медной водоохлаждаемой трубки. В установках промышленной частоты используется трубка с утолщенной внутренней стенкой — для уменьшения электрических потерь в индукторе.

Для сквозного нагрева легкоокисляемых металлов применяются установки, в которых индукционные нагреватели помещены в вакуумные или газонаполненные герметичные камеры.

Для обеспечения жесткости катушки индуктора чаще всего применяют ее стяжку между торцовыми асбоцементными плитами 2. Иногда вместо этого используют крепление витков индуктора к продольным текстолитовым, гетинаксовым или деревянным брускам с помощью припаянных к виткам снаружи латунных шпилек.

Между катушкой индуктора и нагреваемой загрузкой размещаются электрическая и тепловая изоляция индуктора 3. Чем меньше зазор между индуктором и загрузкой, тем выше электрический к. п. д., однако из-за малой толщины теплоизоляции умень-

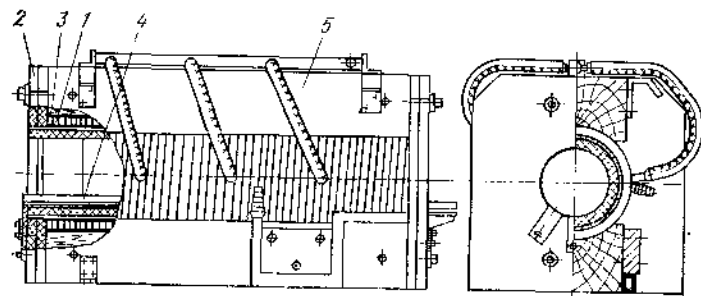


Рис. 91. Индуктор установки для сквозного нагрева заготовок

шается тепловой к. п. д. Чем выше температура нагрева и соответственно относительно больше тепловые потери, тем большим принимается зазор между индуктором и загрузкой. Для нагрева стали отношение диаметра индуктора к диаметру загрузки колеблется от 1,4 до 1,8.

Тепловая изоляция, снижая тепловые потери, должна одновременно уменьшить температуру электрической изоляции индуктора до допустимой величины. Тепловая и электрическая изоляции индуктора должны надежно работать при имеющих место больших температурных перепадах по толщине, частых тепло-сменах, высоких скоростях нагрева и остывания.

Витки индуктора, работающего на промышленной частоте, испытывают значительные электродинамические усилия, вызывающие их вибрацию. Особенно велика вибрация индуктора для нагрева крупных прямоугольных слитков. Крепление индуктора, его электро- и теплоизоляция в этих случаях должны выбираться с учетом вибрационных нагрузок.

Электрическая изоляция индуктора обычно выполняется путем покрытия витков лаком по голой меди с последующей обмоткой каждого витка стеклолентой или микалентой, пропиткой и запечкой кремнийорганическим лаком.

Когда крепление индуктора выполнено стяжкой между торцовыми плитами, допустимы прокладка между витками колец

из электроизоляционного твердого материала и последующая обмотка стеклолентой одновременно всех витков.

Наиболее надежная электрическая изоляция индуктора достигается заливкой всего индуктора в эпоксидный компаунд. Перед заливкой прокладками из стеклоткани, стекломиканита или стеклотекстолита фиксируются нужные зазоры между витками.

Тепловая изоляция индуктора зависит от рабочей температуры. При нагреве заготовок до 300° С достаточно на внутреннюю поверхность индуктора наклеить слой асбестового полотна.

При нагреве до 300—500° С, например перед обработкой давлением алюминия, применяются асбоцементные трубы. Нагрев в диапазоне 500—900° С ведут в индукторах с теплоизоляцией из шамотных колец или асбокерамических труб. Для диапазона 1100—1250° С (нагрев стали, жаропрочных сплавов и др.) в качестве огнеупорной части теплоизоляции часто применяют шамотные втулки, а между индуктором и втулкой прокладывают слой асбестового полотна или картона.

Наиболее удобно для этого диапазона температуры использовать жаростойкие бстоны. Они более прочны и долговечны, чем шамотные втулки. Бстон изготавливается на основе тонкомолотого магнезита, шамотного заполнителя, кремнефтористого натрия и жидкого стекла. Футеровка из бетона может выполняться путем набивки в зазор между индуктором и шаблоном, обмазки индуктора изнутри, изготовлением втулок нужных размеров и, наконец, заливкой предварительно изолированного индуктора целиком в бетон. Последнее наиболее эффективно. В этом случае упрощается конструкция индукционного нагревателя, надежно защищается электрическая изоляция, достигается высокая жесткость индуктора, что особенно существенно в установках промышленной частоты для гашения вибраций.

При нагреве до 2000—2500° С можно применять графитовую засыпку, углеткани, специально располагаемые в магнитном поле индуктора молибденовые или вольфрамовые экраны. Находящиеся в индукторе направляющие 4, по которым перемещаются заготовки, выполняются из немагнитной стали. Они представляют собой две трубы или листовой желоб. Часто направляющие делают водоохлаждаемыми. Это повышает срок их службы, однако увеличивает общие тепловые потери и ухудшает равномерность нагрева заготовок.

В некоторых установках для исключения трения о направляющие при перемещении нагретых заготовок вдоль индуктора применяют дополнительную подвижную направляющую. Поднимая весь ряд находящихся в индукторе заготовок, она перемещает их на один шаг, опуская затем на неподвижные направляющие.

В установках промышленной частоты обычно применяются внешние магнитопроводы для защиты от внешнего магнитного поля механизмов и каркаса 5 с декоративным кожухом, в котором установлен индуктор. Магнитопроводы одновременно испол-

зуются для крепления индуктора и придания жесткости всей конструкции индукционного нагревателя.

В коротких индукторах или при нагреве магнитной загрузки магнитопроводы способствуют некоторому повышению энергетических показателей системы индуктор—загрузка.

Для защиты от нагрева отдельных элементов конструкции, находящихся вблизи индуктора, иногда между ними располагают медные экраны толщиной более $1,5\Delta$.

Рассмотрим некоторые дополнительные особенности конструкции индукторов для сквозного нагрева различных заготовок.

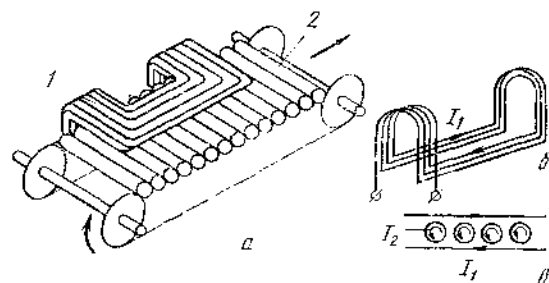


Рис. 92. Шелевой индуктор для нагрева концов цилиндрических заготовок (а) и протекание тока в индукторе (б) и в заготовках (в)

В отдельных случаях используют многослойные соленоидные индукторы с параллельным соединением секций. Это позволяет повысить электрический к. п. д., однако существенно усложняет изготовление и эксплуатацию индуктора. Иногда для усиления нагрева два слоя витков выполняются лишь в торцевых частях индуктора.

На средних частотах достаточного нагрева торца удастся добиться простым заглублением заготовки в индуктор. При этом магнитный поток повышенной частоты, выходя из узкого зазора в торцевую часть, изгибается вдоль торца заготовки, наводя в этой области дополнительные вихревые токи в плоскостях, перпендикулярных основному индуктированному в заготовке току.

В методических установках для ускоренного индукционного нагрева для обеспечения режима, показанного на рис. 87, индуктор должен иметь переменный шаг навивки: увеличивающийся от начала к концу. Практически индуктор выполняют из ряда последовательных секций с различной частотой навивки; в пределах каждой секции шаг постоянен. В связи с повышенной сложностью изготовления таких индукторов, а главное, из-за значительных трудностей в переналадке режима нагрева в случае перехода на другие размеры заготовок установки для ускоренного индукционного нагрева имеют пока ограниченное применение.

Помимо наиболее распространенного соленоидного индуктора для сквозного нагрева, применяются и иные типы индукторов. На рис. 92 показан проходной шелевой индуктор 1 для нагрева концов заготовок 2. Достоинство такого индуктора — в простоте

механизации при методическом нагреве. Недостаток — наличие «холостых» частей индуктора, что снижает электрический к. п. д. Для нагрева концов мелких цилиндрических заготовок применяют также овальные соленоидные индукторы при размещении ряда заготовок по поперечному сечению индуктора.

На рис. 93 показан индуктор для нагрева ленты в поперечном магнитном поле.

Для нагрева кольцевых деталей может применяться индуктор промышленной частоты с железным сердечником (см. рис. 3, а).

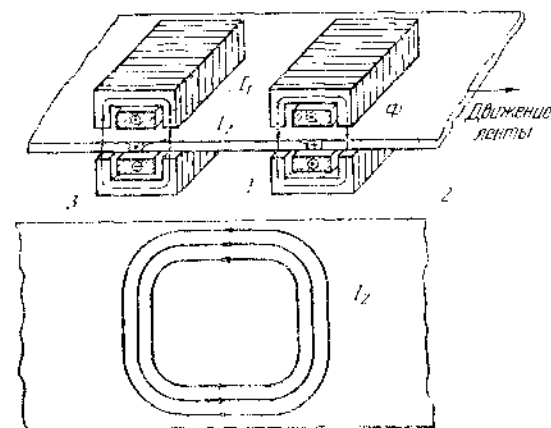


Рис. 93. Нагрев ленты в поперечном магнитном поле: 1 — индуктор; 2 — лента; 3 — магнитопровод

При низкотемпературном нагреве с малыми удельными мощностями (нагрев сосудов или трубопроводов с жидкостями, сушка лакокрасочных покрытий на металле, термообработка сварных швов и др.) могут использоваться псевдоохлаждаемые индукторы, например кабели в асбестовой изоляции.

В отдельных случаях для обеспечения равномерного нагрева изделий сложной формы приходится использовать одновременно или последовательно индукторы нескольких типов. Например, при нагреве крупных слябов в соленоидном индукторе на промышленной частоте вследствие слабого проявления эффекта близости недостаточно нагреваются боковые грани. Равномерность нагрева может быть достигнута установкой вдоль граней дополнительных шелевых индукторов, наводящих ток в перпендикулярной к основному току плоскости.

Равномерный нагрев перед гибкой отвала, представляющего собой сложное плоское изделие из листа толщиной 7 мм, можно выполнить, используя последовательно соленоидный и зигзагообразный индукторы (рис. 94). Нагрев ведется током на частоте 2400 Гц. В соленоидном индукторе отвал нагревается до темпера-

туры, соответствующей потери сталью магнитных свойств ($\sim 750^\circ \text{C}$).

Высокая равномерность температуры на этом этапе достигается благодаря тому, что с потерей магнитных свойств и соответствующим увеличением глубины проникновения тока эффектив-

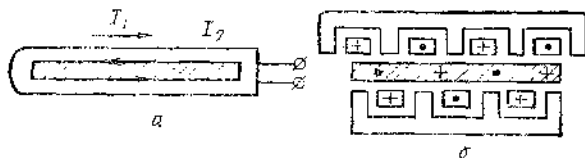


Рис. 94. Нагрев отвала с использованием соленоидного (а) и зигзагообразного (б) индукторов

ность индукционного нагрева резко падает. До заданной температуры 900°C отвал догревается в поперечном поле, создаваемом зигзагообразным индуктором с магнитопроводом.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности ускоренного индукционного нагрева?
2. Как может быть достигнута необходимая жесткость индуктора?
3. Поясните принцип действия целсого индуктора (рис. 92) и индуктора для нагрева тел в поперечном поле (рис. 93).

ГЛАВА 16

РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

При электрическом расчете индукторов следует использовать также материалы, изложенные в гл. 7 и 8.

§ 1. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Задачей теплового расчета нагревателя является определение теплового к. п. д. нагревателя η_t и времени нагрева заготовки τ_k .

Для выполнения теплового расчета необходимо знать размеры индуктора.

1. Определение геометрии индуктора

Для обеспечения равномерного нагрева заготовки по длине при симметричном расположении ее в индукторе высоту индуктора выбирают из соотношения

$$h_1 = h_2 + 2l_{\text{св}}, \quad (16-1)$$

где $l_{\text{св}}$ — положительный свес индуктора (или — заглубление заготовки в индукторе), который может быть принят (при нагреве стали) равным

$$l_{\text{св}} \approx (0,5 \div 0,75) d_1. \quad (16-2)$$

В случае, когда в одном индукторе производится нагрев нескольких (N) заготовок высотой h_2 , то в (16-1) надо подставить

$$h_2 = h_2' N. \quad (16-3)$$

Необходимость некоторого увеличения высоты индуктора по сравнению с h_2 вызвана рассеянием магнитного поля на торцах индуктора, из-за которого происходит подстуживание торцов заготовки. Этот концевой эффект сказывается тем сильнее, чем выше температура T_k , меньше скорость нагрева и отношение высоты заготовки к ее диаметру.

При использовании в индукторе двухслойной тепловой изоляции (например, шамот и асбест) диаметр индуктора выбирают с учетом толщины изоляционных слоев:

$$D_1 = D_2 + 2(b_{\phi} + b_{\text{из}} + b_{\text{з}}), \quad (16-4)$$

где b_{ϕ} — толщина внутреннего слоя футеровки (шамота);

$b_{\text{из}}$ — толщина изоляционного слоя (асбеста);

$b_{\text{з}}$ — величина воздушного зазора между заготовкой и футеровкой.

Максимальное значение полного к. п. д. установки для сквозного нагрева стали обычно достигается при $D_1/D_2 \approx 1,4 \div 1,8$.

2. Определение тепловых потерь

При сквозном нагреве, который производится обычно при сравнительно малых удельных мощностях (по сравнению, например, с поверхностной закалкой) в течение довольно длительного времени, при сравнительно высоких температурах ($1100\text{—}1300^\circ \text{C}$), необходимо учитывать тепловые потери в окружающее пространство. Тепловые потери $P_{\text{т.п}}$ зависят от наличия тепловой изоляции между индуктором и заготовкой. Если она отсутствует, то потери могут быть одного порядка с полезной мощностью, что приводит к низкому значению теплового к. п. д. При двухслойной стенке тепловые потери в установившемся режиме, Вт:

$$P_{\text{т.п}} = \frac{2\pi (T_k - T_n) h_1}{\frac{1}{\lambda_{\text{ср}}} \ln \frac{D_1 - 2b_{\text{из}}}{D_3} + \frac{1}{\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{D_1}{D_1 - 2b_{\text{из}}}}, \quad (16-5)$$

где D_3 — диаметр внутренней полости футеровки, м:

$$D_3 = D_2 + 2b_{\text{з}} \approx (1,1 \div 1,2) D_2; \quad (16-6)$$

T_n — температура наружной поверхности асбестовой изоляции ($T_n = 50 \div 100^\circ \text{C}$);

T_k — конечная температура нагрева заготовки.

3. Определение мощности, поглощаемой заготовкой в процессе нагрева, и теплового к. п. д. нагревателя.

В нагревателе периодического действия по мере повышения температуры нагреваемой заготовки возрастает ее удельное сопротивление и сильно меняется магнитная проницаемость ферромагнитных материалов (см. гл. 8). Поэтому активное и реактивное сопротивления заготовки, эквивалентные параметры индуктора и поглощаемая мощность также меняются в процессе нагрева.

Примерный характер изменения мощности P_2 в процессе нагрева при постоянном напряжении на индукторе ($U_n = \text{const}$) показан на рис. 95. Конкретный вид кривой зависит от геометрии системы и степени проявления поверхностного эффекта.

Опыт показывает, что для приближенных расчетов можно принимать

$$P_{2r} = 0,72P_{2\text{ср}} \quad (16-7)$$

Рис. 95. Изменение мощности, поглощаемой ферромагнитной заготовкой во времени

Если рассчитывать индуктор на эту мощность только в горячем режиме, можно обеспечить весь цикл нагрева и требуемое за цикл среднее значение мощности $P_{2\text{ср}}$. Именно поэтому при электрическом расчете индуктора (см. гл. 7) вместо P_2 рекомендуется подставлять $P_{2r} = 0,72P_{2\text{ср}}$.

Тепловой к. п. д. индукционного нагревателя

$$\eta_r = (P_{2r} - P_{\text{т.п}})/P_{2r} \quad (16-8)$$

4. Определение времени нагрева заготовки и удельной мощности нагревателя.

На практике применяются два режима нагрева заготовок: нагрев при постоянной во времени удельной мощности и нагрев при постоянной температуре поверхности нагреваемого изделия. Режим с постоянной удельной мощностью является основным, используемым наиболее часто. Режим нагрева при постоянной температуре поверхности используется при ускоренном сквозном нагреве. Этот режим требует или специального регулирования мощности, или специальной конструкции индуктора.

Путем решения уравнения теплопроводности (Фурье) находят выражение для температуры T на расстоянии x от поверхности цилиндрической заготовки в виде:

$$T = \frac{P_{\text{поп}} D_2}{\lambda} [Fo + S(\alpha, \beta, Fo)], \quad (16-9)$$

где Fo — критерий Фурье (относительное время),

$$Fo = \frac{at}{(D_2/2)^2}; \quad (16-10)$$

a — коэффициент температуропроводности нагреваемого материала;

α — относительная глубина активного слоя,

$$\alpha = 1 - 2(\xi/D_2); \quad (16-11)$$

ξ — глубина активного слоя;

$\xi = \Delta_k$ при $\Delta_k < 0,2$ и $\xi = 0,2D_2$ при $\Delta_k \geq 0,2D_2$;

β — относительное значение текущей координаты

$$\beta = 1 - 2(x/D_2); \quad (16-12)$$

$S(\alpha, \beta, Fo)$ — так называемая S -функция, характеризующая распределение температуры по сечению заготовки.

При $Fo > 0,2$ считают, что $S(\alpha, \beta, Fo)$ не зависит от Fo . В этом случае время нагрева определяют по формуле

$$\tau_k = \frac{D_2^2}{4a} \left\{ \frac{T_k - 273}{K\Delta T} [S(\alpha, 1) - S(\alpha, 0)] - S(\alpha, 1) \right\}, \quad (16-13)$$

где K — поправочный коэффициент (для алюминия $K = 1,0$; для стали $K = 2,0$);

ΔT — перепад температуры между поверхностью T_0 и центром T_k изделия, $\Delta T = T_0 - T_k$.

Удельную поверхностную мощность находят по формуле

$$P_{\text{поп}} = \frac{\lambda T_0}{D_2 [Fo + S(\alpha, 1, Fo)]}, \quad (16-14)$$

где $S(\alpha, 1, Fo)$ — значение функции S при $\beta = 1,0$.

Значения вспомогательной функции $S(\alpha, \beta, Fo)$ приведены в Приложении 1.

Тепловой расчет выполняется при $P_{\text{поп}} = \text{const}$, причем под $P_{\text{поп}}$ понимают среднее значение удельной мощности за период нагрева.

Выражение (16-14) можно существенно упростить, если при нагреве стальных заготовок принять: $T_k = 1200 \div 1300^\circ \text{C}$ (до этой температуры обычно нагревают стальные заготовки под ковку и штамповку); теплофизические свойства стали (при температуре $\sim 800^\circ \text{C}$): $\lambda = 33,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $a = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $c = 6,68 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ и допустимый перепад температур $\Delta T = 100 \div 150^\circ \text{C}$.

При $\Delta T = 100^\circ \text{C}$ и $T_0 = T_k = 1300^\circ \text{C}$

$$\tau_k = 22 \cdot 10^4 [S(\alpha, 1) - 1,18S(\alpha, 0)]; \quad (16-15)$$

при $\Delta T = 150^\circ \text{C}$ и $T_0 = 1300^\circ \text{C}$

$$\tau_k = 13 \cdot 10^4 [S(\alpha, 1) - 1,3S(\alpha, 0)]. \quad (16-16)$$

Определив $P_{\text{пол}}$, находят полную полезную мощность

$$P_{\text{пол}} = \pi D_2 h_2 P_{\text{пол}} \quad (16-17)$$

Для выполнения приближенных расчетов выражения (16-15) и (16-16) можно еще более упростить: при $\Delta T = 100^\circ \text{C}$

$$\tau_k \approx 5,9 \cdot 10^4 D_2' \quad (16-18)$$

при $\Delta T = 150^\circ \text{C}$

$$\tau_k \approx 3,7 \cdot 10^4 D_2' \quad (16-19)$$

где D_2' — расчетный диаметр загрузки, $D_2' = D_2 - \xi$.

Зная время нагрева τ_k , среднее значение полезной мощности можно определить через энтальпию загрузки

$$P_{\text{пол}} = G c_{\text{ср}} T_{\text{ср}} / \tau_k \quad (16-20)$$

где G — масса заготовки, кг;

$c_{\text{ср}}$ — средняя теплоемкость, Дж/(кг·К);

$T_{\text{ср}}$ — средняя по сечению температура заготовки (для стали $T_{\text{ср}} = 1500 \div 1550 \text{ K}$).

Если при заданной производительности интервал времени между выдачей заготовок из индуктора должен составлять τ_0 (темп выдачи заготовок), а время нагрева, найденное из теплового расчета, равно τ_k , то при $\tau_0 < \tau_k$ необходимо установить число индукторов:

$$N = \tau_k / \tau_0 \quad (16-21)$$

§ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИНДУКТОРА ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

1. Выбор частоты тока

Минимальная частота источника питания f_{min} определяется, исходя из условия получения максимального значения электрического к. п. д., в соответствии с выражением (4-28):

$$f_{\text{min}} \geq \pi \cdot 10^6 \frac{\rho_2}{\mu_2' D_2^2}.$$

При этом целесообразно ориентироваться на горячий режим, соответствующий температуре $800-850^\circ \text{C}$ [т. е. подставлять в уравнение (4-28) значения $\mu_2' = 1,0$ и $\rho_2 = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$].

Верхний предел частоты, обеспечивающий наибольшую глубину активного слоя ξ , а следовательно, и наименьшее время нагрева, определяется из соотношения

$$f_{\text{max}} < 2\pi \cdot 10^6 \frac{\rho_2}{\mu_2' D_2^2} \quad (16-22)$$

Таким образом, частоту f источника питания выбирают, исходя из неравенства:

$$\pi \cdot 10^6 \frac{\rho_2}{\mu_2' D_2^2} \leq f \leq 2\pi \cdot 10^6 \frac{\rho_2}{\mu_2' D_2^2} \quad (16-23)$$

2. Расчет горячего режима.

Горячий режим, когда $b_k \geq \Delta_k$, достигается при $\tau_r \approx 0,3\tau_k$ (τ_k — полное время нагрева) и продолжается до окончания нагрева.

Расчет выполняют по схеме, изложенной в гл. 7. В результате расчета определяют напряжение на индукторе $U_{\text{н}}$, которое является базовым при расчете других режимов нагрева. Полученные в этом расчете активное r_1 и внутреннее реактивное $x_{1\text{в}}$ сопротивления индуктора, а также реактивные сопротивления зазора x_3 и обратного замыкания x_0 не зависят от режима нагрева и используются в расчетах других режимов работы индуктора. На этом этапе, в интервале температур $800-1300^\circ \text{C}$, можно принять $\rho_2 = (1,2 \div 1,3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

3. Расчет холодного режима

Значение активной мощности P_2 в холодном режиме неизвестно, поэтому находят его методом последовательных приближений. На основании рис. 48 задаются значением $P_2 = P_{2\text{г}}$. Найдя удельную поверхностную мощность $P_{\text{пов}}$ и приняв удельное сопротивление стали в этом режиме $\rho_2 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, определяют

$$\bar{H}_0^2 \sqrt{\mu_{\text{пов}}} = 3,67 \cdot 10^3 P_{\text{пов}} / \sqrt{\rho_2 f}, \quad (16-24)$$

а затем по кривым рис. 96 находят значение напряженности магнитного поля H_0 и вычисляют $\mu_{\text{пов}}$. Далее по формуле

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\rho_2 / \mu_{\text{пов}} f} \quad (16-25)$$

определяют глубину проникновения Δ_2 .

Активное r_2 и внутреннее реактивное $x_{2\text{в}}$ сопротивления загрузки находят в соответствии с (8-3):

$$r_2 = 1,37 \pi D_2 \rho_2 / \Delta_2 h_2,$$

$$x_{2\text{в}} \approx r_2 / 1,37.$$

Затем по формулам § 2 гл. 6 находят значение коэффициента приведения $C_{\text{пр}}$, а также приведенные сопротивления загрузки r_1' и x_2' , эквивалентные сопротивления индуктора $r_{\text{н}}$, $x_{\text{н}}$, $z_{\text{н}}$, силу

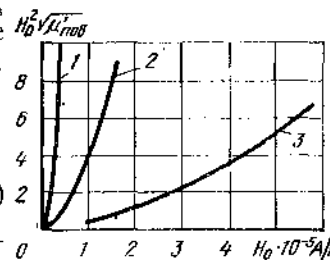


Рис. 96. Значение $H_0^2 \sqrt{\mu_{\text{пов}}}$ для стали при различных H_0 (значения $H_0^2 \sqrt{\mu_{\text{пов}}}$ нужно умножить на 10^3 , 10^4 и 10^5 соответственно для кривых 1—3)

тока условного одновиткового индуктора $I'_n = \sqrt{P_2/r'_2}$ и напряжение на индукторе $U'_n = I'_n z_2$.

Поскольку в общем случае полученное значение U'_n не совпадает с базовым, следует задаться другими значениями мощности P_2 и повторить весь цикл расчета, добиваясь значений U'_n , близких к базовому.

В ряде случаев бывает полезно выполнить также расчет промежуточных режимов нагрева при различных значениях ρ_2 .

§ 3. ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК В НАГРЕВАТЕЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В индукторе нагревателя непрерывного действия несколько нагреваемых заготовок размещаются одна за другой. По мере нагрева они выталкиваются по одной из индуктора и заменяются холодными. Каждая заготовка в процессе нагрева перемещается через определенные интервалы времени τ_0 на длину одной заготовки:

$$\tau_0 = \tau_k / N, \quad (16-26)$$

где τ_k — полное время нагрева заготовки;

N — число заготовок в индукторе.

Заготовки, находящиеся у выходного конца индуктора и нагретые выше точки Кюри, потребляют мощность меньшую, чем заготовки, находящиеся в ферромагнитном состоянии, расположенные в индукторе со стороны загрузки. Полная мощность, поглощаемая всей совокупностью находящихся в индукторе заготовок, остается постоянной (за исключением переходного режима, возникающего в момент перемещения заготовок).

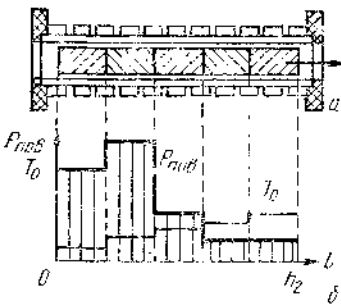


Рис. 97. Нагреватель методического действия (а) и характер распределения удельной мощности $P_{уд}$ и температуры T_0 вдоль столба заготовок (б).

Схематическое изображение индуктора для методического нагрева заготовок, а также примерный характер распределения удельной мощности $P_{пов}$ и температуры T_0 по длине столба заготовок показаны на рис. 97.

Тепловой расчет методического нагревателя выполняется в соответствии с методикой, приведенной в § 1.

Электрический расчет имеет ряд особенностей, связанных с изменением физических свойств заготовок по длине индуктора: первые заготовки обладают магнитными свойствами, другие же частично ферромагнитны или полностью немагнитны. Поэтому и значения удельной мощности на различных участках индуктора также различны.

При выполнении уточненного расчета нагревателя столб заготовок длиной h_2 условно разделяют на три зоны:

зону h_{21} ферромагнитных заготовок со средней температурой $T = 650^\circ \text{C}$, имеющих удельное сопротивление $\rho_2 \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $\mu'_2 > 1$;

зону h_{22} частично ферромагнитных заготовок, прогретых на глубину $b_k \approx 0,5\Delta$, причем $\rho_2 \approx 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

зону h_{23} немагнитных заготовок, прогретых на глубину $b_k > \Delta_k$, причем $\rho_2 \approx 1,2 \div 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $\mu'_2 = 1$.

Длины указанных зон в промышленных нагревателях составляют в среднем $h_{21} = 0,105h_2$, $h_{22} = 0,145h_2$ и $h_{23} = 0,75h_2$.

Распределение удельной мощности по зонам находят в соответствии с найденными значениями H_{0i} по зонам:

$$P_{10ni} = H_{0i}^2 r_{2i}. \quad (16-27)$$

Затем, в соответствии с полученным распределением удельной мощности по длине индуктора, находят значения активного r_{2i} и внутреннего реактивного x_{2ni} сопротивления загрузки по зонам, и в конечном счете, находят полные активное r_2 и реактивное x_{2n} сопротивления всей загрузки.

Значения r_2 и x_{2n} оказываются выше соответствующих значений r_{2r} и x_{2r} стальной загрузки в горячем режиме [формулы (7-4) и (7-7)]. При приближенных расчетах можно использовать следующие соотношения:

$$r_2 = 1,65 r_{2r}; \quad (16-28)$$

$$x_{2n} = 1,15 x_{2r, \text{г}}. \quad (16-29)$$

$$\text{Тогда } r_2 \approx 3,66 \frac{\rho_{2r} D_2^2}{\Delta_k^2 h_2} \Psi_a. \quad (16-30)$$

$$x_{2n} \approx 2,56 \frac{\rho_{2r} D_2^2}{\Delta_k^2 h_2} \Psi_r. \quad (16-31)$$

Можно пользоваться этой упрощенной методикой расчета.

§ 4. РАСЧЕТ ИНДУКТОРА НАГРЕВАТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Задачей расчета в конечном счете является определение эквивалентных параметров индуктора с загрузкой.

Для расчета необходимы следующие данные: диаметр D_2 , длина h_2 , физические свойства нагреваемого материала в диапазоне температур от исходной до конечной T_k , допустимый перепад температуры между поверхностью и осью заготовки ΔT , темп выдачи заготовки τ_0 и напряжение на индукторе U_n .

Последовательность выполнения расчета

1. Выбор частоты тока производится в соответствии с соотношением (16-23)

$$\pi \cdot 10^9 \frac{\rho_2}{\mu_2 D_2^2} \leq f \leq 2\pi \cdot 10^6 \frac{\rho_2}{\mu_2 D_2^2}.$$

2. Определение времени нагрева и числа заготовок в индукторе.

Время нагрева [см. (16-18) и (16-19)], с:

при $\Delta T = 100^\circ \text{C}$ $\tau_n \approx 5,9 \cdot 10^4 D_2^2$;

при $\Delta T = 150^\circ \text{C}$ $\tau_n \approx 3,7 \cdot 10^4 D_2^2$.

Расчетный диаметр загрузки, м:

$$D_2' = D_2 - \xi.$$

Горячая глубина пропикновения тока, м:

$$\Delta_k = 503 \sqrt{\rho_2 / \mu_2 f}. \quad (16-32)$$

Глубина активного слоя:

если $\Delta_k < 0,2 D_2$,

$$\xi = \Delta_k \quad (16-33a)$$

если $\Delta_k \geq 0,2 D_2$,

$$\xi = 0,2 D_2. \quad (16-33b)$$

Число заготовок в индукторе определяем по формуле (16-21).

3. Определение размеров индуктора:

диаметр (внутренний), м:

$$D_1 \approx (1,4 \div 1,8) D_2. \quad (16-34)$$

длина индуктора, м:

$$h_1 = h_2 N + (1,0 \div 1,5) D_1. \quad (16-35)$$

4. Расчет средней мощности в заготовке, Вт:

$$P_{2 \text{ ср}} = k_d (P_{\text{пол}} + P_{\text{т.н}}), \quad (16-36)$$

где k_d — коэффициент добавочных потерь, учитывающий потери в направляющих, по которым перемещаются заготовки ($k_d \approx 1,05$);

$P_{\text{пол}}$ — полезная мощность в заготовке, определяемая по формуле (16-20);

$P_{\text{т.н}}$ — тепловые потери, определяемые выражением (16-5).

Средняя удельная мощность в заготовке, Вт/м²:

$$P_{\text{пол}} = \frac{P_{2 \text{ ср}}}{\pi D_2 h_2}. \quad (16-37)$$

5. Активное и внутреннее реактивное сопротивления столба заготовок определяют по формулам (16-30) и (16-31).

Далее расчет производится в полном соответствии с методикой, изложенной в гл. 7.

Контрольные вопросы

1. Опишите схему выполнения теплового расчета индукционного нагревателя.
2. Чем объясняется изменение мощности, поглощаемой загрузкой, и температуры заготовок по длине индуктора (рис. 98, б)?
3. Какие соображения положены в основу выбора частоты тока при сквозном нагреве?

ГЛАВА 17

ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

§ 1. ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

Поверхностную закалку широко применяют в современном машиностроении. Этот вид термообработки позволяет получить стальные детали с закаленным твердым поверхностным слоем при сохранении вязкой сердцевины. Такие детали хорошо работают на истирание и одновременно выдерживают ударные нагрузки. Именно в таких условиях работают, например, шестерни, шейки коленчатых валов автомобилей и многие другие детали.

Для осуществления поверхностной закалки необходимо нагреть поверхность детали с очень высокой скоростью, а затем форсированно охладить ее. При этом лишь поверхностный слой заданной толщины должен успеть прогреться до температуры структурных превращений в стали и, следовательно, при охлаждении закалиться. Передача тепла во внутренние слои должна быть минимальной.

Нагрев под поверхностную закалку можно осуществить, например, пламенем газовых горелок; в электролите, используя закаливаемую деталь в качестве одного из электродов, или электроконтактным способом.

Однако оптимальным методом нагрева под поверхностную закалку является индукционный нагрев, позволяющий вводить в деталь значительную удельную мощность и сконцентрировать эту мощность благодаря поверхностному эффекту и эффекту близости в узком поверхностном слое.

Индукционный нагрев под поверхностную закалку отличается от перечисленных выше методов следующими преимуществами:

- 1) высоким качеством нагрева (по выдержке заданной температуры и повторяемости нагрева);
- 2) высокой производительностью;
- 3) отсутствием предварительной подготовки поверхности;
- 4) отсутствием нежелательных побочных явлений, например загрязнения и деформации поверхности.

В настоящее время индукционные установки для поверхностной закалки являются наиболее массовым оборудованием индукционного нагрева.

Температура структурных превращений, до которой следует нагреть поверхностный слой для закалки, зависит от марки стали и скорости нагрева. Чем больше скорость нагрева, тем выше температура, при которой успевают произойти структурные превращения. При индукционном нагреве под закалку наиболее распространенных марок стали рабочая температура в среднем составляет 850—900° С при скорости нагрева, равной сотням градусов в секунду.

Закаленным считается слой стали, содержащий более 50% мартенсита. Глубину закаленного слоя b_k определяют, исходя из соображений наибольшей прочности и износостойкости детали в условиях ее эксплуатации. Опыт показывает, что цилиндрические изделия малых и средних размеров имеют наибольшую прочность, когда закаленный поверхностный



Рис. 98. Распределение температуры по сечению детали, нагреваемой под закалку

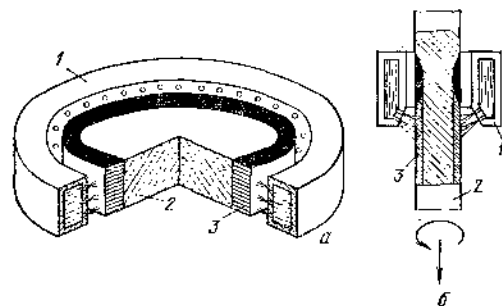


Рис. 99. Одновременная (а) и непрерывно-последовательная (б) поверхностная закалка:

1 — индуктор; 2 — деталь; 3 — закаленная зона

слой составляет 5—10% от диаметра изделия. С увеличением диаметра детали требуемая относительная глубина закаленного слоя уменьшается.

Характер распределения температуры по сечению детали к моменту достижения температуры закалки T_k в заданном слое b_k определяется главным образом выбранной частотой тока (рис. 98).

На этом рисунке кривая 1 (режим поверхностного нагрева) соответствует относительно высокой частоте тока, когда глубина проникновения в сталь, потерявшую магнитные свойства, $\Delta_2 < b_k$. Нагрев закаливаемого слоя происходит в значительной части теплопроводностью от тонкого поверхностного слоя, где индуцируется основной ток. Для прогрева всего слоя b_k требуется сравнительно длительное время, в течение которого существенно прогревается также сердцевина изделия.

В режиме глубинного нагрева, когда $\Delta_2 > b_k$ (кривая 2, рис. 98), тепло генерируется по всей толщине закаливаемого слоя. Благодаря этому обеспечивается короткое время нагрева, более равномерное распределение температуры в пределах слоя b_k и меньшие непроизводительные потери тепла внутрь детали.

При выборе частоты тока, помимо рассмотренных факторов, должно учитываться обеспечение высокого электрического к. п. д. и приемлемой, с точки зрения возможностей охлаждения индуктора, удельной мощности нагрева. В результате экспериментальных исследований установлено, что оптимальная частота для индукционного нагрева под закалку должна соответствовать соблюдению соотношения $b_k \approx (0,4 \div 0,5) \Delta_2$.

Удельная поверхностная мощность, вводимая в деталь при закалке, составляет обычно $(1,0 \div 2,0) \cdot 10^7$ Вт/м².

Различают два основных вида индукционной закалки: одновременную и непрерывно-последовательную.

В первом случае (рис. 99, а) вся закаливаемая поверхность нагревается сразу и затем вся одновременно охлаждается. Закалка выполняется обычно для поверхностей до 0,03 м², так как при больших площадях необходима слишком значительная установленная мощность преобразователя частоты, используемая лишь в повторно-кратковременном режиме.

Непрерывно-последовательная закалка (рис. 99, б) состоит в нагреве и последующем охлаждении поочередно отдельных участков детали, непрерывно перемещающейся относительно индуктора. Для обеспечения равномерного нагрева и охлаждения часто дополнительно используют вращение детали вокруг оси.

§ 2. ИНДУКТОРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ПОД ПОВЕРХНОСТНУЮ ЗАКАЛКУ

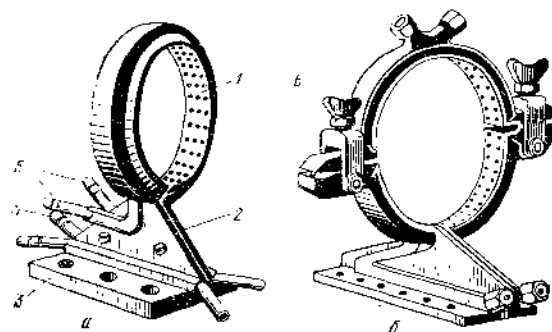
Существуют многочисленные различные конструкции закалочных индукторов в соответствии с многообразием деталей, подвергаемых поверхностной закалке. Учитывая назначение, можно выделить следующие основные виды закалочных индукторов для нагрева:

- 1) внешних цилиндрических поверхностей;
- 2) внутренних цилиндрических поверхностей;
- 3) плоских поверхностей;
- 4) поверхностей сложной формы, представляющих, как правило, комбинацию индукторов первых трех видов.

Индуктор состоит из собственно индуктирующего провода, создающего заданное электромагнитное поле, индуктирующее ток в нагреваемой детали; токоподводящих шин; контактных колодок, служащих для соединения индуктора с выводами понижающего трансформатора; устройств для подачи воды, охлаждающей индуктор и нагретую поверхность детали.

Типовая конструкция одновиткового индуктора для одновременной закалки внешней цилиндрической поверхности показана на рис. 100, а. Во время нагрева индуктирующий провод не охлаждается. Чтобы при этом его температура не превысила допустимой, т. е. 100—150° С, индуктирующий провод приходится выполнять достаточно массивным. Его толщина составляет (2,5—4,0) b_k при $f \leq 10$ кГц и 5—6 мм при более высокой частоте.

После окончания нагрева в полость индуктирующего провода подается вода, которая через отверстия во внутренней стенке разбрызгивается на поверхность нагретой детали, осуществляя ее



Р и с. 100. Неразъемный (а) и разъемный (б) индукторы для одновременной закалки цилиндрических деталей:

1 — индуктирующий провод; 2 — токопроводящие шины; 3 — контактные колодки; 4 — трубки для водоохлаждения колодок; 5 — трубки для водоохлаждения индуктирующего провода и закаливаемой детали; 6 — винтовой зажим

закалку. Одновременно индуктирующий провод охлаждается до начальной температуры. Каналы для подачи охлаждающей воды в индуктирующем проводе не должны иметь полостей, в которых может задерживаться жидкость. При нагреве следующей детали вода испаряется, пары, попадая на нагреваемую поверхность, создают области пониженной твердости. Обычно отверстия в индуктирующем проводе для выхода охлаждающей жидкости располагают рядами в шахматном порядке, шаг в ряду 8—10 мм, расстояние между рядами 4—5 мм. Диаметр отверстий 1,5—2,0 мм.

При одновременно-последовательной закалке индуктор постоянно охлаждается водой, которая в то же время разбрызгивается на нагретые участки детали через отверстия, выполненные в скосе передней (по ходу движения детали) стенки индуктора. Нередко в обоих вариантах закалки применяют отдельное, независимое от индуктора, душирующее устройство (спреер) для охлаждения детали.

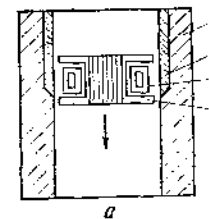
Для равномерного охлаждения поверхности детали при закалке и получении постоянной поверхностной твердости отверстия в индукторе (или спреере) выполняют под углом к оси детали и в плоскости, смещенной относительно оси детали, чтобы струи жидкости после удара о закаливаемую поверхность скользили по касательной к ней. При нагреве внешних поверхностей участков протяженных деталей, коленчатых валов и тому подобных изделий приходится применять разъемные индукторы (рис. 100, б). Основной трудностью при этом является создание

надежного контактного соединения половин индуктора, учитывая, что протекающий в индукторе ток составляет тысячи ампер.

Для закалки внутренней поверхности цилиндрических деталей чаще всего используют кольцевой одновитковый (а) или соленоидный (б) индукторы (рис. 101). Нагрев внутренних поверхностей гораздо сложнее, чем внешних. В последнем случае в индукторе кольцевой эффект и эффект близости действуют согласно, способствуя концентрации тока в узкой зоне, обращенной к детали. При нагреве же внутренней поверхности кольцевой эффект в индукторе

Р и с. 101. Индукторы для закалки внутренней цилиндрической поверхности:

1 — деталь; 2 — закаленный слой; 3 — индуктор; 4 — магнитопровод



оттесняет ток от детали, увеличивая тем самым эффективный зазор между токами в индукторе и изделии. Кроме того, в этом случае велико магнитное сопротивление потоку обратного замыкания, проходящему по узкому сечению внутренней полости индуктора. Соответственно велика составляющая тока индуктора I_0 , создающая магнитодвижущую силу. Оба эти фактора снижают электрический к. п. д. нагрева.

Для улучшения энергетических показателей системы индуктор—загрузка в этом случае используют:

1) П-образные магнитопроводы, чтобы за счет эффекта паза нейтрализовать катушечный эффект в индукторе и одновременно уменьшить магнитное сопротивление обратного замыкания. На частоте более 2500 Гц применяют магнитопроводы из феррита, до 2500 Гц — из листовой стали;

2) более высокую, чем при нагреве внешних поверхностей, частоту тока;

3) индукторы с минимальной радиальной толщиной витков; с этой целью применяют закалку под водой, для чего индуктор из тонкой ленты и закаливаемую деталь помещают в сосуд с охлаждающей водой. Благодаря высокой интенсивности индукционного нагрева постоянное охлаждение детали почти не ухудшает общий к. п. д.

Для нагрева внутренних поверхностей используют также петлевые индукторы, представляющие собой проходящие во внутренней полости детали прямой и обратный индуктирующие провода. При этом необходимо вращать нагреваемую деталь и также принимать перечисленные выше меры для повышения эффективности нагрева.

Для нагрева под закалку плоских поверхностей используют индукторы в виде плоских спиралей, зигзагообразные (а), петлевые индукторы (б), а также одиночные индуктирующие провода (в), располагаемые над нагреваемой поверхностью (рис. 102).

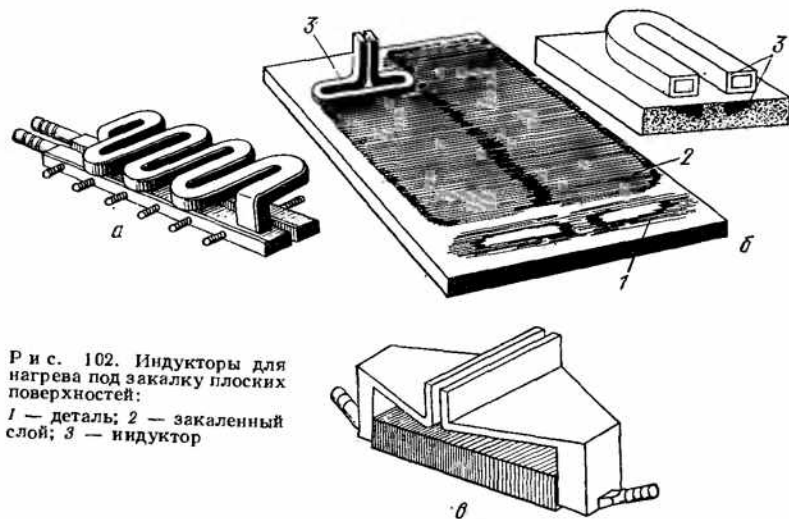


Рис. 102. Индукторы для нагрева под закалку плоских поверхностей:
1 — деталь; 2 — закаленный слой; 3 — индуктор

Энергетические показатели таких индукторов также гораздо ниже, чем у соленоидных индукторов для нагрева внешних цилиндрических поверхностей. Это, как и в индукторах для внутренних поверхностей, обусловлено неблагоприятным проявлением катушечного эффекта и эффекта близости в индуктирующих проводах. Кроме того, магнитные поля близко расположенных индуктирующих проводов с противоположным направлением токов (например, в петлевом или зигзагообразном индукторах) частично взаимно компенсируются, что уменьшает ток, индуцируемый в детали.

Для уменьшения влияния этих факторов используют высокую частоту тока, при которой улучшается электромагнитная связь индуктора и детали. На частотах 10 кГц и ниже применяют магнитопроводы. Последние широко используют в закалочных индукторах также для корректирования распределения температуры в нагреваемой детали. Так, установкой на индуктирующий провод локального пакета магнитопровода можно значительно интенсифицировать нагрев изделия на этом участке.

Индукторы для закалки деталей сложной формы обычно повторяют конфигурацию закаливаемой зоны. При этом для достижения необходимого качества нагрева на всем протяжении закаливаемой зоны используют эффект близости при переменном зазоре между индуктором и деталью, а также пакеты магнитопроводов.

§ 3. ЗАКАЛОЧНЫЕ УСТАНОВКИ

В состав закалочной установки входят:

- 1) закалочный станок или отдельные механизмы закрепления, вращения, перемещения, загрузки и выгрузки деталей;
- 2) закалочная головка, содержащая индуктор и понижающий трансформатор;
- 3) конденсаторная батарея;
- 4) система водоохлаждения элементов установки и закаливаемой детали (в закалочных установках практически вся подводимая мощность уносится охлаждающей водой; иногда установки имеют индивидуальную замкнутую систему водоохлаждения);
- 5) система автоматического управления режимом закалки;
- 6) источники питания (машинные, ламповые, тиристорные преобразователи) с пусковой и коммутирующей аппаратурой (генераторная станция).

Закалочные установки подразделяют на универсальные, предназначенные для закалки различных по размерам и форме деталей

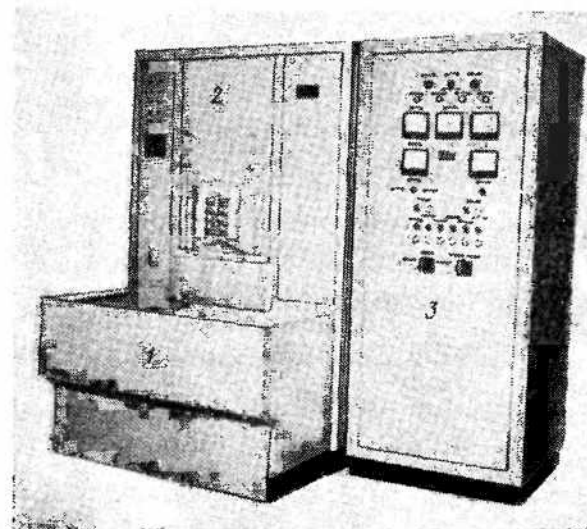


Рис. 103. Универсальная закалочная станция:
1 — сливной блок; 2 — нагревательный блок; 3 — шкаф управления

и специальные — для закалки определенной детали, обычно сложной формы и массового изготовления. В универсальных установках закалочная головка, конденсаторная батарея, системы водоохлаждения и автоматического управления закалкой компонуются в виде отдельной закалочной станции. Закалочная станция может работать в комплекте с различными типами универсальных станков или же с набором технологической оснастки (приспособлений, механизмов и др.), предназначенным для обрабатываемой номенклатуры деталей.

На рис. 103 показана универсальная закалочная станция типа ИЗ, содержащая сливной блок, нагревательный блок (закалочная головка, конденсаторная батарея и система водоохлаждения) и шкаф управления. Детали нагреваются в закалочном станке, пристраиваемом к нагревательному блоку (на рисунке не показан) или в приспособлении, монтируемом непосредственно на сливном блоке.

В специальных закалочных установках вся аппаратура, составляющая закалочную станцию, обычно встроена в закалочный станок.

Универсальные закалочные установки применяют, например, для непрерывно-последовательной закалки шлицевых валов и валов-шестерен, для одновременной закалки шеек валов, шестерен звездочек транспортеров, для последовательной закалки методом обкатки валов-шестерен и др.

Характерными деталями, обрабатываемыми в специальных закалочных установках, являются колесчатые и распределительные валы, гильзы цилиндров, пальцы траков, станины станков, головки концов рельсов и др.

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества индукционного метода нагрева под закалку перед другими методами?
2. Поясните, в чем различие между одновременной и непрерывно-последовательной закалкой.
3. В чем особенности нагрева внутренних поверхностей деталей?

ГЛАВА 18

РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

Расчет индуктора для поверхностной закалки состоит из трех этапов:

- 1) выбора частоты;
- 2) теплового расчета, в результате которого определяются мощность и время, требуемые для нагрева детали на заданную глубину при заданной температуре поверхности;
- 3) электрического расчета, который позволяет выбрать основные параметры индуктора и комплектующее электрооборудование.

§ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ И ГЛУБИНЫ ЗАКАЛЕННОГО СЛОЯ. ВЫБОР ЧАСТОТЫ

Ширина закаленного слоя h_2 детали, подлежащей закалке (рис. 104), определяется, с одной стороны, распределением тока в детали под индуктором, с другой, — растеканием тепла от нагретой зоны в толщу детали. В общем случае ширина нагретого слоя не равна высоте индуктора: она всегда меньше из-за теплоотвода в деталь. Опыт показывает, что в коротком индукторе ($h_1/D_1 < 1$) ширина закаленного слоя приблизительно равна $h_2 \approx 0,8h_1$; в длинном индукторе ($h_1/D_1 > 1$) можно принимать $0,8 < h_2 < 1,0$. Если производится закалка всей поверхности детали, то принимают $h_1 \approx h_2$, поскольку в этом случае теплоотвод в толщу детали невелик.

Глубина закаленного слоя b_k выбирается в соответствии с технологическими требованиями к детали. Опыт показал, что достаточная прочность стальных деталей малых и средних размеров достигается при соблюдении условия:

$$b_k = (0,05 - 0,10) D_2. \quad (18-1)$$

Выбор частоты при закалке производится исходя из необходимости получения высокого к. п. д. процесса нагрева при обеспечении требуемой глубины закаленного слоя b_k .

Опыт показал, что нагрев происходит достаточно быстро, без большого перепада температуры в нагреваемом слое, со сравнительно малым теплоотводом в толщу детали и с достаточно высоким к. п. д., если соблюдается условие

$$h_k < \Delta_k, \quad (18-2)$$

где Δ_k — горячая глубина проникновения тока.

Подставив в уравнение (18-2) выражение для Δ_k , перепишем его в виде

$$f < 1/4b_k^2. \quad (18-3)$$

Полученное выражение определяет верхний предел частоты. Обратим внимание, что выбор частоты при поверхностной закалке определяется не диаметром детали, а лишь требуемой глубиной закаленного слоя.

Нижнюю границу частоты находят из условия допустимых удельных (отнесенных к внутренней поверхности индуктора) электрических потерь в индукторе, Вт/м²:

$$P_{э.н} < 4 \cdot 10^6. \quad (18-4)$$

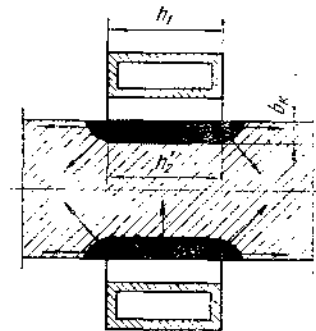


Рис. 104. Система индуктор—деталь установки одновременного нагрева

В этом случае

$$f > 1/70b_k^2. \quad (18-5)$$

Таким образом, область допустимых частот при поверхностной закалке

$$\frac{1}{70b_k^2} < f < \frac{1}{4b_k^2}. \quad (18-6)$$

Для уточнения выбора f в этом диапазоне частот рекомендуется пользоваться выражением

$$f_{\text{опт}} \approx \frac{1}{(15 - 20)b_k^2}, \quad (18-7)$$

полученным из условия $b_k \approx (0,4 - 0,5) \Delta_k$.

При значениях $b_k > 2$ мм целесообразно использовать средние частоты с применением машинных или тиристорных преобразователей частоты.

§ 2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ИНДУКТОРА

Для расчета необходимы следующие данные: глубина закаленного слоя b_k , температура поверхности T_0 , температура на глубине b_k — T_k (в среднем ее можно принять равной 750°C).

Мощность в процессе нагрева под поверхностную закалку меняется обычно не более чем на 30%, поэтому для расчетов ее можно принять постоянной, равной средней мощности за цикл нагрева.

Время нагрева τ_k может быть определено по формуле (16-13), причем глубину активного слоя определяют из выражения:

$$\xi = M \Delta_k,$$

где μ'_2 — относительная магнитная проницаемость на глубине $x > b_k$ (при приближенных расчетах можно принять $\mu'_2 = 16$);

$$M = f(b_k/\Delta_k, \mu'_2).$$

Значения M при $\mu'_2 = 16$ приведены ниже:

b_k/Δ_k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
M	0,250	0,293	0,369	0,447	0,532	0,614

b_k/Δ_k	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
M	0,690	0,770	0,831	0,902	0,953

При $b_k/\Delta_k > 1$ можно принять $M \approx 1,0$ и $\xi = \Delta_k$.

Вычислив по известному ξ величину α и β для $x = b_k$ и задавая несколькими значениями критерия Фурье находят соответствующие значения S -функции и строят зависимость T_0/T_k —

$= f(Fo)$. Для заданного значения T_0/T_k находят соответствующее ему значение критерия Фурье и времени нагрева τ_k :

$$\tau_k = Fo D_2^2 / 4a, \quad (18-8)$$

где коэффициент температуропроводности a может быть принят для стали равным $a = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Удельную мощность определяют по (16-14).

§ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИНДУКТОРА

Расчет индукторов для поверхностной закалки выполняют при следующих допущениях:

ширина зоны нагрева, в которой протекает индуцированный ток, принимается равной ширине индуктора $h_2 = h_1 = h$;

при нагреве под закалку всегда ярко выражен поверхностный эффект ($\xi < 0,2D_2$);

расчет выполняют только для заключительной стадии нагрева, которая полностью определяет параметры индуктора;

нагреваемую деталь в горячем режиме представляют в виде двухслойного тела, первый (наружный) слой которого прогрет на глубину b_k и немагнитен ($\mu'_2 = 1,0$), а второй (внутренний) слой ферромагнитен ($\mu'_2 > 1$).

Для расчета необходимы следующие данные:

диаметр детали D_2 , глубина закаленного слоя b_k , ширина закаливаемой полосы h' (при одновременном нагреве) или время нагрева τ_k или мощность генератора P_r (при непрерывно-последовательном нагреве), размеры токоподводящих шин одновиткового индуктора, частота источника питания f .

Последовательность выполнения расчета

1. Внутренний диаметр индуктора (см. рис. 104)

$$D_1 = D_2 + 2b_3, \quad (18-9)$$

где b_3 — величина воздушного зазора;

$b_3 = 2 \div 5$ мм, если $D_2 \leq 50$ мм;

$b_3 = 5 \div 10$ мм, если $D_2 > 100$ мм.

2. Толщина токонесущей стенки индуктирующего провода при одновременном нагреве (когда индуктор не имеет постоянного охлаждения, его токонесущая стенка выполняется массивной):

$$b_k = (2,5 - 4,0) b_k. \quad (18-10)$$

При непрерывно-последовательном нагреве, если $f < 10^4$ Гц, толщина b_k выбирается по возможности близкой к оптимальной $b_{k, \text{опт}} \approx 1,57 \Delta_1$; при радиочастотах из соображений механической прочности $b_k \geq 0,5$ мм.

3. Ширина индуктора при одновременном нагреве $h_1 \approx 1,2h'_2$, если нагревается участок поверхности детали h'_2 и $h_1 = h_2$ при закалке всей поверхности (h_2 — длина детали).

При непрерывно-последовательном нагреве, если задана мощность генератора P_r , м:

$$h_1 = \frac{P_r \eta_{тр} \eta_{и}}{P_{пов} \pi D_2}, \quad (18-11)$$

где $\eta_{тр}$ — к. п. д., закалочного трансформатора (в среднем $\eta_{тр} \approx 0,85$);

$\eta_{и}$ — к. п. д. закалочного индуктора (в среднем можно принять $\eta_{и} \approx 0,75$).

Если задана производительность, то

$$h_1 = v \tau_{и}, \quad (18-12)$$

где v — линейная скорость взаимного перемещения индуктора и детали, м/с.

4. Активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктирующего привода, Ом:

$$r_1 = x_{1в} \approx \rho_1 \frac{\pi D_1}{\Delta_1 h_1}. \quad (18-13)$$

5. Активное и внутреннее реактивное сопротивления токоподводящих шин закалочного индуктора, Ом:

$$r_{ш} = \sum_{i=1}^m \rho_1 \frac{|2l_i|}{\Delta_1 h_{ши}} = x_{шв}, \quad (18-14)$$

где l_i — длина i -того участка шины;

$h_{ши}$ — ширина (средняя) i -того участка;

n — число участков шин с различным значением $h_{ши}$.

6. Полное реактивное сопротивление шин, Ом:

$$x_{ш} = \sum_{i=1}^n \left(x_{шв} + 7,9 \cdot 10^{-6} f \frac{l_i b_{иш}}{h_{ши}} \right), \quad (18-15)$$

где $b_{иш}$ — зазор между шинами, который для уменьшения $x_{ш}$ принимают минимальным, равным 2—3 мм.

7. Реактивные сопротивления обратного замыкания x_0 и воздушного зазора x_3 определяют по формулам (7-8) и (7-11).

8. Активное r_2 и внутреннее реактивное $x_{2в}$ сопротивления нагреваемой детали определяют по формулам для двухслойного тела, принимая удельное электросопротивление стали при температуре 750—1000°С равным $\rho_2 \approx 10^{-6}$ Ом·м:

$$r_2 \approx 2,81 \cdot 10^{-6} \frac{\pi (D_2 - \xi)}{h} \sqrt{f} R, \quad (18-16)$$

$$x_{2в} = r_2 X/R. \quad (18-17)$$

Значения вспомогательных функций R и X определяются в зависимости от относительной глубины закаленного слоя b_k/Δ_k :

b_k/Δ_k	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
R	1,580	1,500	1,360	1,185	1,046	0,938	0,857
X	0,884	0,677	0,530	0,471	0,466	0,477	0,496

b_k/Δ_k	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	>1,6
R	0,799	0,754	0,698	0,675	0,67	$R \approx X = 0,707$
X	0,502	0,546	0,595	0,640	0,67	

9. Приведенные сопротивления нагреваемой детали r'_2 и x'_2 определяют по формулам (7-16) и (7-17).

10. Эквивалентные параметры индуктора:

$$r_3 = r_1 + r'_2; \quad x_3 = x_{1в} + x'_2; \quad (18-18)$$

$$r_{и} = r_3 + r_{ш}; \quad x_{и} = x_3 + x_{ш}; \quad (18-19)$$

$$z_{и} = \sqrt{r_{и}^2 + x_{и}^2}. \quad (18-20)$$

11. Остальные параметры индукционной закалочной установки находят по формулам § 1 гл. 7.

По результатам расчета индуктора выбирают закалочный согласующий трансформатор, мощность и вторичное напряжение которого должны соответствовать значениям, полученным в расчете.

ГЛАВА 19

УСТАНОВКИ ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

§ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Нагрев непроводниковых материалов в переменном электрическом поле (диэлектрический нагрев) отличен по физической сущности процесса от индукционного нагрева металлов. Тем не менее оба процесса имеют много общего, близки по используемому электрооборудованию и поэтому рассматриваются в одном курсе.

В обоих случаях нагрев осуществляется внутренними источниками тепла без использования контактов путем воздействия на нагреваемый материал электромагнитного поля. При индукционном нагреве основная роль принадлежит магнитной составляющей поля, при диэлектрическом — электрической составляющей.

Нагреваемый непроводниковый материал располагается между пластинами конденсатора, который подключается к источнику питания достаточно высокого напряжения и частоты (см. рис. 2). Причиной нагрева диэлектрика является воздействие электрического поля между пластинами на заряженные частицы диэлектрика.

Диэлектрики в отличие от проводников не имеют свободных заряженных частиц (электронов или ионов), которые под действием электрического поля могли бы перемещаться в пределах всего материала, образуя ток проводимости.

Отличительная особенность диэлектриков состоит в том, что составляющие его заряженные частицы находятся во взаимно связанном состоянии. При воздействии на диэлектрик электрического поля эти заряженные частицы могут смещаться одни отно-

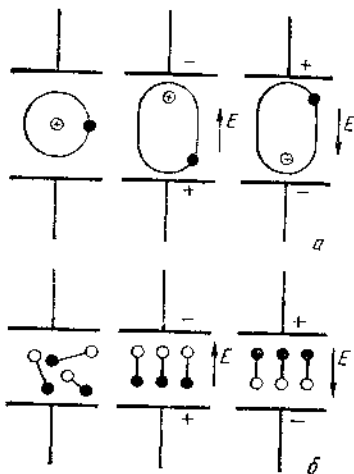


Рис. 105. Поляризация диэлектрика в электрическом поле конденсатора:

а — электронная; б — дипольная

сительно других лишь на ограниченные расстояния, зависящие от природы данного материала. Такое смещение заряженных частиц называется поляризацией. Различают несколько видов поляризации.

Смещение под действием электрического поля электронов относительно положительного ядра атома называется электронной поляризацией. Схема этого явления показана на рис. 105, а на примере простейшего атома — водорода. При отсутствии напряжения на пластинах конденсатора центр орбиты вращения отрицательно заряженного электрона совпадает с положительно заряженным ядром. При подаче на пластины разности потенциалов и возникновении электрического поля с напряженностью E атом деформируется: ядро сместится в направлении вектора E , а орбита электрона вытянется в противоположном направлении.

В диэлектриках, молекулы которых состоят из связанных друг с другом положительных и отрицательных ионов, имеет место дипольная поляризация (рис. 105, б). Электрическое поле, действуя на такую полярную молекулу, стремится повернуть ее в направлении напряженности поля. Это явление называется дипольной поляризацией. Если поместить в электрическое поле кристалл, имеющий правильную структурную решетку, составленную из ионов, то кристаллическая решетка несколько исказится: положительные ионы сместятся в направлении поля, а отрицательные — в противоположном направлении (ионная поляризация).

Существует еще несколько видов поляризации. Каждому диэлектрику присуще свойство поляризации, причем обычно в одном диэлектрике проявляется несколько ее видов. Как было показано, поляризация сопряжена со смещениями несущих электрические заряды материальных частиц вещества. Однако эти смещения заряженных частиц встречаются противодействие со стороны соседних частиц вещества, с которыми они связаны внутриатомными, внутри-

молекулярными силами. Другими словами, упрощенно можно считать, что движение заряженных частиц в диэлектрике происходит при наличии некоторого «трения». На преодоление этого трения источнику питания конденсатора приходится расходовать энергию, которая превращается в диэлектрике в тепло. Таков механизм нагрева непроводящего материала в электрическом поле.

Каждое изменение направления поля в диэлектрике сопровождается смещением заряженных частиц и выделением тепла. Поэтому чем выше частота приложенного к пластинам конденсатора напряжения, тем интенсивнее нагрев диэлектрика. Увеличение абсолютного значения этого напряжения также способствует усилению нагрева, так как при этом возрастает амплитуда перемещения заряженных частиц. Очевидно, что интенсивность нагрева должна зависеть и от свойств самого диэлектрика.

Для величины энергии, выделяющейся в единице объема диэлектрика в единицу времени, получено выражение, Вт/м³:

$$P = 2\pi f \epsilon \operatorname{tg} \delta E^2, \quad (19-1)$$

где f — частота тока, Гц;

ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества, Ф/м;

δ — угол потерь;

E — действующее значение напряженности электрического поля, В/м.

Для плоского конденсатора E равно приложенному к пластинам напряжению, поделенному на расстояние между пластинами.

Через конденсатор, включенный в электрическую цепь с источником переменного напряжения, протекает электрический ток смещения, обусловленный изменением во времени электрического поля конденсатора и периодическим смещением заряженных частиц помещенного между пластинами конденсатора диэлектрика. В любой момент времени ток смещения равен току проводимости цепи, в которую последовательно включен конденсатор. Таким образом, на переменном напряжении ток смещения является как бы продолжением тока проводимости, делая цепь тока замкнутой.

Если бы отсутствовало «трение» материальных частиц диэлектрика при поляризации, ток смещения опережал бы на векторной диаграмме напряженность электрического поля на 90°. Из-за «трения» поляризация запаздывает по отношению к напряженности поля. Соответственно ток поляризации, составляющий часть общего тока смещения, а значит, и сам ток смещения будет опережать напряженность электрического поля на угол, меньший, чем 90° (рис. 106).

Из рис. 106 следует, что величина δ , входящая в формулу (19-1), представляет собой угол, дополняющий угол сдвига фаз φ между I_c и \dot{E} до 90°. Чем больше «трение» при поляризации, тем больше угол потерь δ .

Величины ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ не являются константами для данного диэлектрика, а зависят от частоты. На рис. 107 показаны зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от частоты для диэлектрика с дипольной поляризацией.

При низких частотах диполи диэлектрика почти не отстают от медленных изменений поля. Потери на трение и соответственно угол δ малы. С ростом частоты возрастает скорость поворота диполей и противодействующее повороту трение. Увеличивается выделение тепла в диэлектрике, растет характеризующий его $\operatorname{tg} \delta$. Однако после некоторого значения частоты дальнейшее ее

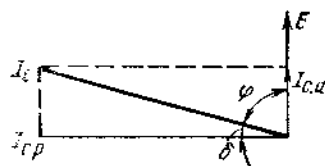


Рис. 106. Векторная диаграмма: E — напряженность электрического поля; I_c — ток смещения в конденсаторе; $I_{c.p.}$ и $I_{c.a.}$ — реактивная и активная составляющие тока смещения; φ — угол сдвига фаз напряженности и тока смещения; δ — угол потерь

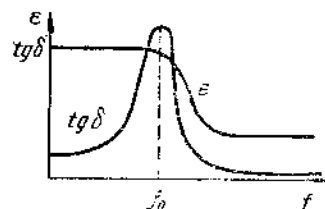


Рис. 107. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ от частоты f (f_0 — частота, соответствующая наибольшему значению произведения $\epsilon \operatorname{tg} \delta$)

увеличение приводит к уменьшению величин $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ . Это обусловлено тем, что при слишком высокой частоте диполи уже не успевают совершать полные повороты за быстро изменяющимся электрическим полем.

Произведение $\epsilon \operatorname{tg} \delta$, характеризующее влияние природы диэлектрика на интенсивность его нагрева в электрическом поле, называют фактором потерь.

Несовершенные диэлектрики, а также полупроводники наряду со связанными зарядами имеют некоторое количество свободных зарядов. Поэтому при внесении таких материалов в переменное электрическое поле наряду с токами смещения возникают токи проводимости, как и в металлах. Эти токи геометрически складываются. Нагрев подобных материалов будет происходить за счет рассмотренного выше явления поляризации и одновременно выделения тепла от тока проводимости.

Интенсивность нагрева полупроводников в электрическом поле также можно характеризовать углом потерь δ (рис. 106), который по величине превышает угол потерь диэлектриков.

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК

В нагреваемом материале, помещенном в рабочий конденсатор установки, должна быть выделена активная мощность, достаточная для:

нагрева обрабатываемого материала в заданное время до требуемой температуры;

проведения предусмотренных технологией фазовых превращений, изменений полиморфного состояния или осуществления химических реакций;

компенсации тепловых потерь в окружающую среду.

Расчет перечисленных составляющих расхода энергии производится на основе заданных технологических требований к нагреву и знания теплофизических свойств обрабатываемых материалов. Например, при затратах тепла только на нагрев или только на удаление влаги удельная мощность, выделяемая в диэлектрике, должна соответственно составлять, Вт/м³:

$$P_n = 4,18 \frac{\gamma c}{\eta_r} \cdot \frac{\Delta T}{\tau} \quad (19-2)$$

$$\text{или } P_c = 4,18 \frac{m}{\eta_r} \cdot \frac{\Delta M}{\tau}, \quad (19-3)$$

где γ — плотность материала, кг/м³;
 c — удельная теплоемкость, Вт/(кг·К);
 $\Delta T/\tau$ — скорость нагрева, К/с;
 η_r — тепловой к. п. д. нагрева;
 m — скрытая теплота парообразования, Вт/кг;
 $\Delta M/\tau$ — скорость удаления влаги (сушки), кг/м³.

Приравняв выражение (19-1) к выражениям (19-2), (19-3) или к их сумме, можно получить уравнение энергетического баланса тепла и определить основные величины, характеризующие процесс нагрева и сушки в электрическом поле.

Главными варьируемыми параметрами при разработке установки являются рабочая частота и напряженность электрического поля в нагреваемом материале. Как следует из выражения (19-1), заданную удельную мощность можно получить при различном соотношении величин E и f . Предел увеличению E устанавливается из условия электрического пробоя между пластинами конденсатора, что является недопустимым, так как вызывает порчу обрабатываемого материала, опасность воспламенения и т. п. Учитывая, что конденсатор, в котором происходит нагрев диэлектрика, работает в тяжелых условиях, для предупреждения возможных пробоев напряженность электрического поля в материале выбирают в 1,5—2,0 раза меньше значения определяемой экспериментально пробивной напряженности.

Если между пластинами конденсатора и нагреваемым материалом отсутствует воздушный зазор, подведенное к пластинам напряжение целиком приложено к материалу. Однако в ряде случаев, например, при нагреве изделий сложной формы или при методическом нагреве деталей, перемещаемых между пластинами конденсатора, имеется воздушный зазор. Тогда приложенное к пластинам напряжение распределено между двумя последова-

тельно включенными диэлектриками: нагреваемым материалом и воздухом. В этом случае напряженности электрического поля в слоях приблизительно обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям обоих материалов. Нагреваемые материалы обычно имеют в существенно большую, чем у воздуха. Поэтому при работе с воздушным зазором ограничением в выборе величины напряженности электрического поля в нагреваемом материале часто служит допустимая, с точки зрения пробоя, напряженность поля, получающаяся в воздушном зазоре.

При сушке или нагреве материалов, выделяющих пары воды и других веществ, понижаящих пробивную прочность воздуха, принимают допустимую напряженность поля в воздушном зазоре равной 1000—1500 В/см. Если таких выделений нет, допускают 2000—6000 В/см.

На воздушный зазор приходится обычно большая часть питающего напряжения. Не рекомендуется работать как с очень малыми зазорами (менее 10 мм), так и с очень большими. В первом случае незначительное изменение состояния поверхности материала и электродов или содержания в зазорах паров воды может привести к пробоям по воздуху. При больших же зазорах снижается интенсивность нагрева, так как уменьшается часть напряжения, приходящаяся на обрабатываемый материал.

Задавшись допустимой напряженностью поля в материале E_m , по формулам (19-1)—(19-3) определяют рабочую частоту тока, Гц;

при затратах тепла только на нагрев

$$f = 7,53 \cdot 10^{12} \frac{\gamma c}{\varepsilon \operatorname{tg} \delta \eta_r} \frac{\Delta T}{\tau} \frac{1}{E_m^2}; \quad (19-4)$$

при затратах тепла только на испарение

$$f = 7,53 \cdot 10^{12} \frac{m}{\varepsilon \operatorname{tg} \delta \eta_r} \frac{\Delta M}{\tau} \frac{1}{E_m^2}. \quad (19-5)$$

При расчете частоты следует учитывать, что фактор потерь $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ также зависит от f . Чтобы работать с меньшими напряженностями поля при сохранении интенсивности нагрева, следует увеличивать частоту.

Однако допустимый верхний предел частоты ограничивается двумя основными обстоятельствами: возможностью согласования параметров рабочего конденсатора и питающего генератора и обеспечением достаточно высокого электрического к. п. д. установки.

Установки диэлектрического нагрева работают на высоких частотах и питаются от ламповых генераторов. Для установления выгодного режима работы генератора необходимо согласование с его параметрами эквивалентных параметров нагрузки. В нашем случае нагрузкой является рабочий конденсатор, который вместе с элементами согласования, содержащими индуктивность,

образует нагрузочный колебательный контур. Чем больше емкость рабочего конденсатора, тем труднее при высоких частотах согласовать ее с параметрами генератора.

Эквивалентные емкость и индуктивность нагрузочного контура определяют максимальную частоту колебаний, при которой еще возможно настроить в резонанс нагрузочный контур и передать мощность от генератора к нагрузке, Гц:

$$f_{\max} = \frac{15,9 \cdot 10^6}{\sqrt{CL}}, \quad (19-6)$$

где C и L — емкость (Ф) и индуктивность (Г) нагрузочного контура.

При определении эквивалентных емкости и индуктивности контура следует учитывать межэлектродные емкости генераторных ламп, индуктивности и емкости монтажа, которые составляют относительно большие величины в связи с высокой рабочей частотой.

Формула (19-6) ограничивает верхний предел выбираемой частоты тока. С увеличением f снижается к. п. д. генератора, что также должно приниматься во внимание при выборе частоты.

В случаях, когда частота тока настолько велика, что длина волны соизмерима с размерами пластин конденсатора, напряжение вдоль пластин непостоянно, что ведет к неравномерности нагрева материала.

Основными причинами неравномерности нагрева, с которыми приходится сталкиваться при разработке данного оборудования, являются неоднородность материала или сложная форма изделий и соответственно переменная величина воздушного зазора против различных участков деталей. Для устранения неравномерного нагрева применяют: рациональную укладку неоднородного материала (вдоль или поперек направления напряженности поля); специальные вкладыши в нагреваемое изделие из диэлектрика или металла; многопозиционный нагрев, когда в каждой из позиций различно взаимное расположение пластин и нагреваемого тела.

§ 3. ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Каждая установка диэлектрического нагрева состоит из питающего лампового генератора, рабочего конденсатора, конструктивное выполнение которого индивидуально для каждого технологического процесса, и различных вспомогательных приспособлений и устройств (механизмов перемещения нагреваемых изделий, системы вентиляции и др.). Для примера на рис. 108 показан внешний вид установки методического действия для сушки литейных стержней. Стержни укладываются на движущуюся ленту и, проходя между двумя горизонтальными решетчатыми пластинами конденсатора, нагреваются с выделением избыточной влаги.

Одновременно производится термообработка стержней, заключающаяся в расплавлении крепителя или в нагреве его для полимеризации.

По применяемым частотам установки диэлектрического нагрева можно условно разделить на установки средневолнового, коротковолнового и метрового диапазонов.

Первые работают на частоте 0,3—3,0 МГц. Применяются для нагрева материалов с большим фактором потерь $\epsilon \lg \delta$, к которым относятся главным образом очень влажные материалы при относительно больших размерах нагреваемых объектов. Генераторы

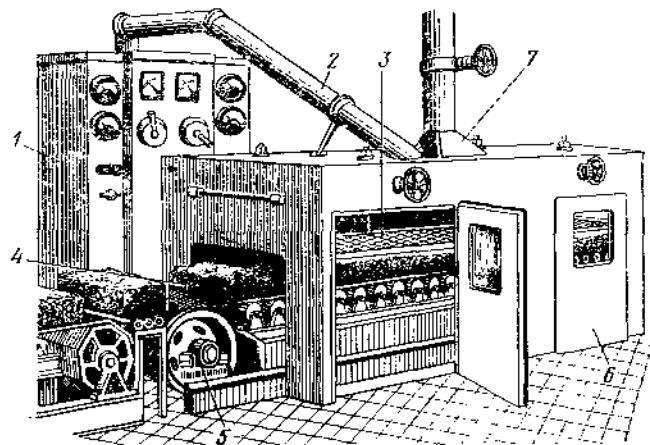


Рис. 108. Установка для сушки литых стержней:

1 — генератор; 2 — токоподвод; 3 — верхняя пластина конденсатора; 4 — нагреваемые стержни; 5 — механизм перемещения; 6 — кожух; 7 — вентиляционный кожух

имеют сравнительно высокий электрический к. п. д. $\eta_s = 0,5 \div 0,6$. Легко выполняются генераторы мощностью до нескольких сот киловатт. Нагрев ведется на невысоких мощностях ($p = 0,01 \div 1,0 \text{ Вт/см}^3$) при длительности нагрева при сушке с испарением влаги в десятки часов. Напряжение на рабочем конденсаторе высоко (10—15 кВ).

Установки коротковолнового диапазона ($f = 3 \div 30 \text{ МГц}$) применяются для нагрева материалов со средними значениями фактора потерь. К. п. д. установки 0,4—0,55. Обычно мощность генератора не превосходит нескольких десятков киловатт, объем одновременно нагреваемого материала невелик. Удельная мощность $p = 1 \div 100 \text{ Вт/см}^3$. Сушка с испарением влаги проходит в течение нескольких часов, без испарения влаги — доли часа. Установки удобны для работы с воздушным зазором и для осуществления методического нагрева.

Установки метрового диапазона ($f = 30 \div 300 \text{ МГц}$) имеют $\eta_s = 0,3 \div 0,4$, применяются для материалов с малым значением

$\epsilon \lg \delta$. Выполнить генератор большой мощности затруднительно, поэтому объем одновременно нагреваемой загрузки невелик ($p = 0,1 \div 3,0 \text{ кВт/см}^3$); время нагрева часто составляет секунды; установки удобны для работы с воздушным зазором.

Получают распространение еще более высокочастотные установки — дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн. По технологическому признаку в настоящее время нашли распространение следующие виды установок:

для сушки различных материалов (литых стержней, древесины, семян злаковых культур и др.);

для нагрева пластмасс перед штамповкой из них изделий; для сварки термопластичных пластмасс (винипласта, эластичного пластика и др.);

для склеивания и изготовления слоистых материалов типа фанеры, гетинакса, миканита и др.,

для вулканизации резины;

для термообработки пищевых продуктов (приготовление и подогрев пищи, стерилизация при консервировании и др.);

для медицинских целей (лечение некоторых болезней).

Для перечисленных выше установок характерны следующие преимущества, присущие диэлектрическому нагреву в сравнении с другими, традиционными видами низкотемпературного (до 300°C) нагрева:

обеспечение высокой скорости нагрева во всем объеме материала независимо от его размеров и теплопроводности;

получение равномерного распределения температуры по объему изделия, возможность превышения температуры внутренних слоев над температурой поверхности, что важно для эффективного удаления влаги при сушке;

удобство и мобильность управления интенсивностью нагрева;

компактность и возможность встройки в поточные линии.

Серьезным недостатком оборудования для диэлектрического нагрева является его более высокая стоимость по сравнению с оборудованием для других видов нагрева. Поэтому применение диэлектрического нагрева оправдано в тех случаях, когда при этом обеспечивается лучшее качество дорогостоящих изделий или эффективное усовершенствование технологических процессов. Приемлемых технико-экономических показателей удастся добиться также совмещением диэлектрического нагрева с нагревом внешними источниками тепла, как, например, в процессе энергоемкой сушки влажных материалов.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины, вызывающие нагрев диэлектриков в электрическом поле высокой частоты, и от каких факторов зависит интенсивность нагрева?
2. Как распределяются мощность и рабочая частота установок для диэлектрического нагрева?
3. Назовите области применения диэлектрического нагрева в промышленности.

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

§ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И КОМПОНОВКА

В общем случае индукционная нагревательная или плавильная установка состоит из:

- 1) источника питания (машинный, тиристорный или ламповый преобразователь частоты — на средних и высоких частотах) либо силового трансформатора — на промышленной частоте;
- 2) согласующего устройства (согласующий трансформатор, автотрансформатор или дроссель) для согласования параметров индуктора и источника питания;
- 3) конденсаторной батареи для компенсации реактивной мощности установки;
- 4) индуктора нагревателя или плавильной установки;
- 5) линии передач токов высокой, средней или промышленной частоты, соединяющей индуктор с источником питания и с конденсаторной батареей;
- 6) щитов и пультов управления для управления и автоматического регулирования режимов работы установки;
- 7) механизмов загрузки, выгрузки и перемещения заготовок; наклона печи для разлива металла и т. п.

Электрические схемы и компоновку индукционных установок рассмотрим на примере установок средней частоты, которые получили наибольшее распространение в промышленности.

Питание индукционных установок бывает либо индивидуальное, либо централизованное. При индивидуальном питании каждая индукционная установка подключена к отдельному (своему) источнику. При централизованном питании несколько источников (преобразователей частоты) объединены в одну преобразовательную подстанцию с общими выходными шинами, к которым подключены несколько индукционных нагревателей.

На рис. 109 приведена схема индивидуального питания индукционной установки от машинного преобразователя частоты.

Многовитковые индукторы плавильных печей и нагревательных установок выполняют таким образом, чтобы параметры системы индуктор—загрузка соответствовали параметрам генератора. Этого добиваются изменением числа витков или выбором соответствующей схемы колебательного контура. В этом случае индуктор подключают непосредственно к его зажимам через контактор $KЛ$ (рис. 109, а).

Индукторы для закалки, зонной плавки, плавки во взвешенном состоянии и в некоторых других случаях требуют, как правило, низкого напряжения (часто значительно ниже номинального напряжения генератора). В таких случаях для согласования параметров индуктора и генератора применяют согласующие трансформаторы $Тр$ (рис. 109, б).

Линейный контактор $KЛ$ используют для полного отключения нагрузки от генератора при настройке элементов схемы и ремон-

тах. Оперативное включение и отключение установки можно выполнять не контактором, а снятием напряжения с обмотки возбуждения генератора $ОВГ$ с помощью реле $РВГ$ в цепи возбуждения.

Контроль силовой цепи ведут с помощью электроизмерительных приборов A , V , φ , W , подключаемых через трансформаторы тока $ТТ$ и напряжения $ТН$. Защиту генератора от перегрузки по току и напряжению осуществляют с помощью реле максималь-

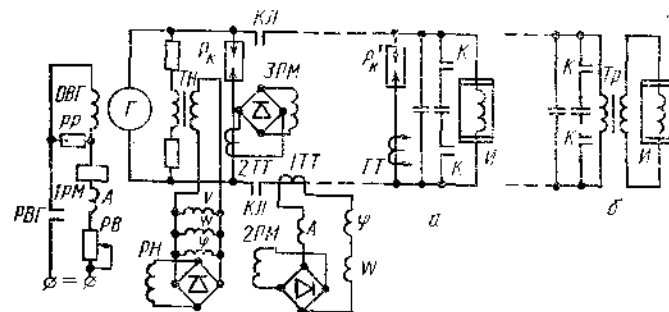


Рис. 109. Принципиальная схема индивидуального питания индукционной установки от машинного генератора

ного тока $РМ$ и реле напряжения $РН$, подключаемых к трансформатору тока $ТТ$ и трансформатору напряжения — $ТН$, через выпрямители. Вспомогательные контакты реле включены в цепь реле $РВГ$. Для предотвращения аварийных перенапряжений при обрыве цепи индуктора рабочую обмотку генератора закорачивают (машинный преобразователь не боится коротких замыканий) безынерционным пробивным разрядником $Р_k$ или $Р'_k$, в цепь которого включают трансформатор $2ТТ$ или $2ТТ'$. Ко вторичной обмотке этого трансформатора подсоединяют реле $ЗРМ$, вспомогательный контакт которого отключает реле возбуждения генератора $РВГ$.

Централизованное питание индукционных установок существенно улучшает использование генераторов. Возбуждение параллельно включенных генераторов осуществляется от общего источника, снабженного системой автоматического регулирования напряжения на генераторах, с обратной связью по напряжению на сборных шинах. Поэтому такая схема не позволяет регулировать режим нагрева отдельного индукционного нагревателя без изменения режима других нагревателей, подключенных на эти же сборные шины. Централизованную схему питания применяют тогда, когда в одном цехе установлено много сравнительно мелких нагревателей при значительной суммарной мощности. При этом все преобразователи монтируют в одном помещении, называемом машинным залом.

Подключение мощной однофазной установки к трехфазной сети может вызвать неравномерную загрузку (перекос) фаз. Поэтому, если мощность питающей подстанции невелика, следует стремиться к тому, чтобы число установок в цехе было кратно трем. Если же несимметрия напряжений по фазам превышает 2,0%, то применяют так называемые симметрирующие устройства, выравнивающие нагрузку по фазам.

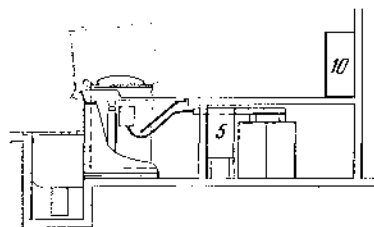
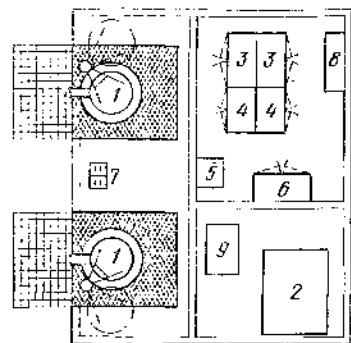


Рис. 110. Компоновка плавильной установки с двумя печами и одним комплектом электрооборудования

При размещении индукционных нагревательных и плавильных установок нужно руководствоваться конкретными условиями их эксплуатации в цехе, удобством обслуживания и выполнения ремонтных работ, а также условиями проведения соответствующих технологических операций, предусмотренных технической документацией на установку. Во всех случаях при компоновке оборудования необходимо соблюдать существующие правила устройства электротехнических установок ПУЭ.

На рис. 110 показана одна из возможных компоновок оборудования индукционной плавильной установки средней частоты, состоящей из двух печей 1 и одного комплекта электрооборудования.

Машинный преобразователь частоты 2 обычно находится в отдельном изолированном помещении на уровне первого этажа на расстоянии не более 100—150 м от печи. Тиристорный преобразователь может быть расположен как в отдельном помещении, так и непосредственно в плавильном отделении рядом с печью.

Конденсаторную батарею, в общем случае состоящую из коммутируемой 3 и постоянно включенной 4 частей, с целью снижения потерь в контурном шинпроводе следует размещать в непосредственной близости от плавильной печи (на расстоянии не более 10—20 м). Возможно устанавливать батарею в машинном зале, т. е. там же, где преобразователь, если он расположен вблизи печи, а также в непосредственной близости от печи на уровне пола в подвальном помещении или на уровне второго этажа.

В случае, установки двух печей и одного комплекта электрооборудования (рис. 110) между печами и конденсаторной батареей монтируют силовой переключатель 5 (как правило — водоохлаждаемый). Когда на одной из печей нужно менять футеровку,

она отключается от контура переключателем 5, и включается вторая печь.

Пульт управления наклоном печей 7 устанавливают на рабочей площадке рядом с печами так, чтобы при разливке оператору был виден сливной носок. Щиты управления и автоматического регулирования электрического режима 10 с контрольно-измерительной аппаратурой располагаются на рабочей площадке на некотором удалении от печей так, чтобы был хороший обзор и свободный доступ к ним. Маслонапорная установка 9 гидропривода наклона печи может быть смонтирована как непосредственно у печей, так и в другом помещении (например, в машинном зале).

Аппаратуру системы водоохлаждения установки обычно располагают вблизи печи в одном месте, удобном для визуального наблюдения и регулирования расхода воды. Для дистанционного контроля за расходом воды в систему охлаждения вводят струйные реле или реле давления, отключающие установку при прекращении подачи охлаждающей воды.

При необходимости в комплект установки вводят симметрирующее устройство 6, а также дополнительные щиты 8 с электроаппаратурой.

В отличие от плавильных установок, в которых сама электропечь с механизмом наклона всегда выделена в отдельный блок (рис. 110), нагревательные установки часто выполняют в виде единой конструкции на общей раме, включающей все элементы установки, кроме источника питания. Последний может устанавливаться либо рядом, либо в отдельном помещении.

В остальном требования к компоновке плавильных и нагревательных установок одинаковы.

§ 2. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

В качестве источников питания индукционных установок в настоящее время используют: машинные генераторы (МГ), тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ) и ламповые генераторы (ЛГ).

Машинные генераторы

Для установок индукционного нагрева применяют электромашины преобразователи частоты индукторного типа, у которых магнитная индукция B в какой-либо точке воздушного зазора между ротором и статором изменяется по величине, не изменяя направления (рис. 111, б).

Пульсирующий магнитный поток в области зубцовой зоны статора 1 (рис. 111, а) создается с помощью вращающегося ротора 2, имеющего зубчатую поверхность. Рабочая обмотка 3 переменного тока индукторного генератора укладывается в пазы статора. С помощью обмотки возбуждения, расположенной также на статоре (на рис. 111, а не показана) и питаемой от отдельного источника постоянного тока, создается магнитное поле, силовые линии

которого направлены нормально по отношению к зазору. Обычно число зубцов ротора в два раза меньше числа зубцов статора. При вращении ротора его зубцы создают местные пульсации магнитной индукции в зазоре (рис. 111, а), причем частота пульсаций, а следовательно, и частота изменения тока в рабочей обмотке

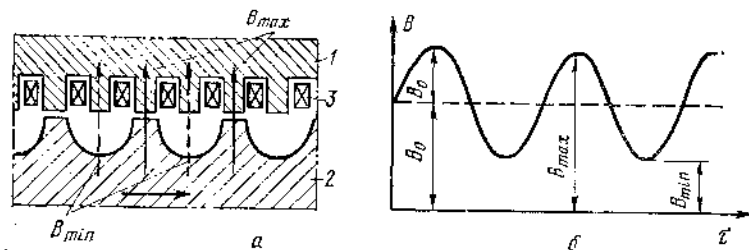


Рис. 111. Зубцовая зона индукторного генератора (а) и характер изменения магнитной индукции в зубце статора во времени (б)

генератора прямо пропорциональны числу зубцов ротора и частоте его вращения. В промышленности используются индукторные генераторы с рабочей частотой от 0,5 до 10 кГц.

В зависимости от расположения оси преобразовательного агрегата различают преобразователи вертикального и горизонтального исполнения, а в зависимости от вида охлаждения — с воздушным и водяным охлаждением.

По компоновке различают преобразователи двух видов. Однокорпусные, в которых ротор генератора и ротор приводного двигателя насаживаются на одну ось и располагаются в одном корпусе. При такой конструкции возможна полная герметизация корпуса, что защищает конструкцию от производственной пыли и значительно снижает уровень шума при его работе. Поэтому однокорпусные преобразователи могут устанавливаться как в отдельных помещениях, так и в производственных помещениях в непосредственной близости от нагревательных установок. Двухмашинные преобразовательные агрегаты. Они состоят из отдельного двигателя, соединенного с индукторным генератором (выполненным в отдельном корпусе) с помощью муфты. В двухмашинном исполнении изготавливают мощные преобразователи (свыше 500 кВ·А). Такие преобразователи устанавливают в звукоизолированных машинных залах.

Тиристорные преобразователи частоты

В последние годы в качестве источника питания средней частоты все шире применяются статические преобразователи частоты. Они имеют ряд преимуществ перед машинными: отсутствие вращающихся частей и бесшумность в работе; более высокий к. п. д.; как при номинальной, так и при неполной нагрузке (см. рис. 46),

отсутствие потерь холостого хода; возможность автоматического поддержания оптимального энергетического режима без переключений в силовых цепях — за счет автоматического изменения частоты инвертора при изменении параметров загрузки; высокая готовность их к работе и др.

Принципиальная схема силовых цепей тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ), выпускаемых промышленностью, и схема подключения к нему нагрузки приведены на рис. 112.

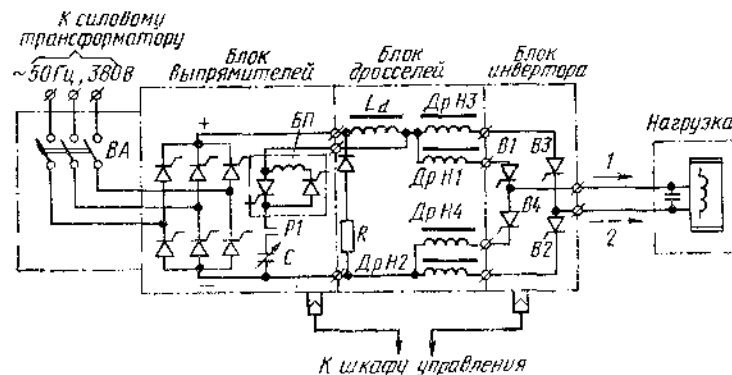


Рис. 112. Принципиальная схема силовых цепей Тиристорного преобразователя частоты

Преобразователь состоит из пяти основных функциональных блоков (у серийных преобразователей они оформлены в виде отдельных шкафов):

1) блока ввода питания от сети с частотой 50 Гц, назначение которого — полное отсоединение преобразователя от питающей сети;

2) блока выпрямителей (звено постоянного тока), представляющего собой тиристорный (управляемый) выпрямитель, собранный по схеме трехфазного симметричного моста, который предназначен для преобразования трехфазного тока промышленной частоты в постоянный ток;

3) блока реакторов (дросселей), осуществляющего сглаживание выпрямленного тока;

4) блока инвертора (основной элемент преобразователя), назначением которого является преобразование постоянного тока в переменный, но уже однофазный и средней (повышенной) частоты. Схема инвертора напоминает схему управляемого выпрямителя, собранного по мостовой однофазной схеме, с тем отличием, что на место источника переменного тока включена нагрузка (колебательный контур), а на место нагрузки постоянного тока включен источник постоянного тока (здесь — выпрямитель).

Таким образом, принцип действия инвертора основан на поочередном отпираании вентилей моста, в результате чего в нагрузке будет проходить переменный ток, частота которого равна частоте

коммутации управляемых клапанов. При открывании пары клапанов B_1-B_2 ток через нагрузку протекает в направлении 1, а при открывании пары клапанов B_3-B_4 — в направлении 2;

б) блока пуска БП, служащего для осуществления запуска преобразователя.

Преобразователи содержат также аппаратуру управления, защиты и сигнализации.

При изменении в процессе работы эквивалентного сопротивления индуктора автоматически изменяется выходная частота инвертора. Таким образом, переключения конденсаторов колебательного контура не требуется, что упрощает конструкцию конденсаторной батареи.

Промышленностью выпускаются тиристорные преобразователи мощностью до 3200 кВт на частоты от 0,5 до 10,0 кГц.

Ламповые генераторы

Машинные и тиристорные преобразователи позволяют получать частоту, не превышающую 10 кГц. Ламповые генераторы применяют для технологических процессов, где требуются частоты

от нескольких десятков килогерц до нескольких мегагерц (для поверхностной закалки, пайки, сварки, зонной очистки и т. п.). Для нагрева диэлектриков, сварки термопластических материалов и некоторых других процессов используют ламповые генераторы с частотой несколько десятков мегагерц.

Ламповый генератор состоит из трех основных частей: источника электрической энергии, мощной электронной лампы (триода) и системы колебательных контуров. Различают два вида генераторов: с независимым воз-

буждением (рис. 113) и с самовозбуждением (последний называют автогенератором).

Принцип действия лампового генератора рассмотрим на примере простого генератора. Если к участку сетки — катод подвести переменное напряжение от какого-либо источника E_a , то изменение потенциала сетки вызовет изменение силы анодного тока I_a . При положительном потенциале на сетке сила анодного тока увеличится, при отрицательном — уменьшится. Следовательно, при переменном напряжении на сетке анодный ток будет пульсировать с частотой, равной частоте сеточного (управляющего) напряжения. Если эту частоту сделать равной частоте собственных колебаний контура, то будет иметь место резонанс, при котором в контуре $L-C$ будут создаваться незатухающие колебания с заданной частотой.

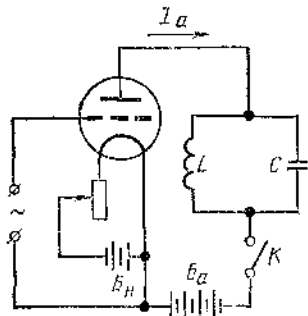


Рис. 113. Принципиальная схема лампового генератора с независимым возбуждением

Отличие автогенератора от генератора с независимым возбуждением состоит в том, что в автогенераторе напряжение возбуждения подается на лампу не от постороннего источника э. д. с., а от собственной системы колебательных контуров через обратную связь. Частота автогенератора определяется параметрами его колебательной системы.

В установках индукционного нагрева обычно применяют ламповые генераторы с самовозбуждением. Они характеризуются более высоким к. п. д. и более удобны в эксплуатации. Промышленностью выпускаются генераторы на мощности от 0,3 до 1000 кВт и на частоты от 66 кГц до 300 МГц.

§ 3. ЭЛЕМЕНТЫ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Печные силовые трансформаторы

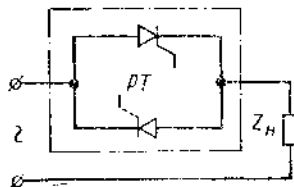
Для индукционных установок промышленной частоты в качестве электропечных трансформаторов используют, как правило, специально предназначенные для этой цели однофазные и трехфазные силовые трансформаторы. Они имеют ступенчатое регулирование напряжения за счет изменения коэффициента трансформации переключением катушек обмотки высокого напряжения. Это переключение производится с помощью специального электропривода дистанционно: либо при отключенном трансформаторе (на мощности до 1000 кВт·А), либо под нагрузкой (на более мощных трансформаторах).

Номинальная мощность трансформаторов может быть использована или только на первой ступени напряжения, или на нескольких ступенях; на остальных ступенях мощность снижается пропорционально уменьшению напряжения. Минимальная мощность, которую можно получить снижением напряжения трансформатора, составляет 15—20% номинального значения.

Все печные трансформаторы маслонаполненные, естественного охлаждения.

Тиристорные регуляторы

В настоящее время получает развитие новый метод регулирования мощности — с применением тиристорных регуляторов. При этом регулятор $РТ$ включается в сеть последовательно с нагрузкой (рис. 114). В отличие от ступенчатого регулирования напряжения при питании от печного трансформатора, тиристорный регулятор позволяет производить регулирование мощности плавно. На практике используются два способа регулирования: фазовый, при котором меняют угол отпирания тиристоры; и широтно-импульсный, при котором регулятор периодически пропускает через себя на нагрузку заданное число синусоид. В этом случае мощность, выделяющаяся в нагрузке, пропорциональна отношению времени включенного состояния тиристоры к общему времени периода регулирования.



Р и с. 114. Принципиальная схема включения нагрузки через тиристорный регулятор

Тиристорный регулятор обеспечивает глубину регулирования напряжения 1 : 10, стабилизацию мощности в нагрузке $\pm 1\%$ при изменении напряжения сети $\pm 10\%$ и имеет плавный старт, позволяющий снизить до допустимых значений пики пускового тока, обычно значительно превышающие номинальные величины.

Таким образом, тиристорные регуляторы позволяют производить: включение и отключение нагрузки от сети; ограничение пиков тока при включении нагрузки; регулирование и стабилизацию электрического режима индукционной установки.

Конденсаторы средней и промышленной частоты

В установках индукционного нагрева используются печные конденсаторы внутренней установки с обкладками из алюминиевой фольги с бумажным диэлектриком, пропитанным синтетической жидкостью (саволом).

Конденсаторы промышленной частоты серии КС и КСЭ эксплуатируются при естественном воздушном охлаждении. Они имеют встроенный разрядный резистор и встроенные плавкие предохранители. Они допускают длительную работу при перегрузках по току на 30%, а по напряжению — на 10% от номинальных значений этих параметров. Тангенс угла потерь — около 0,003, емкость одной конденсаторной банки достигает 200 мкФ.

Конденсаторы КСЭ разрешается устанавливать как в вертикальном, так и в горизонтальном положении на узкую сторону, выводами вбок. Корпус конденсаторной банки электрически изолирован от конденсаторов и при монтаже должен быть заземлен.

В индукционных установках средней частоты используются конденсаторы серий ЭСВ и ЭСВП. Пакеты конденсаторов в пределах одной банки разделены на две, четыре или пять секций. Различают конденсаторные банки двух видов: 1) секции банок имеют одинаковую емкость и реактивную мощность, и поэтому могут соединяться между собой как последовательно, так и параллельно; 2) секции банок имеют различные емкости и мощности, поэтому они могут соединяться между собой лишь параллельно. Конденсаторы второго вида служат для более точного подбора емкости, необходимой для компенсации реактивной мощности при изменении параметров загрузки; они называются подстроечными и в обозначении содержат букву «П».

В отличие от серий КС и КСЭ (50 Гц) в конденсаторах средней частоты корпус банки является токонесущим, так как он внутри банки соединен с общим выводом всех секций. Эти конденсаторы имеют водяное охлаждение и меньшие габариты, чем конденсаторы промышленной частоты.

Токопроводы индукционных установок

При расчете и проектировании индукционных установок важную роль играет правильный выбор токопроводов, соединяющих между собой отдельные элементы схемы. Правильный выбор токопровода означает: минимальные потери мощности при минимальном расходе материала, минимальное падение напряжения в токопроводе; отсутствие перегрева токопровода сверх допустимой температуры, а также исключение нагрева крепежа и окружающих металлоконструкций. Особенно важен грамотный выбор токопровода колебательного контура, соединяющего индуктор с конденсаторной батареей, поскольку контурный ток в десятки раз превышает ток генераторный.

Основная особенность токопроводов средней и высокой частоты состоит в их повышенном активном и реактивном сопротивлении по сравнению с токопроводами постоянного тока или промышленной частоты. Как было показано в гл. 3, повышение активного сопротивления обусловлено проявлением поверхностного эффекта и эффекта близости, которые затрудняют использование полностью всего сечения проводника. Индуктивное сопротивление с повышением частоты тока также растет пропорционально.

На практике в качестве токопроводов используются: прямоугольные медные или алюминиевые шины, круглые, сплошные или трубчатые шины, коаксиальные (труба в трубе) токопроводы, обычные силовые кабели, используемые на частоте 50 Гц, а также гибкие водоохлаждаемые кабели.

Токопровод из прямоугольных шин (рис. 115, а) является одним из наиболее распространенных промышленных токопроводов. Он отличается малой индуктивностью, относительно малым расходом материала и простотой конструкции. Закрепляются шины 1 в гребенках (кликах) 2, выполненных из изоляционного материала (обычно — из стеклотекстолита) с помощью латунных шпилек 3 с гайками.

При конструировании шинного токопровода необходимо руководствоваться следующими правилами:

1) толщину шин $b_{ш}$ выбирают с точки зрения минимума электрических потерь в них (в соответствии с § 3 гл. 4 толщина шины $b_{ш} > 1,57\Delta$) и обеспечения достаточной механической прочности; 2) шины в пакете располагают вертикально, с расшивкой, с тем, чтобы по соседним шинам ток протекал в противоположных направлениях; при этом обеспечиваются наилучшие условия охлаждения и уменьшаются активное и индуктивное сопротивление шинпровода;

3) расстояния между неизолированными соседними шинами на средних частотах до 10 кГц рекомендуются следующие: до 500 В — 10—15 мм, до 3000 В — 25—30 мм.

Круглые трубчатые водоохлаждаемые шины рекомендуются использовать для передачи больших токов на небольшие расстояния

ния (ошиповка конденсаторных батарей, подвод тока непосредственно к индуктору и т. п.).

Коаксиальный токопровод (см. рис. 115, б) имеет минимальные значения индуктивного и активного сопротивлений по сравнению с другими типами токопроводов. Однако конструктивно он сложнее и требует большего расхода активных материалов. Поэтому коаксиальный токопровод применяют в тех случаях, когда шинный токопровод не может быть применен по конструктивным соображениям, а также в тех случаях, когда необходимо полностью

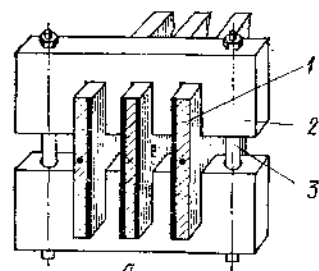
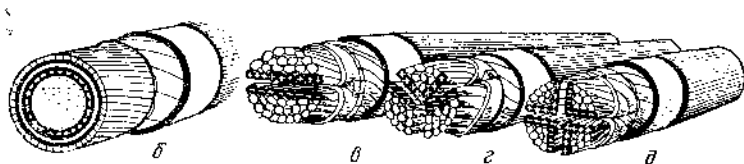


Рис. 115. Токопроводы, используемые в индукционных установках



исключить внешнее поле рассеяния токопровода (например, при вводе питания средней частоты в камеру вакуумной печи). Последняя его особенность — исключение внешнего магнитного поля весьма ценна также при питании установок на высокой частоте с точки зрения уменьшения радиопомех. Поэтому коаксиальные токопроводы широко используются для передачи энергии от ламповых генераторов к установкам индукционного и диэлектрического нагрева.

При использовании на средних частотах обычных силовых кабелей промышленной частоты (рис. 115, а—д) нужно помнить:

1) одножильный кабель применять не рекомендуется, а при наличии металлической оболочки или защитной брони — не допускается;

2) при использовании двухжильного кабеля (рис. 115, в) две жилы одного кабеля должны быть использованы для прямого и обратного токов;

3) в трехжильном кабеле (рис. 115, г) также необходимо, чтобы в одном кабеле были заключены токи обоих направлений. Поскольку в этом случае ток одного направления течет по двум жилам, а обратного направления — лишь по одной, рекомендуется применять два трехжильных кабеля в параллель, соединив их

жилы таким образом, чтобы ток каждого направления распределялся на три жилы;

4) в четырехжильном кабеле на средних частотах сечение жил используется лучше, когда токами противоположных направлений загружены диагонально противоположные жилы (рис. 115, д).

Гибкий водоохлаждаемый кабель часто используется для соединения индуктора плавильной печи с контурным шинопроводом. Такое соединение позволяет наклонять печь для разливки металла, не отсоединяя печи. Конструктивно гибкий кабель представляет собой гибкую медную неизолированную жилу, помещенную в резиноканевый рукав, и снабженную наконечниками для осуществления электрического соединения, и ниппелями для подвода и отвода охлаждающей воды.

§ 4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ

При монтаже, наладке и эксплуатации индукционных нагревательных и плавильных установок необходимо строго соблюдать правила техники безопасности (общие для всех электроустановок). Отметим здесь лишь некоторые особенности эксплуатации плавильных установок.

Работа на индукционных плавильных установках связана с высоким напряжением как на токоведущих частях установки (до 2 кВ), так и на расплавленном металле. Кроме того, при наличии жидкого металла с высокой температурой возможно получение ожогов от вышлесков металла и от излучения с открытой поверхности зеркала ванны.

Обязательное условие работы на индукционной электропечи — строгое соблюдение правил техники безопасности. Это может выполняться лишь при условии, что обслуживающий персонал хорошо знаком с устройством плавильной индукционной установки и ее работой. К работе на индукционной установке должны допускаться лица, хорошо знающие ее устройство, особенности техники безопасности и сдавшие экзамен по указанным вопросам.

Для безопасности обслуживающего персонала от поражения током кожух печи, пульты, шкафы управления и другие элементы плавильной установки должны быть заземлены.

При ведении плавки следует также соблюдать правила:

1. Загрузку шихты проводить при выключенной печи.

2. Осадку шихты по мере ее расплавления вести при выключенной печи или же с помощью штанги, имеющей ручку из электроизоляционного материала, и в рукавицах из плотной ткани.

3. Отбор проб металла из тигля, снятие шлака, рафинирование, слив металла и механическое перемешивание в тигле осуществлять при отключенной печи.

4. Загруженная шихта должна быть свободной от влаги, масел и других легко испаряемых веществ.

5. Обслуживающий персонал при работе на индукционной печи должен быть одет в специальную одежду, а также иметь защитные очки со светофильтром.

Соблюдение перечисленных правил техники безопасности, а также специфических правил, характерных для каждого участка цеха, позволяет успешно эксплуатировать индукционные установки в промышленности.

Контрольные вопросы

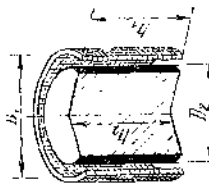
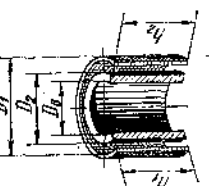
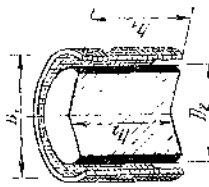
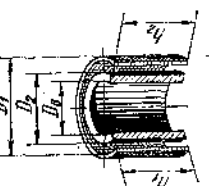
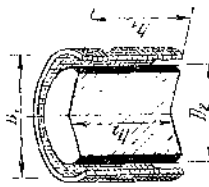
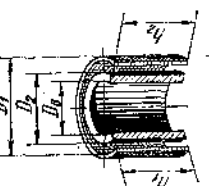
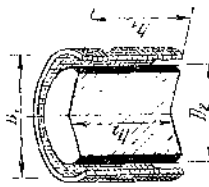
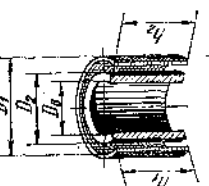
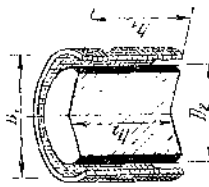
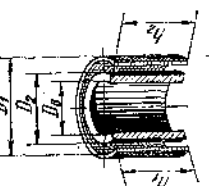
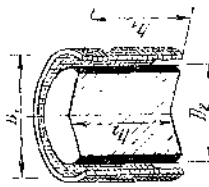
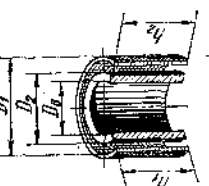
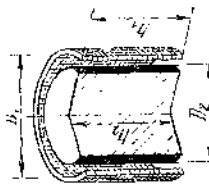
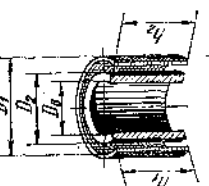
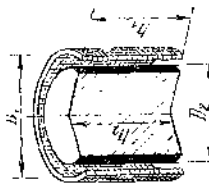
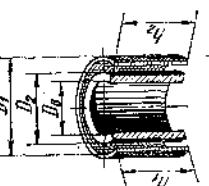
1. Какие типы преобразователей частоты используются при индукционном нагреве? Поясните принцип действия каждого из них.
2. Какие требования предъявляются к компоновке электрооборудования индукционных установок?
3. Дайте сравнительную оценку различных типов токопроводов на средней частоте с точки зрения: а) эффективности использования материала токопровода; б) активного и реактивного сопротивлений; в) простоты конструкции.
4. Какими правилами техники безопасности следует руководствоваться при эксплуатации плавильных установок?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Бабит Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.—Л., «Энергия», 1965. 552 с. с ил.
- Брицын Н. Л. Нагрев в электрическом поле высокой частоты. М.—Л., «Машиностроение», 1965. 63 с. с ил.
- Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. М.—Л., «Энергия», 1967. 416 с. с ил.
- Высокочастотная электротермия. Справочник под ред. А. В. Донского. М.—Л., «Машиностроение», 1965. 654 с. с ил.
- Глуханов Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева. М.—Л., «Машиностроение», 1965. 79 с. с ил.
- Затуловский Л. М., Хазанов Э. Б., Полищук Я. А. Электротермические установки для выращивания монокристаллов полупроводниковых материалов. М., «Энергия», 1973. 127 с. с ил.
- Лейканд М. С. Вакуумные электрические печи. М., «Энергия», 1968. 326 с. с ил.
- Личневский Б. В. Вакуумная индукционная плавка. М., «Металлургия», 1975. 240 с. с ил.
- Полов В. С. Теоретическая электротехника. М., «Энергия», 1970. 608 с. с ил.
- Простяков А. А. Индукционные нагревательные установки. М., «Энергия», 1970. 120 с. с ил.
- Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л., «Энергия», 1974. 264 с. с ил.
- Тир Л. Л., Фомин Н. И. Современные методы индукционной плавки. М., «Энергия», 1975. 112 с. с ил.
- Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1968. 496 с. с ил.
- Чертов А. Г. Единицы физических величин. М., «Высшая школа», 1977. 287 с. с ил.
- Шамов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л., «Машиностроение», 1974. 280 с. с ил.
- Электротермическое оборудование. Справочник под ред. А. П. Альтгаузена. М., «Энергия», 1969. 487 с.
- Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции (формулы, графики, таблицы) М., «Наука», 1968. 344 с. с ил.

ТАБЛИЦА П-1
СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ИНДУКТОР-ЗАГРУЗКА ПРИ НАГРЕВЕ ТЕЛ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

ПРИЛОЖЕНИЯ

Сопротивление				Примечание
Активное сопротивление нагрузки R_2 при: $\mu' > 1$	$8,6 \cdot 10^{-3} \frac{D_2}{h_2} \sqrt{\rho_2 \mu' \text{ пов} / f}$			$F_{0, \text{ц}} - \text{см. рис. П-2};$ $F_{\text{ц, ц}} - \text{см. рис. П-1, б};$ $F_{\text{цл}} - \text{см. рис. П-3, а}$
Активное сопротивление нагрузки R_2 при: $\mu' = 1$	$2\pi \cdot 10^{-3} \frac{D_2}{h_2} \sqrt{\rho_2 f} F_{0, \text{ц}}$			—
Внутреннее реактивное сопротивление нагрузки $X_{2\text{в}}$ при: $\mu' > 1$	$2\pi \cdot 10^{-3} \frac{D_2}{h_2} \sqrt{\rho_2 \mu' \text{ пов} / f}$			$G_{0, \text{ц}} - \text{см. рис. П-2};$ $G_{\text{ц, ц}} - \text{см. рис. П-1, б};$ $G_{\text{цл}} - \text{см. рис. П-3, б}$
Внутреннее реактивное сопротивление нагрузки $X_{2\text{в}}$ при: $\mu' = 1$	$2\pi \cdot 10^{-3} \frac{D_2}{h_2} \sqrt{\rho_2 f} G_{0, \text{ц}}$			$F_0 - \text{см. рис. 24}$
Активное сопротивление индуктора R_1	$2\pi \cdot 10^{-3} \frac{D_1}{h_1} \sqrt{\rho_1 f} F_0$			—
Внутреннее реактивное сопротивление индуктора $X_{1\text{в}}$	$2\pi \cdot 10^{-3} \frac{D_1}{h_1} \sqrt{\rho_1 f} G_0$			$G_0 - \text{см. рис. 24}$
Реактивное сопротивление воздушного зазора X_3	$2\pi \cdot 10^{-6} f \frac{D_1^2 - D_2^2}{h_2} \frac{k_1}{h_1 - k_1 k_2}$			—
Реактивное сопротивление обмоточного омического X_0	$2\pi \cdot 10^{-6} f D_1^2 \frac{k_1}{h_1 - k_1 k_2}$			$k_1 - \text{см. рис. 41}$

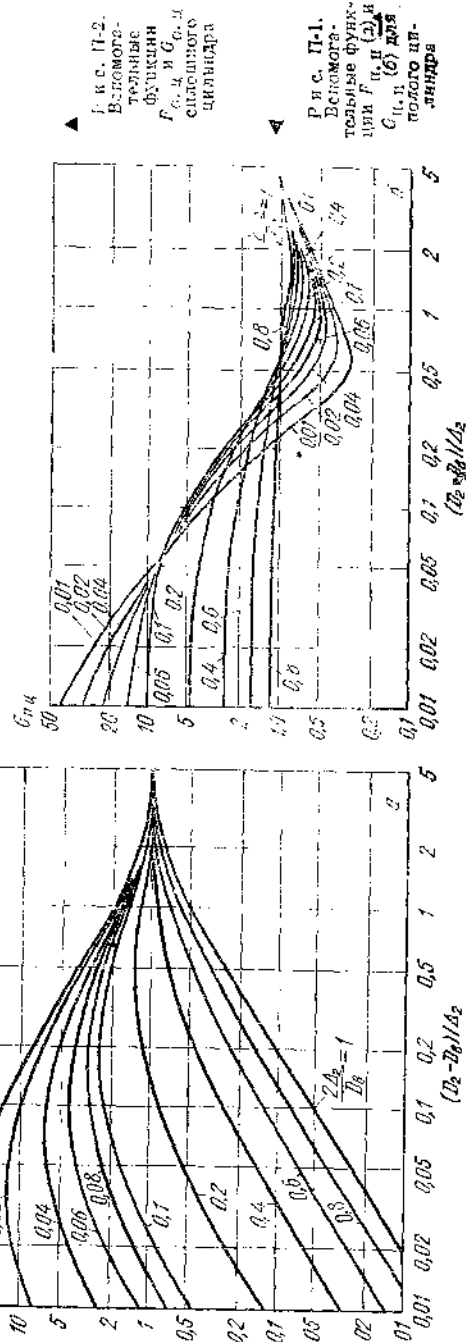
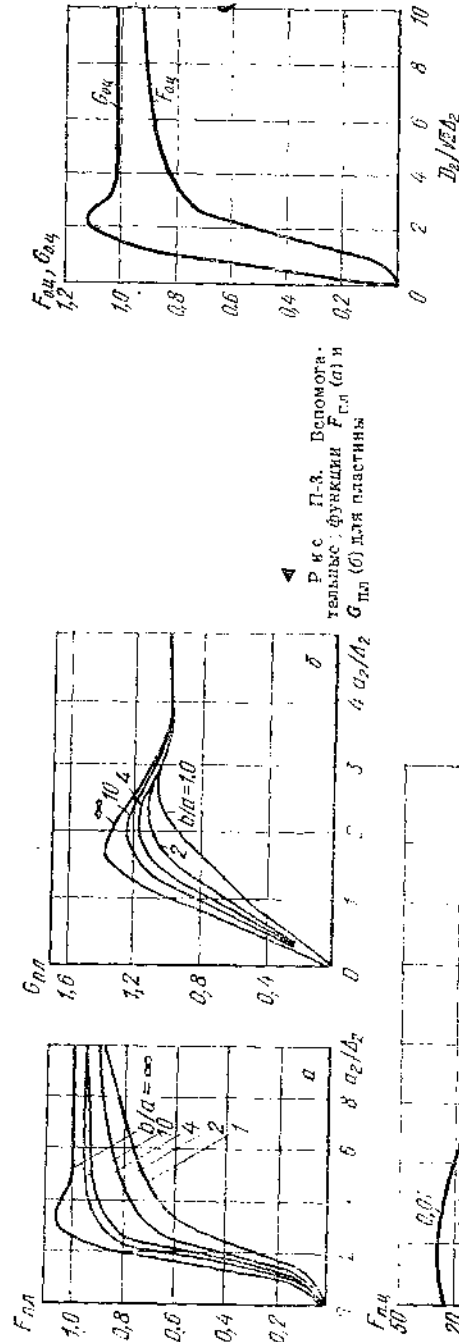


ТАБЛИЦА П-2
ЗНАЧЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ S (α , β , F_0) ДЛЯ ЦИЛИНДРА

Fo	α	β												
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0		
1	2	3	4	5	5	7	8	9	10	11	12	13		
0,20	1,0	0,1250	0,0775	0,0350	-0,0025	-0,0350	-0,0625	-0,0850	-0,1025	-0,1150	-0,1225	-0,1250		
	0,9	0,1013	0,0708	0,0363	-0,0012	-0,0337	-0,0612	-0,0837	-0,1012	-0,1137	-0,1212	-0,1237		
	0,8	0,0800	0,0708	0,0417	+0,0042	-0,0283	-0,0558	-0,0783	-0,0958	-0,1083	-0,1158	-0,1183		
	0,7	0,0613	0,0553	0,0404	+0,0125	-0,0200	-0,0475	-0,0700	-0,0875	-0,1000	-0,1075	-0,1100		
	0,6	0,0450	0,0421	0,0329	-0,0164	-0,0087	-0,0362	-0,0587	-0,0762	-0,0887	-0,0962	-0,0987		
0,15	1,0	0,1175	0,0705	0,0297	-0,0050	-0,0339	-0,0574	-0,0758	-0,0895	-0,0990	-0,1045	-0,1062		
	0,9	0,0939	0,0720	0,0312	-0,0037	-0,0336	-0,0562	-0,0747	-0,0885	-0,0980	-0,1036	-0,1054		
	0,8	0,0732	0,0645	0,0369	+0,0019	-0,0273	-0,0512	-0,0699	-0,0840	-0,0937	-0,0995	-0,1013		
	0,7	0,0553	0,0508	0,0362	+0,0105	-0,0192	-0,0434	-0,0626	-0,0771	-0,0872	-0,0932	-0,0951		
	0,6	0,0400	0,0375	0,0294	+0,0147	-0,0080	-0,0329	-0,0526	-0,0677	-0,0782	-0,0845	-0,0864		
0,10	1,0	0,1093	0,0630	0,0241	-0,0077	-0,0328	-0,0519	-0,0658	-0,0754	-0,0816	-0,0850	-0,0861		
	0,9	0,0850	0,0646	0,0310	-0,0063	-0,0316	-0,0508	-0,0649	-0,0748	-0,0811	-0,0849	-0,0856		
	0,8	0,0658	0,0575	0,0318	-0,0006	-0,0263	-0,0462	-0,0609	-0,0712	-0,0779	-0,0817	-0,0829		
	0,7	0,0488	0,0448	0,0314	+0,0083	-0,0183	-0,0391	-0,0547	-0,0659	-0,0734	-0,0776	-0,0790		
	0,6	0,0347	0,0329	0,0230	+0,0131	-0,0073	-0,0295	-0,0461	-0,0584	-0,0667	-0,0715	-0,0731		
0,05	1,0	0,0906	0,0458	0,0120	-0,0122	-0,0283	-0,0382	-0,0439	-0,0470	-0,0485	-0,0495	-0,0497		
	0,9	0,0677	0,0480	0,0137	-0,0110	-0,0272	-0,0373	-0,0435	-0,0469	-0,0485	-0,0494	-0,0497		
	0,8	0,0491	0,0426	0,0209	-0,0049	-0,0227	-0,0342	-0,0412	-0,0453	-0,0474	-0,0485	-0,0488		
	0,7	0,0345	0,0317	0,0221	+0,0043	-0,0155	-0,0289	-0,0376	-0,0428	-0,0456	-0,0472	-0,0476		
	0,6	0,0233	0,0220	0,0179	+0,0094	-0,0054	-0,0214	-0,0322	-0,0391	-0,0433	-0,0454	-0,0460		
0,025	1,0	0,0712	0,0289	0,0018	-0,0133	-0,0205	-0,0234	-0,0247	-0,0249	-0,0250	-0,0250	-0,0250		
	0,9	0,0490	0,0317	0,0037	-0,0120	-0,0201	-0,0233	-0,0247	-0,0249	-0,0250	-0,0250	-0,0250		
	0,8	0,0326	0,0278	0,0115	-0,0068	-0,0169	-0,0217	-0,0236	-0,0244	-0,0245	-0,0247	-0,0248		
	0,7	0,0211	0,0196	0,0138	-0,0016	-0,0117	-0,0191	-0,0224	-0,0238	-0,0244	-0,0246	-0,0247		
	0,6	0,0132	0,0129	0,0110	+0,0063	+0,0036	-0,0141	-0,0119	-0,0227	-0,0240	-0,0245	-0,0247		

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

А. ПРИМЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КАНАЛЬНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Исходные данные:

а) расплавляемый металл—латунь марки Л-62; температура разливки $T_p = 1070^\circ \text{C}$; энтальпия металла при температуре разливки $c_p = 169 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$; удельное электросопротивление при температуре разливки $\rho_2 = 40 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
б) рабочая (сливаемая) масса металла $G = 1250 \text{ кг}$; длительность плавки $\tau_{пл} = 0,32 \text{ ч}$;
в) питающее напряжение $U = 500 \text{ В}$, сеть трехфазная; частота тока $f = 50 \text{ Гц}$.
1. *Определение активной мощности печи.* Из табл. П-3 задаемся общим к. п. д. печи $\eta = 0,88$.

По формуле (10-2)

$$P_a = \frac{1250 \cdot 169}{0,88 \cdot 0,32} = 750 \text{ кВт.}$$

Для равномерной загрузки трехфазной сети принимаем число индукционных единиц равным трем. Мощность каждой единицы $P_{1a} = 250 \text{ кВт}$.

2. *Расчет сечения сердечника.* Магнитопроводы выполняем стержневыми, тогда можно задаться значением коэффициента $c_m = 0,275$.

Из табл. П-3 принимаем естественный $\cos \varphi = 0,75$. Тогда по формуле (10-12) полная мощность индукционной единицы

$$P_1 = \frac{250}{0,75} = 333 \text{ кВт} \cdot \text{А.}$$

Принимаем, что индуктор будет изготавливаться из равностенной водоохлаждаемой медной трубки. Поэтому задаемся величиной отношения массы стали магнитопровода к массе меди индуктора $\Psi = 27$.

Принимаем величину магнитной индукции в магнитопроводе из стали 1511 (ГОСТ 21427.3—75) $B = 1 \text{ Тл}$ и величину плотности тока в индукторе $\delta_1 = 8,5 \text{ МА/м}^2$. По формуле (10-11) определяем сечение сердечника магнитопровода

$$S_c = 0,275 \sqrt{\frac{10^3 \cdot 333 \cdot 27}{50 \cdot 1,85 \cdot 10^6}} = 0,04 \text{ м}^2.$$

Принимаем толщину листа магнитопровода равной $0,35 \text{ мм}$; межлистовую изоляцию выполняем нанесением слоя лака толщиной $0,01 \text{ мм}$. Находим коэффициент заполнения магнитопровода $k_c = 0,9$. По формуле (10-13) определяем сечение сердечника с учетом межлистовой изоляции

$$S'_c = \frac{0,04}{0,9} = 0,0445 \text{ м}^2.$$

Принимаем число ступеней сердечника равным трем, тогда коэффициент заполнения сердечником окружности $k_d = 0,81$.

По формуле (10-14) находим диаметр окружности, описанной вокруг ступенчатого стержня

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 445 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,81}} = 0,266 \text{ м.}$$

Вычерчиваем эскиз сечения сердечника (рис. П-4).

3. *Расчет индуктора.* Из выражения (10-15) определяем число витков индуктора

$$w_1 = \frac{500}{4,44 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 0,04} = 56,3.$$

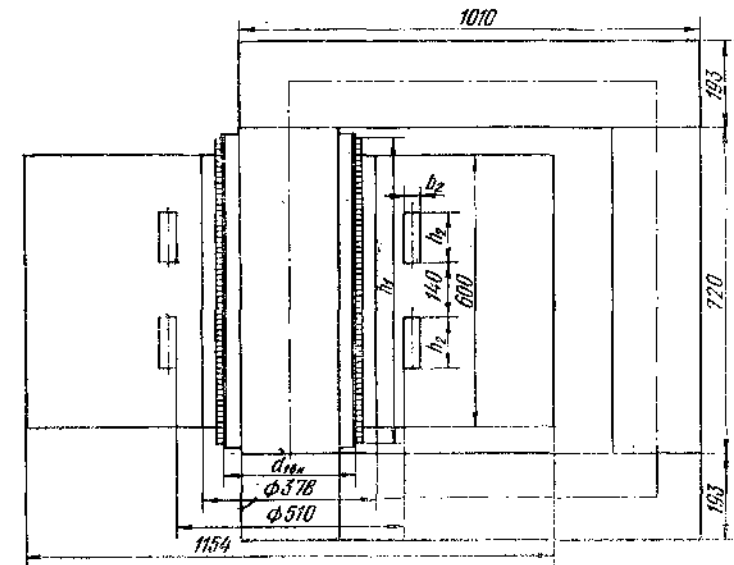
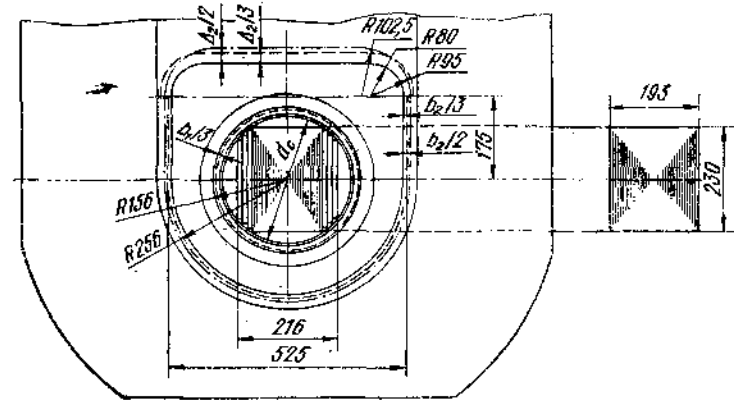


Рис. П-4. Эскиз индукционной единицы канальной печи

Принимаем $w_1 = 56$. Силу тока в индукторе находим по формуле (10-16)

$$I_1 = \frac{333 \cdot 10^3}{500} = 666 \text{ А.}$$

Глубина проникновения тока в материал индуктора (медь)

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-8}}{50}} = 0,01 \text{ м.}$$

Сечение трубки индуктора определяем по формуле (10-17).

$$S_1 = 666 / 8,5 \cdot 10^6 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Из действующего сортамента выбираем равностенную медную трубку так, чтобы ее радиальный размер был $1,5 \Delta_1 = 0,015 \text{ м}$. Берем прямоугольную трубку сеч-

нием $(15 \times 10) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ с толщиной стенки 0,002 м. Радиальный размер сечения витка индуктора $h_1 = 0,015 \text{ м}$, осевой размер $h_2 = 0,01 \text{ м}$ (см. рис. 58).

Сечение выбранной трубки индуктора равно $8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Таким образом, плотность тока в индукторе составит $666/8,4 \cdot 10^{-5} = 8 \text{ МА/м}^2$. Толщину изоляции между витками принимаем $2b_{из} = 0,002 \text{ м}$. Тогда по уравнению (10-18) высота индуктора составит

$$h_1 = (1,0 + 0,2) \cdot 10^{-2} \cdot 56 = 0,672 \text{ м}.$$

Толщину изолирующего бакелитового цилиндра принимаем $a = 0,01 \text{ м}$ (см. рис. П-4). По формуле (10-19) находим внутренний диаметр индуктора (по меди).

$$D_1 = 0,266 + 2 \cdot 0,01 + 0,002 = 0,288 \text{ м}.$$

Средний диаметр индуктора определяем по уравнению (10-20)

$$D_{1\text{ ср}} = 0,288 + 0,015 = 0,303 \text{ м}.$$

Активное сопротивление индуктора рассчитаем по формуле (10-21)

$$r_1 = \frac{1,15 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 56 \pi \cdot 0,303}{8,4 \cdot 10^{-5}} = 1,46 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}.$$

Электрические потери в индукторе определим по уравнению (10-22)

$$P_{э.п} = 666^2 \cdot 1,46 \cdot 10^{-2} = 6,5 \text{ кВт}.$$

Массу меди индуктора находим по формуле (10-23)

$$G_m = 8,4 \cdot 10^{-5} \cdot 56 \cdot \pi \cdot 0,303 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 39,8 \text{ кг}.$$

Массу стали магнитопровода определим по уравнению (10-24)

$$G_c = 27 \cdot 39,8 = 1075 \text{ кг}.$$

По рис. 44 находим удельные потери в стали при индукции 1Т

$$p_c = 1,2 \text{ Вт/кг}.$$

Электрические потери в стали магнитопровода рассчитаем по формуле (10-25)

$$P_c = 1,2 \cdot 1075 = 1300 \text{ Вт}.$$

Полные электрические потери в меди и стали индукционной единицы определяем по уравнению (10-26)

$$P_{э.п} = 6500 + 1300 = 7800 \text{ Вт}.$$

4. Расчет канала. Силу тока в канале определяем по формуле (10-27)

$$I_2 = 666 \cdot 56 = 37200 \text{ А}.$$

Глубина проникновения тока в канале

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-8}}{50}} = 0,045 \text{ м}.$$

Из табл. П-3 задаемся плотностью тока в канале $\delta_2 = 10^7 \text{ А/м}^2$. Сечение канала находим по формуле (10-28)

$$S_2 = \frac{37200}{1 \cdot 10^7} = 0,00372 \text{ м}^2.$$

В аналогичных печах часто применяются каналы сечением $(2,2 \times 9,0) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Принимаем на каждый индуктор два параллельных канала такого размера. Тогда общее сечение двух каналов составит

$$S_2 = (2,2 \cdot 9,0) \cdot 10^{-4} \cdot 2 = 0,00396 \text{ м}^2$$

Уточняем получающуюся плотность тока в каналах

$$\delta_2 = 37200/0,00396 = 9,4 \text{ МА/м}^2.$$

ТАБЛИЦА П-3
ПАРАМЕТРЫ РАСПЛАВЛЯЕМЫХ МЕТАЛЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Расплавляемый металл	Температура плавления металла, °С	Температура разливки металла, °С	Плотность расплава, г/см³	Удельное электропотребление при плавлении, кВт·см	Плотность тока в канале, А/мм²	Удельная мощность в канале, кВт/мм²	Естественный коэффициент печи	Общий коэффициент к п. д. печи	Удельный расход энергии, кВт·ч/т	Угар металла, %
Медь										
Топчак (90% Cu + 10% Zn)	1083	1150—1250	8,5	21	15	40—60	0,4—0,5	0,60—0,72	270—330	0,5—0,7
Латунь (67,5% Cu + 32,5% Zn)	920	1035—1140	8,0	40	10	40—60	0,4—0,5	0,75—0,85	230—270	0,5—0,7
Бронза (93% Cu + 3% Zn + 4% Sn)	1060	1280—1295	8,0	35		40—60	0,60—0,75	0,75—0,90	190—240	0,5—0,7
Алюминий *	658	700—750	2,4	24	4	8	0,30	0,6—0,85	280—330	0,5—0,8
Цинк	419	500	6,5	35	10	60—80	0,40—0,50	0,80—0,90	350—500	2—3
Чугун **	1100—1200	1350—1550	6,7	127	3,5	70—90	0,50—0,65	0,80—0,86	30—35	1,5—2,0
					8,0				490—500	

* Числитель — печи с вертикальными каналами; знаменатель — с горизонтальными.

** Числитель — в режиме миксера, знаменатель — в плавильном режиме.

Активную мощность, выделяемую в каналах, определяем по формуле (10-29)

$$P_2 = 250\,000 - 7800 = 242\,200 \text{ Вт.}$$

Из выражения (10-30) находим активное сопротивление каналов

$$r_2 = \frac{242\,200}{37\,200^2} = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Осовой размер канала $h_2 = 0,09$ м более чем втрое превышает радиальный размер канала $b_2 = 0,022$ м.

Находим параметр

$$b_2/\Delta_2 = 2,2/4,5 = 0,49.$$

По графику (см. рис. 59, б) определяем, что коэффициент $K_{г.э.}$, учитывающий неравномерное распределение переменного тока по сечению канала, в данном случае равен единице.

Из формулы (10-34) находим активную длину каналов

$$l_2 = \frac{0,00396 \cdot 1,75 \cdot 10^{-4}}{40 \cdot 10^{-8} \cdot 1} = 1,73 \text{ м.}$$

Теперь мы располагаем всеми необходимыми данными, чтобы, исходя из рекомендаций гл. 10, вычертить эскиз индукционной единицы (см. рис. П-4).

Рассмотрим основные геометрические параметры индукционной единицы.

Средняя линия пути тока в канале показана штрих-пунктиром. Эта линия проходит по геометрической оси в канале и на расстоянии $\Delta_2/2 = 0,0225$ м над футеровкой канала в ванне печи. Длина средней линии пути тока

$$l'_2 = \frac{\pi \cdot 0,532}{2} + 2 \cdot 0,1615 + \frac{\pi \cdot 0,205}{2} + 2 \cdot 0,175 + 0,835 + 0,35 + 0,322 + 0,323 = 1,83 \text{ м.}$$

Некоторое превышение величины l'_2 над расчетным значением $l_2 = 1,73$ м необходимо, так как на участке пути тока, проходящем в ванне, выделяется меньшая мощность ввиду увеличенного сечения и поэтому меньшего электрического сопротивления этого участка.

Минимальная толщина футеровки между каналом и индуктором вместе с воздушным зазором составила 0,096 м, что следует считать присмыслым при плавке латуни. Уточняем фактически получившееся активное сопротивление канала.

Длина канала с шириной $b_2 = 0,022$ м составила (по рис. П-4) $0,835 + 0,35 = 1,185$ м. На верхнем участке длиной $0,322 + 0,323 = 0,645$ м можно принять, что ток с постоянной плотностью протекает по каналу шириной $b_2 = \Delta_2 = 0,045$ м.

Используя формулу (10-31), подсчитаем общее активное сопротивление пути тока в канале

$$r_2 = 40 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \left[\frac{1,185}{(2,2 \cdot 9,0) \cdot 10^{-4} \cdot 2} + \frac{0,645}{(4,5 \cdot 9,0) \cdot 10^{-4} \cdot 2} \right] = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Рассчитаем фактически получившиеся значения коэффициентов c_m и Ψ :

$$c_m = 0,51 \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,303}{(2,72 + 2 \cdot 101) \cdot 10^{-2}}} = 0,268;$$

$$\Psi = \frac{0,04 \cdot 346 \cdot 7,7 \cdot 10^8}{8,4 \cdot 10^{-8} \cdot 56 \cdot 0,95 \cdot 8,9 \cdot 10^8} = 26,4.$$

Таким образом, коэффициенты c_m и Ψ достаточно хорошо совпали со значениями, которыми мы задались в начале расчета.

5. Расчет индуктивного сопротивления индукционной единицы. По формуле (10-37) определяем коэффициент Роговского

$$K_R = 1 - \frac{0,015 + 0,022 + 0,096}{\pi \cdot 0,672} = 0,94.$$

По рис. П-4 подсчитаем «площадь рассеяния» S_s , контуры которой обозначены на эскизе штриховыми линиями

$$S_s = \frac{\pi \cdot 0,525^2}{4 \cdot 2} + 0,175 \cdot 0,525 + \frac{\pi \cdot 0,19^2}{4 \cdot 2} + 0,095 \cdot 0,35 - \frac{\pi \cdot 0,312^2}{4} = 0,17 \text{ м}^2.$$

Определяем коэффициент K_s по формуле (10-40)

$$\alpha_2 = \frac{0,672 - 2 \cdot 0,09}{0,672} = 0,73; \quad b_s = \frac{0,015 + 0,022}{3} + 0,096 = 0,108 \text{ м;}$$

$$K_s = 1 + \frac{0,73}{4,5} \left(1 + \frac{\pi \cdot 0,672}{0,108} \cdot \frac{0,73}{4,0} \right) = 1,75.$$

По формуле (10-36) рассчитываем индуктивное сопротивление индукционной единицы, приведенное к индуктору

$$x = \frac{8 \cdot 50 \cdot 56^2 \cdot 0,17 \cdot 0,94 \cdot 1,75 \cdot 10^{-6}}{0,672} = 0,525 \text{ Ом.}$$

6. Определение $\cos \varphi$ и κ . п. д. печи. Активное сопротивление канала (фактическое), приведенное к индуктору, определяем по формуле (10-43)

$$r'_2 = 1,52 \cdot 10^{-4} \cdot 56^2 = 0,475 \text{ Ом.}$$

По уравнению (10-42) находим активное сопротивление индукционной единицы

$$r = 1,46 \cdot 10^{-2} + 0,475 = 0,49 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление индукционной единицы определяем по формуле (10-44)

$$z = \sqrt{0,490^2 + 0,525^2} = 0,718 \text{ Ом.}$$

Естественный коэффициент мощности печи рассчитаем по уравнению (10-41)

$$\cos \varphi = 0,490/0,718 = 0,683.$$

Получившееся значение естественного $\cos \varphi$ отличается от принятой в начале расчета величины 0,75 в допустимых пределах (не более 10%).

Поскольку геометрия индукционной единицы и обусловленные ею активное и реактивное сопротивления нами определены, можно уточнить основные электрические параметры печи.

Сила тока в индукторе

$$I_1 = U/z = 500/0,718 = 697 \text{ А.}$$

Электрические потери в индукторе

$$P_{э.и} = I_1^2 r_1 = 697^2 \cdot 1,46 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3} = 7100 \text{ Вт.}$$

Полная мощность индукционной единицы

$$P_1 = UI_1 = 500 \cdot 697 \cdot 10^{-3} = 349\,000 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Активная мощность индукционной единицы

$$P_{1а} = P_1 \cos \varphi = 349 \cdot 10^3 \cdot 0,683 = 238\,000 \text{ Вт.}$$

Сила тока в каналах

$$I_2 = I_1 w_1 = 697 \cdot 56 = 39\,000 \text{ А.}$$

Мощность, выделяющаяся в каналах (на одну индукционную единицу):

$$P_2 = I_2^2 r_2 = 39\,000^2 \cdot 1,52 \cdot 10^{-4} = 231\,000 \text{ Вт.}$$

Электрический к. п. д. печи [по формуле (10-45)]

$$\eta_{эл} = \frac{231\,000}{231\,000 + 7100 + 1300 \cdot \frac{26,4}{27,0}} = 0,967.$$

Определяем реактивную мощность конденсаторной батареи P_p , потребляемую для компенсации естественного $\cos \varphi = 0,683$ до $\cos \varphi = 1$ (на одну индукционную единицу)

$$\operatorname{tg} \varphi = x/r = 0,525/0,490 = 1,07;$$

$$P_p = P_{1a} \operatorname{tg} \varphi = 238\,000 \cdot 1,07 = 254\,000 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Б. ПРИМЕР РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Исходные данные:

а) материал — углеродистая сталь, средний размер кусков шихты $d_{ш} = 0,04 \text{ м}$; удельное электрическое сопротивление шихты $\rho_{ш} = 100 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, удельное сопротивление расплава $\rho_2 = 137 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, плотность расплава $\gamma_2 = 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; конечная температура металла $t_k = 1600^\circ \text{С}$;

б) емкость печи $G = 160 \text{ кг}$, остаточная емкость тигля $\bar{G}_0 = 0$; длительность процесса плавки и перегрева металла до конечной температуры $\tau_{пл} = 0,66 \text{ ч}$, длительность вспомогательных операций $\tau_{всп} = 0,14 \text{ ч}$.

1. *Определение геометрических соотношений в системе индуктор—загрузка (см. рис. 69) и выбор частоты источника питания:* Полезный объем тигля находим по формуле (12-4)

$$V = 160/7200 = 0,022 \text{ м}^3.$$

По рис. 70 определяем

$$\bar{h}_2 = h_2/d_2; \bar{h}_2 = 1,4.$$

Внутренний диаметр тигля рассчитываем по уравнению (12-5)

$$D_2 = \sqrt[3]{4 \cdot 0,022/\pi \cdot 1,4} = 0,28 \text{ м.}$$

Высоту расплава в тигле определяем по формуле (12-6)

$$h_2 = 0,28 \cdot 1,4 = 0,39 \text{ м.}$$

Высоту внутренней полости тигля находим из выражения (12-7)

$$h_1 = 1,3 \cdot 0,39 = 0,51 \text{ м.}$$

Толщину футеровки тигля определяем по формуле (12-9)

$$b_0 = 0,08 \sqrt[4]{160 \cdot 10^{-3}} = 0,051 \text{ м.}$$

С учетом тепловой и электрической изоляции внутренний диаметр индуктора находим из уравнения (12-8)

$$D_1 = 0,28 + 0,06 \cdot 2 = 0,40 \text{ м.}$$

Приняв $h_1 = 1,1$, определим по формуле (12-10) высоту индуктора

$$h_1 = 0,39 \cdot 1,1 = 0,43 \text{ м.}$$

ТАБЛИЦА П-4
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУТЕРОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Футеровка	Объемная масса 10^3 кг/м^3	Состав	Содержание, %	Предельная рабочая температура, $^\circ\text{С}$	Теплопроводность, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$
Жаростойкий бетон	2,15—2,30	Магнезит тонкомолотый Шлам Жидкое стекло Кремнефтористый натрий	25—30 50—60 12—20 1—2	1200	$0,60 + 0,38 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$
Кислая футеровка	2,1—2,2	Кварцит Борный ангидрид	97—98 1,3—2,0	1650	$0,45 + 0,38 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$
Основная слеская набивная масса	2,85	Окись магнезия	90	1700	$2,40 - 0,40 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$
Мультикорундовая безуглеродная масса МКЭ-78	2,3		78 20 4	1700	$1,1 (400 + 1200^\circ \text{С}) t_{\text{ср}}$
Огнеупорный бетон	2,2	Магнезит тонкомолотый Магнезит-заполнитель Кварцит тонкомолотый Жидкое стекло Кремнефтористый натрий	25—30 50—60 3—4 10—12 1—2	1400	$2,0 - 0,65 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$
Облажка	—	Кварцит Высокоглинозистый цемент	75 25	1500	$0,69 (100 + 200^\circ \text{С}) t_{\text{ср}}$
Асбест	1,0—1,4	—	—	500	$0,13 + 0,26 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$
Асбоцемент	0,3—0,5	—	—	450	$0,068 + 0,095 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$

Минимальную частоту дросельного питания находим из уравнения (12-12)

$$f_{\min} = \pi 10^6 \frac{100 \cdot 10^{-8}}{1,0 \cdot 0,04^2} = 1970 \text{ Гц.}$$

Принимаем в качестве рабочей частоты

$$f = 2400 \text{ Гц.}$$

2. *Тепловой расчет печи.* Эскиз печи для теплового расчета показан на рис. 70.

А. *Тепловые потери через подину*

Толщина слоя набивки подины $\delta_1 = 0,08$ м; асбестового слоя $\delta_2 = 0,005$ м; слоя бетона подины $\delta_3 = 0,08$ м; асбестоцементной плиты $\delta_4 = 0,04$ м.

Температуры на границах слоев задаются: $t_1 = t_6 = 1600^\circ \text{C}$, $t_2 = 1000^\circ \text{C}$, $t_3 = 900^\circ \text{C}$, $t_4 = 600^\circ \text{C}$, $t_5 = 200^\circ \text{C}$.

Средняя по толщине температура соответствующего слоя, $^\circ \text{C}$:

$$t_{1\text{cp}} = (1600 + 1000)/2 = 1300; \quad t_{2\text{cp}} = (1000 + 900)/2 = 950;$$

$$t_{3\text{cp}} = (900 + 600)/2 = 750; \quad t_{4\text{cp}} = (600 + 200)/2 = 400.$$

Средняя расчетная поверхность на границах соответствующих слоев, м^2 :

$$S_{1\text{cp}} = 0,062; \quad S_{2\text{cp}} = 0,127; \quad S_{3\text{cp}} = 0,177;$$

$$S_{4\text{cp}} = 0,242; \quad S_{5\text{cp}} = 0,270.$$

Средние значения коэффициентов теплопроводности слоев, соответствующие температурам $t_{1\text{cp}} \div t_{5\text{cp}}$ (табл. 11-4), $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ \text{C})$:

$$\lambda_{1\text{cp}} = 1,88; \quad \lambda_{2\text{cp}} = 0,37; \quad \lambda_{3\text{cp}} = 1,05;$$

$$\lambda_{4\text{cp}} = 0,35.$$

Тепловые сопротивления слоев определяем по формуле (12-19), $^\circ \text{C}/\text{Вт}$:

$$R_{T1} = 0,68; \quad R_{T2} = 0,11; \quad R_{T3} = 0,43; \quad R_{T4} = 0,47.$$

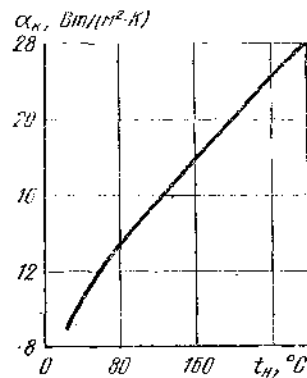


Рис. 11-5. Коэффициент теплоотдачи конвекцией к окружающему воздуху

Тепловое сопротивление слоя воздуха на внешней поверхности подины (по рис. 11-5) при $\alpha_k = 15,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$R_{T5} = \frac{1}{15,7 \cdot 0,27} = 0,24^\circ \text{C}/\text{Вт}.$$

Тепловые потери через подину определяем по формуле (12-17)

$$P_{T, \text{п}} = \frac{1600 - 20}{0,68 + 0,11 + 0,43 + 0,47 + 0,24} = 0,82 \text{ кВт.}$$

Проверяем температуры на границах слоев по уравнению (12-18), $^\circ \text{C}$:

$$t_2 = 1600 - 820 \cdot 0,68 = 1040; \quad t_3 = 1040 - 820 \cdot 0,11 = 950;$$

$$t_4 = 950 - 820 \cdot 0,43 = 598; \quad t_5 = 598 - 820 \cdot 0,47 = 212.$$

Поскольку расхождение расчетных значений со значениями, которыми мы задавались ранее, не превышает 6%, дальнейших уточнений можно не проводить.

Б. *Тепловые потери через боковые стенки тигля*

Принимаем толщину асбестового слоя $\delta_a = 0,005$ м (внутренний диаметр асбестового слоя $d_s = 0,39$ м).

Принимаем температуру на границе набивки и асбестового слоя $t_2 = 600^\circ \text{C}$, а температуру снаружи асбестового слоя $t_3 = 55^\circ \text{C}$.

Средние значения температур слоев, $^\circ \text{C}$:

$$t_{\text{ср}1} = (1600 + 600)/2 = 1100; \quad t_{\text{ср}2} = (600 + 55)/2 = 327.$$

Средние значения коэффициентов теплопроводности слоев, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$:

$$\lambda_{\text{ср}1} = 1,95; \quad \lambda_{\text{ср}2} = 0,21.$$

Тепловые потери через боковую стенку

$$P_{T, \text{б}} = \frac{2\pi \cdot 0,39 (1600 - 150)}{\frac{1}{1,95} \ln \frac{0,4 - 0,01}{0,28} + \frac{1}{0,21} \ln \frac{0,4}{0,4 - 0,01}} = 16,2 \text{ кВт.}$$

Проверка температур:

$$t_3 = 1600 - 16,2 \cdot 10^3 \frac{\ln (0,39/0,28)}{2\pi \cdot 1,95 \cdot 0,43} = 600^\circ \text{C};$$

$$t_5 = 600 - 16,2 \cdot 10^3 \frac{\ln (0,40/0,39)}{2\pi \cdot 0,21 \cdot 0,43} = 53^\circ \text{C}.$$

В. *Тепловые потери излучением с зеркала ванны*

Степень черноты расплава принимаем равной $\epsilon = 0,45$.

Коэффициент диафрагмирования находим по рис. 11-6 $\xi = 0,66$.

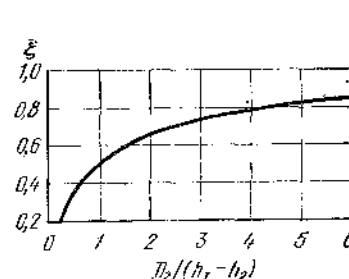


Рис. 11-6. Коэффициент диафрагмирования

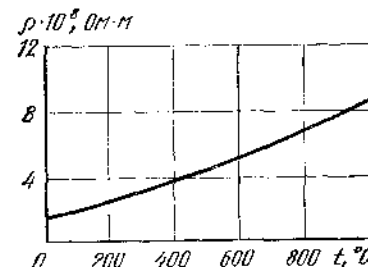


Рис. 11-7. Зависимость удельного электрического сопротивления меди от температуры

Тепловые потери излучением

$$P_{\text{изл}} = 0,45 \cdot 5,7 \left[\left(\frac{1173}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] \frac{\pi \cdot 0,28^2}{4} \cdot 0,66 = 1,95 \text{ кВт.}$$

Г. *Суммарные тепловые потери*

$$P_{T, \Sigma} = 16,2 \cdot 10^3 + 1,95 \cdot 10^3 + 0,82 \cdot 10^3 \approx 19 \text{ кВт.}$$

Д. Полезная мощность, идущая на расплавление и перегрев

Энтальпия при конечной температуре металла можно определить по рис. 47:

$$q_{\text{ж}} = 0,37 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг.}$$

Полезную мощность определяем по формуле (12-22)

$$P_{\text{пол}} = 0,37 \frac{160}{0,66} = 89,6 \text{ кВт.}$$

Тепловой к. п. д. печи находим из выражения (12-24)

$$\eta_{\text{т}} = \frac{89,6}{(89,6 + 19,0)} = 0,825.$$

3. Электрический расчет индуктора в горячем режиме

Глубину проникновения тока в материал индуктора ($\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, см. рис. П-7) определяем по номограмме рис. 12 или из выражения (7-3)

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} / 2400} = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Активное и реактивное сопротивления индуктора находим по уравнению (7-1)

$$r_1 = x_{1\text{в}} = 2 \cdot 10^{-8} \frac{\pi (0,40 + 1,45 \cdot 10^{-3})}{1,45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,43} \frac{1}{0,9} = 0,047 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2.$$

Глубина проникновения тока в материал загрузки (по рис. П-8 $\rho_2 = 137 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$):

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{137 \cdot 10^{-8} / 2400} = 12,0 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

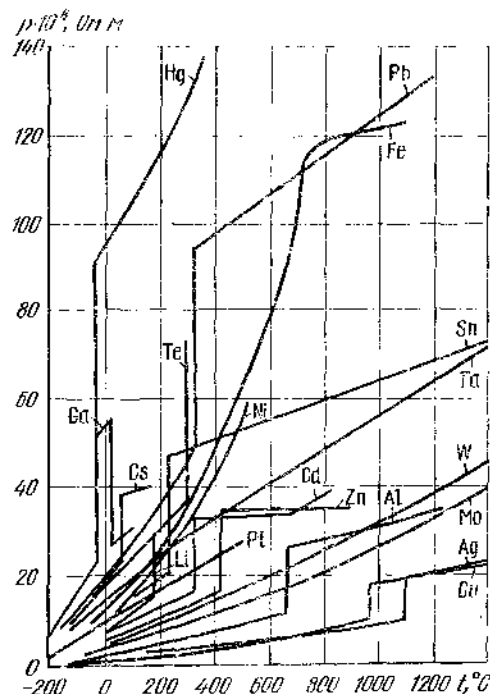


Рис. П-8. Зависимость удельного электрического сопротивления некоторых металлов от температуры

Относительный радиус расплава определяем по формуле (7-5)

$$\bar{R}_2 = \frac{0,28}{2 \cdot 12,0 \cdot 10^{-3}} = 16,5.$$

По рис. 23 находим $\Psi_a = \Psi_p = 0,06$.

Активное и реактивное сопротивление загрузки определяем по формуле (7-4)

$$r_2 = x_{2\text{в}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{137 \cdot 10^{-8} \cdot 0,28^2}{(12 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,39} 0,06 = 0,257 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2.$$

Реактивное сопротивление воздушного зазора находим по уравнению (7-10)

$$x_3 = 2\pi^2 \frac{0,4^2 - 0,28^2}{0,39} 2400 \cdot 10^{-7} = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2.$$

По отношению $D_1/h_1 = 0,40/0,43 = 0,93$ находим значение коэффициента Нагаока (см. рис. 41)

$$k_1 = 0,7.$$

Реактивное сопротивление пустого индуктора определяем по формуле (7-14)

$$x_{10} = 2\pi^2 \frac{0,4^2}{0,43} 2400 \cdot 10^{-7} \cdot 0,7 = 3,87 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2.$$

Реактивное сопротивление обратного замыкания находим по уравнению (7-11)

$$x_0 = 3,87 \cdot 10^{-3} \frac{0,43}{0,43 - 0,7 \cdot 0,39} = 10,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/виток}^2.$$

Коэффициент приведения параметров загрузки к току индуктора определяем по формуле (7-15)

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\left(\frac{0,257 \cdot 10^{-3}}{10,6 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + \left(1 + \frac{0,257 \cdot 10^{-3} + 3,1 \cdot 10^{-3}}{10,6 \cdot 10^{-3}} \right)^2} = 0,585.$$

Приведенные активное r'_2 и реактивное x'_2 сопротивления загрузки находим по уравнениям (7-16) и (7-17), Ом/виток²:

$$\begin{aligned} r'_2 &= 0,585 \cdot 0,257 \cdot 10^{-3} = 0,15 \cdot 10^{-3}; \\ x'_2 &= 0,585 [(0,257 \cdot 10^{-3} + 3,1 \cdot 10^{-3}) + \\ &+ \frac{(0,257 \cdot 10^{-3} - 3,1 \cdot 10^{-3})^2 + (0,257 \cdot 10^{-3})^2}{10,6 \cdot 10^{-3}}] = 2,59 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Эквивалентные активное r_3 и реактивное x_3 сопротивления системы индуктор—расплав, Ом/виток², определяем по формуле (7-18):

$$\begin{aligned} r_3 &= 0,047 \cdot 10^{-3} + 0,15 \cdot 10^{-3} = 0,197 \cdot 10^{-3}; \\ x_3 &= 0,047 \cdot 10^{-3} + 2,59 \cdot 10^{-3} = 2,637 \cdot 10^{-3}; \\ z_3 &= \sqrt{(0,197^2 + 2,637^2) \cdot 10^{-6}} = 2,640 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Электрический к. п. д. индуктора с нагрузкой находим по уравнению (7-19)

$$\eta_3 = 0,15 \cdot 10^{-3} / 0,197 \cdot 10^{-3} = 0,76.$$

Коэффициент мощности индуктора с нагрузкой определяем по формуле (7-20)

$$\cos \varphi = 0,197 \cdot 10^{-3} / 2,64 \cdot 10^{-3} = 0,075.$$

Активная мощность источника питания

$$P_{\text{т}} = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_3 \eta_{\text{т}} \eta_{\text{всп}}} = \frac{89,6}{0,76 \cdot 0,825 \cdot 0,9} = 159 \text{ кВт.}$$

Здесь коэффициент $\eta_{всп}$, учитывающий электрические потери в короткой сети, в конденсаторной батарее и в других элементах установки принят равным $\eta_{всп} \approx 0,9$.

Выбираем тиристорный преобразователь частоты типа ТПЧ-160-2,4 мощностью 160 кВт.

Выходное напряжение источника питания принимаем равным $U = 900$ В.

Число витков индуктора при этом напряжении определяем по формуле (7-21)

$$\omega = 900 \sqrt{\frac{0,075}{(89,6 + 19,0) \cdot 10^3 \cdot 2,64 \cdot 10^{-3}}} = 14,5.$$

Ориентировочную высоту индуктирующего витка находим по уравнению (7-22)

$$h'_в = \frac{0,43}{14,5} 0,9 = 26,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

По сортаменту выбираем трубку диаметром 26 мм при числе витков $\omega = 14$. Тогда окончательно имеем коэффициент заполнения

$$k_{з.и} = \frac{26 \cdot 10^{-3} \cdot 14}{0,43} = 0,85$$

и номинальное напряжение печи

$$U_n = 900 \frac{14}{14,5} = 870 \text{ В.}$$

Активное r_n , реактивное x_n и полное z_n сопротивления индуктора, Ом, определяем по формуле (7-23):

$$r_n = 0,197 \cdot 10^{-3} \cdot 14^2 = 0,038;$$

$$x_n = 2,637 \cdot 10^{-3} \cdot 14^2 = 0,515;$$

$$z_n = 2,64 \cdot 10^{-3} \cdot 14^2 = 0,516.$$

Силу тока в индукторе находим по уравнению (7-24)

$$I_1 = 870/0,516 = 1680 \text{ А.}$$

Настил тока в индукторе определяем по формуле (7-25)

$$H_n = 1680 \frac{14}{0,43} = 54,7 \text{ кА/м.}$$

Активную мощность, подводимую к индуктору, находим по уравнению (7-26)

$$P_n = 870 \cdot 1680 \cdot 0,075 = 109,5 \text{ кВт.}$$

4. Расчет водоохлаждения индуктора. Электрические потери в индукторе определяем по формуле (7-28)

$$P_{э.и} = 109,5 (1 - 0,76) = 26,3 \text{ кВт.}$$

Суммарные потери, отводимые охлаждением индуктора, находим по уравнению (7-27)

$$P_{охл} = 26,3 + 16,2 = 42,5 \text{ кВт.}$$

Приняв $t_{вх} = 20^\circ \text{С}$ и $t_{вых} = 50^\circ \text{С}$, определяем потребный расход охлаждающей воды по формуле (7-29)

$$Q_{охл} = 0,24 \frac{42,5 \cdot 10^3}{50 - 20} \cdot 10^{-6} = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Диаметр канала охлаждения при толщине стенки трубки 3 мм $D_0 = 26 \times 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а площадь его сечения $S_0 = \pi (20 \cdot 10^{-3})^2/4 = 314 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Скорость воды в канале охлаждения определяем по формуле (7-30)

$$v_в = 0,34 \cdot 10^{-3}/314 \cdot 10^{-6} = 1,08 \text{ м/с.}$$

Кинематическую вязкость воды находим по рис. 42

$$\nu_в = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

и число Рейнольдса

$$Re = 1,08 \cdot 20 \cdot 10^{-3}/0,75 \cdot 10^{-6} = 2,88 \cdot 10^4.$$

Следовательно, движение воды турбулентное, т. е. $Re > 10^4$.

Коэффициент трения определяем по формуле (7-36)

$$\xi = 0,316/(2,88 \cdot 10^4)^{0,25} = 0,024.$$

Коэффициент сопротивления повороту струн находим по табл. 3 при $D_1/D_в = 0,40/0,02 = 20$ $\xi_{пл} = 0,144$.

Коэффициент увеличения сопротивления примем $k_{ш} = 2,5$.

Потери напора по длине трубки индуктора, кПа, определим по формуле (7-34):

$$\Delta p = 14 \frac{1,08^2}{2} \left(0,024 \cdot 2,5 \frac{\pi (0,40 + 0,026)}{20 \cdot 10^{-3}} + 0,144 \right) 10^3 = 34;$$

$$\Delta p < \Delta p_{доп} = 200.$$

Теплопроводность воды при $t_{в.ср} = 35^\circ \text{С}$ находим по рис. 42, $\lambda_в = 0,46 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; температуропроводность $a_в = 1,5 \cdot 10^{-7}$ и число Прандтля $Pr = 4,6$.

Критерий Нуссельта

$$Nu = 0,023 (2,88 \cdot 10^4)^{0,58} \cdot 4,6^{0,4} = 155.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки индуктора к воде определяем по формуле (7-39)

$$\alpha_в = 155 \frac{0,46}{20 \cdot 10^{-3}} = 3,57 \text{ кВт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Величину потерь, которые могут быть отведены охлаждающей водой, находим по уравнению (7-38)

$$P_в = 3,57 (60 - 35) \pi 20 \cdot 10^{-3} \cdot \pi 0,426 \cdot 14 \cdot 0,75 = 78,6 \text{ кВт.}$$

Поскольку соблюдается условие (7-42) $P_{охл} < P_в$, расчет охлаждения можно закончить.

Б. Расчет конденсаторной батареи. Выбираем тип конденсаторов по табл. 4. Принимаем конденсатор типа ЭСВ—1—2,4 с номинальным напряжением 1000 В и емкостью 19,9 мкФ.

Реактивная мощность конденсаторной батареи, необходимая для компенсации $\cos \varphi$ установки до $\cos \varphi_k$ (напомним, что при питании от ТПЧ $\cos \varphi_k \approx 0,6$)

$$P_{к.с} = 109,5 (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) = 1,6 \cdot 10 \text{ Вар.}$$

С учетом недоиспользования банок по напряжению:

$$P_{к.с} = 1,6 \cdot 10^3 \left(\frac{1000}{870} \right)^2 = 2,1 \cdot 10^3 \text{ кВар.}$$

Емкость конденсаторной батареи определяем по формуле (7-56)

$$C = \frac{2,1 \cdot 10^3}{2\pi 2400 (870)^2} = 185 \text{ мФ.}$$

Число банок находим по уравнению (7-57)

$$N_6 = 185/19,9 = 9,2.$$

Принимаем $N_6 = 10$.

Электрические потери в конденсаторной батарее определяем по формуле (7-58)

$$P_{\Sigma, \text{с}} = 2,1 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 16,8 \text{ кВт.}$$

6. Энергетический баланс установки. Электрические потери в индукторе определим по формуле (7-60)

$$P_{\Sigma, \text{и}} = (1680)^2 \cdot 0,047 \cdot 10^{-3} \cdot 14^2 = 25,8 \text{ кВт.}$$

Потери в конденсаторной батарее

$$P_{\Sigma, \text{с}} = 16,8 \text{ кВт.}$$

Потери в токоподводе можно ориентировочно принять

$$P_{\text{ток}} = 0,05P = 0,05 \cdot 160 = 8 \text{ кВт.}$$

Мощность, забираемую от преобразователя, определяем по формуле (7-66)

$$P_f = 25,8 + 16,8 + 8,0 + 89,6 : 19,0 = 160 \text{ кВт.}$$

Электрические потери в источнике питания находим из выражения (7-65)

$$P_{\text{к.п}} = 160 \left(\frac{1}{0,92} - 1 \right) = 13,5 \text{ кВт.}$$

Активную мощность, потребляемую установкой от сети, определяем по формуле (7-68)

$$P_{\Sigma} = 160 + 13,5 = 173,5 \text{ кВт.}$$

Общий к. п. д. плавильной установки находим по уравнению (7-69)

$$\eta_y = 89,6 / 173,5 = 0,52.$$

Удельный расход электроэнергии определяем по формуле (7-72)

$$q = 0,37 \cdot 10^3 / 0,52 = 710 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$$

Длительность плавки находим из выражения (7-73)

$$\tau_{\text{пл}} = 160 \cdot 710 \cdot 10^{-3} / 173,5 \cdot 10^3 = 0,66 \text{ ч.}$$


Производительность установки по расплавлению и перегреву определяем по формуле (7-74)

$$g = 160 \cdot 10^{-3} / 0,66 = 0,243 \text{ т/ч.}$$

Фактическая производительность (с учетом вспомогательного времени, $\tau_{\text{всп}}$)

$$g = 160 \cdot 10^{-3} / (0,66 + 0,14) = 0,200 \text{ т/ч.}$$

ТАБЛИЦА П-5
ПАРАМЕТРЫ МЕДНОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ТРУБКИ (мм)
ДЛЯ ИНДУКТОРОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Эскиз	A	B	D	A	B	D
	16	22	8	28	34	20
	18	24	10	30	36	22
	20	26	12	32	38	24
	22	28	14	34	40	26
	24	30	16	36	42	28
	26	32	18			

Примечание. Размер С = 10 мм для всех трубок.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
ЧАСТЬ I. ОСНОВЫ ФИЗИКИ И ТЕОРИИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА	6
ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА	6
§ 1. Определения и основные понятия	6
§ 2. Некоторые особенности и преимущества индукционных методов нагрева	7
§ 3. Классификация и области применения установок для индукционного нагрева и плавки	9
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	15
§ 1. Электромагнитное поле. Связь между электрическими и магнитными явлениями	15
§ 2. Связь магнитного поля с электрическим током. Закон полного тока	18
§ 3. Закон электромагнитной индукции. Явления самоиндукции и взаимной индукции при индукционном нагреве	20
ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРОВОДЯЩИХ ТЕЛ	24
§ 1. Применение принципа наименьшего действия для отыскания распределения вихревых токов в массивных проводниках	25
§ 2. Поверхностный эффект в массивных проводниках	27
§ 3. Глубина проникновения тока	30
§ 4. Эффект близости	36
§ 5. Кольцевой (катушечный) эффект	39
§ 6. Эффект паза	41
ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИНДУКТОР—ЗАГРУЗКА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ	44
§ 1. Электромагнитные процессы в сплошном металлическом цилиндре, помещенном в поле цилиндрического индуктора	44
§ 2. Активная и реактивная мощности в металле индуктора	50
§ 3. Электрический к. п. д. системы индуктор—загрузка	51
§ 4. Коэффициент мощности системы индуктор—загрузка	54
§ 5. Индукционный нагрев совокупности металлических цилиндров	55
ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ И МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ	58
§ 1. Электромагнитные силы, действующие на токонесущие проводники	58
§ 2. Электродинамические силы в жидком металле	62
§ 3. Электродинамическая циркуляция расплавленного металла в индукционной тигельной печи	65
§ 4. Магнитогидродинамические явления в индукционной канальной печи	68
ГЛАВА 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ИНДУКТОР—ЗАГРУЗКА	72
§ 1. Магнитная схема замещения короткого индуктора с загрузкой	73
§ 2. Электрическая схема замещения индуктора с загрузкой	75
§ 3. Определение сопротивления обратного замыкания	77
§ 4. Некоторые предельные случаи расчета параметров схемы замещения	79

ГЛАВА 7. РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ НЕМАГНИТНОЙ ЗАГРУЗКИ	81
§ 1. Определение эквивалентных сопротивлений системы индуктор—загрузка	81
§ 2. Расчет водоохлаждения индуктора	85
§ 3. Расчет магнитопровода индукционных нагревателей	89
§ 4. Расчет конденсаторной батареи индукционных установок	92
§ 5. Построение энергетического баланса индукционной установки	93
ГЛАВА 8. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЗАГРУЗКИ	96
§ 1. Изменение глубины проникновения тока и поглощения мощности с ростом температуры загрузки	96
§ 2. Режимы нагрева стальной загрузки	98
§ 3. Эффективная глубина проникновения (глубина активного слоя)	100
ЧАСТЬ II. ИНДУКЦИОННЫЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	101
ГЛАВА 9. КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННЫХ КАНАЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ	101
§ 1. Общая характеристика и достоинства канальной печи	101
§ 2. Схема замещения канальной печи	103
§ 3. Конструктивное выполнение основных элементов промышленных печей	105
ГЛАВА 10. РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ КАНАЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ	114
§ 1. Электрический расчет печи	114
§ 2. Определение энергетических характеристик печи	122
ГЛАВА 11. КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ	123
§ 1. Общая характеристика и достоинства тигельных плавильных печей	123
§ 2. Конструктивное выполнение основных элементов печи	124
§ 3. Промышленные тигельные печи и особенности их эксплуатации	133
ГЛАВА 12. РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ	137
§ 1. Исходные данные и последовательность расчета	137
§ 2. Определение соотношений геометрических размеров в системе индуктор—загрузка и выбор частоты источника питания	138
§ 3. Тепловой расчет тигельной печи	140
§ 4. Электрический расчет тигельной печи	143
ГЛАВА 13. КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННЫХ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ	147
§ 1. Классификация индукционных вакуумных печей	147
§ 2. Конструктивные особенности промышленных индукционных вакуумных печей	151
§ 3. Параметры отечественных вакуумных печей	156
§ 4. Технологические особенности индукционной вакуумной плавки металлов	157
ГЛАВА 14. МЕТОДЫ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ ОСОБО ЧИСТЫХ И АГРЕССИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ	160
§ 1. Индукционная гарнисажная плавка	160
§ 2. Индукционная струйная плавка	161
§ 3. Плавка во взвешенном состоянии	162

§ 4. Зонная плавка	165
§ 5. Индукционная плавка в холодном тигле	168
ГЛАВА 15. ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА	173
§ 1. Особенности сквозного индукционного нагрева	173
§ 2. Конструкции установок	175
§ 3. Индукторы установок для сквозного нагрева	179
ГЛАВА 16. РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК	184
§ 1. Тепловой расчет индукционного нагревателя	184
§ 2. Электрический расчет индуктора для нагревателей периодического действия	188
§ 3. Особенности индукционного нагрева стальных заготовок в нагревателе непрерывного действия	190
§ 4. Расчет индуктора нагревателя непрерывного действия	191
ГЛАВА 17. ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ	193
§ 1. Особенности индукционной поверхностной закалки	193
§ 2. Индукторы для нагрева под поверхностную закалку	195
§ 3. Закалочные установки	199
ГЛАВА 18. РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ	200
§ 1. Определение ширины и глубины закаленного слоя. Выбор частоты	201
§ 2. Тепловой расчет индуктора	202
§ 3. Электрический расчет индуктора	203
ГЛАВА 19. УСТАНОВКИ ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА	205
§ 1. Физические основы диэлектрического нагрева	205
§ 2. Определение основных параметров установок	208
§ 3. Применение диэлектрического нагрева в промышленности	211
ГЛАВА 20. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА	214
§ 1. Электрические схемы и компоновка	214
§ 2. Источники питания	217
§ 3. Элементы индукционных установок	221
§ 4. Техника безопасности при работе на индукционных установках	225
Библиографический список	226
Приложения	227

ИБ № 333

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ ФОМИН
ЛЕВ МАРКОВИЧ ЗАТУЛОВСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Редактор издательства Н. Ф. Фокина
Художественный редактор Г. А. Жегин
Технический редактор Н. В. Сидорова
Корректоры: Н. И. Шефтель, Л. М. Зинченко
Переплет художника Е. И. Волкова

Сдано в набор 23.01.79 Подписано в печать 31.07.79. Т-14719. Формат бумаги 60×90¹/₁₆.
Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Печ. л. 15,5. Уч.-изд. л. 17,03. Тираж 5900 экз. Заказ 1276. Цена 75 к. Изд. № 3585

Издательство «Металлургия», 119034, Москва Г-34, 2-й Обыденский пер., д. 14

Ленинградская типография № 6 Ленинградского
производственного объединения «Техническая книга»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
193141, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10