

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования -  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра материаловедения и технологии материалов

**В.Ф. ГРЕБЕНЮК, В.И. ХОМУТОВ, Е.В. КАЛМЫКОВ**

ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ И РАСЧЕТ  
ИНДУКТОРА ДЛЯ  
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОМУ  
И ДИПЛОМНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

*Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским  
советом государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования -  
«Оренбургский государственный университет»*

Оренбург 2002

ББК 31.292 я 73  
Г79  
УДК 621.365.5(075)

**Рецензент**

доктор технических наук, профессор С.И. Богодухов

**Гребенюк В.Ф., Хомутов В.И., Калмыков Е.В.**

Г79 **Выбор конфигурации и расчет индукторов для высокочастотного нагрева: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию.- Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2002. – 31 с.**

В методических указаниях изложены основы физики и теории индукционного нагрева. Рассмотрены электромагнитные явления и физические законы, лежащие в основе индукционного метода нагрева. Описана методика выбора и расчета индукторов для поверхностного нагрева цилиндрических и плоских деталей.

Методические указания предназначены для выполнения курсовых и дипломных проектов студентов специальности 120600.

ББК 31.292 я 73

© Гребенюк В.Ф., Хомутов В.И., Калмыков Е.В.,  
2002

© ГОУ ВПО ОГУ, 2002

## Введение

Главным отличием индукционного нагрева от нагрева внешними источниками тепла (в печах и других нагревательных устройствах) является выделение тепла непосредственно в самом металле. При индукционном нагреве реализуется возможность значительной концентрации электрической энергии в небольшом объеме нагреваемого металла, что позволяет осуществлять нагрев с большой скоростью.

Широкое применение индукционного нагрева для различных видов термообработки изделий требует проектирования специальных высокочастотных индукторов, служащих для концентрирования переменного электромагнитного поля в нагреваемых зонах.

Для проектирования и выбора остальной высокочастотной аппаратуры, например трансформаторов и конденсаторов, необходимо знать основные параметры индуктора: ток, напряжение и коэффициент мощности. Точный расчет этих величин при нагреве стальных деталей осложняется зависимостью удельного сопротивления и особенно магнитной проницаемости стали от температуры. Однако обычно достаточно определить средние (за время нагрева) параметры индуктора.

## 1 Физическая сущность индукционного способа нагрева

Под индукционным нагревом понимается нагрев при бесконтактной передаче энергии в нагреваемое электропроводящее тело с помощью переменного электромагнитного поля, создаваемого индуктором.

### 1.1 Физические основы

Передача электрической энергии от индуктора к нагреваемому телу основана на законе электромагнитной индукции, а превращение ее в тепловую – на законе Джоуля-Ленца.

В металлическом теле, помещенном внутрь индуктора (соленоида), через который пропускается переменный ток, изменяющееся магнитное поле вызывает появление ЭДС индукции

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где  $e$  и  $\Phi$  – мгновенные значения ЭДС и магнитного потока соответственно.

При синусоидальном изменении магнитного потока с частотой  $f$  эффективное значение индуктированной ЭДС будет равно

$$E = 4,44 f\Phi_m, \quad (2)$$

где  $\Phi_m$  – амплитудное значение магнитного потока.

Индуктированные и циркулирующие в поверхностных слоях тела вихревые токи вызывают его нагрев. Поэтому значение и характер распределения выделяющейся мощности в нагреваемом теле зависят от его электромагнитных свойств (электрического сопротивления и магнитной проницаемости), а наличие электропроводящих свойств материала тела является обязательным условием индукционного нагрева.

### 1.2 Поверхностный эффект

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).

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) ЭДС или приложением внешнего магнитного поля.

При пропускании переменного тока металл проводника находится в переменном магнитном поле, которое индуктирует в нем противо-ЭДС. Наи-

большая противо-ЭДС индуцируется в центре проводника, который охватывается полным магнитным потоком.

Чем ближе к поверхности проводника, тем слабее магнитное поле, а следовательно, меньше противо-ЭДС.

Существование этой силы равноценно появлению в проводнике некоторого добавочного сопротивления, носящего название индуктивного сопротивления цепи.

Встречая в центре проводника наибольшую противо-ЭДС или наибольшее индуктивное сопротивление, ток будет стремиться пройти по пути наименьшего сопротивления и вытеснится к поверхности проводника.

Таким образом, плотность тока будет уменьшаться от поверхности проводника к его оси. Неравномерность распределения тока по сечению проводника будет тем больше, чем толще проводник и выше частота тока.

### 1.3 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:

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

где  $\delta_x$  – плотность тока на расстоянии  $x$  от поверхности проводника;

$\delta_0$  – плотность тока на поверхности проводника;

$e$  – основание натурального логарифма ( $e = 2,718$ );

$\Delta$  – глубина проникновения тока в проводнике, м.

Графически это показано на рисунке 1.

Теория электромагнитного поля дает следующее выражение для глубины проникновения тока в плоском массивном проводнике

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м;

$\omega$  - круговая частота, характеризует электромагнитное поле, Гц;

$$\omega = 2\pi f, \quad (5)$$

где  $f$  – частота, Гц;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз проницаемость материала проводника больше проницаемости вакуума, равная

$$\mu = \mu_\epsilon / \mu_0, \quad (6)$$

где  $\mu_\epsilon$  – магнитная проницаемость материала проводника, Гн/м.

После подстановки значений круговой частоты и магнитной проницаемости вакуума в выражение (4) формула глубины проникновения принимает вид

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}. \quad (7)$$

Данное выражение показывает, что степень затухания поля зависит от частоты поля  $f$ , электросопротивления  $\rho$  и магнитной проницаемости металла  $\mu_{\text{в}}$ .

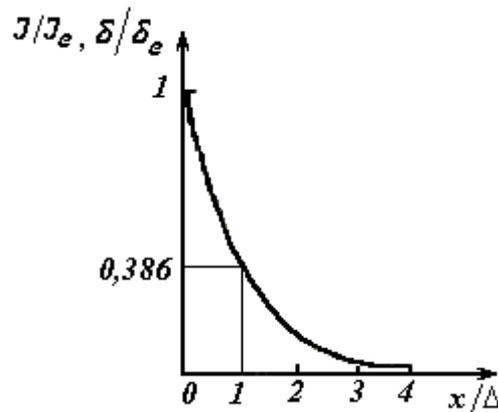


Рисунок 1 – Зависимость силы тока и плотности тока от глубины

Под глубиной проникновения тока понимают 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.

Понятие глубины проникновения тока весьма важно по ряду причин. В слое толщиной  $\Delta$  протекает примерно 85,89 % полного тока и выделяется 86,5 % мощности.

Использование понятия глубины проникновения тока часто позволяет упростить расчеты. Экспоненциальное распределение тока можно заменить более простым – прямоугольным, т.е. считать, что ток протекает только в слое глубиной  $\Delta$  с равномерной плотностью  $\delta/\sqrt{2}$  и за пределами этого слоя отсутствует, следовательно, в слое глубиной  $\Delta$  выделяется вся тепловая энергия.

## 1.4 Эффект близости

Эффект близости представляет собой одну из разновидностей поверхностного эффекта и состоит в концентрации тока в определенных зонах поверхности проводников в результате суммарного взаимодействия электромагнитных полей всех проводников с током, входящих в рассматриваемую систему.

В отдельном проводнике ток высокой частоты распределяется равномерно по поверхностному слою проводника. При прохождении тока высокой частоты по двум проводникам, находящимся на близком расстоянии друг от друга, происходит перераспределение тока внутри каждого проводника.

Если токи в проводниках пропускаются в разных направлениях, то наибольшая плотность тока будет сосредоточена на сторонах, обращенных друг к другу (рисунок 2, б). Если же токи в проводниках имеют одинаковое направление, то наибольшая плотность тока будет на удаленных сторонах проводников (рисунок 2, в). Эффект близости проявляется тем сильнее, чем ближе проводники друг к другу.

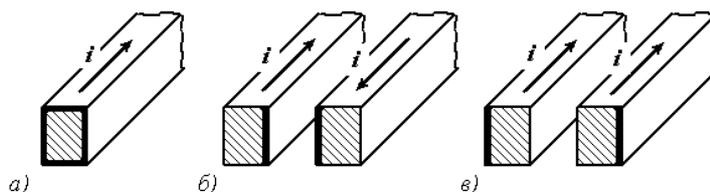


Рисунок 2 – Проявление эффекта близости в проводниках

В проводниках, расположенных под углом  $\alpha$ , наибольшая плотность тока будет в зоне наименьшего расстояния между проводниками.

Если провод, по которому течет переменный ток, находится на близком расстоянии от поверхности стальной плиты, то по закону индукции в ее поверхностном слое будет индуцироваться ток обратного направления. Он пойдет по пути, повторяющем форму индуктирующего провода (индуктора). Чем меньше будет зазор между поверхностью плиты и индуктором, тем с большей точностью, благодаря эффекту близости, повторится форма индуктора.

## 1.5 Кольцевой (катушечный) эффект

Если проводник свернуть в кольцо или спираль и пропустить через него переменный ток, то наибольшая его плотность будет на внутренней спирали проводника. Это явление, называемое кольцевым эффектом, тем более ярко выражено, чем больше по отношению к диаметру кольца радиальная высота проводника и чем ярче выражен поверхностный эффект.

Кольцевой эффект, являющийся также разновидностью поверхност-

ного эффекта, объясняется асимметрией магнитного поля витка или соленоида. Во внутренней полости оно значительно сильнее, чем снаружи, вследствие чего главная часть электромагнитной энергии поступает в проводник изнутри.

Кольцевой эффект ухудшает использование сечения проводников, повышая их активное сопротивление. При расчете сопротивления цилиндрических и овальных индукторов, внутрь которых помещена нагреваемая деталь, можно принимать, что ток сконцентрирован лишь на внутренней стороне провода. Усиление магнитного поля внутри индуктора в соединении эффектом близости повышает эффективность нагрева деталей, охваченных индуктором. В этом случае кольцевой эффект полезен, несмотря на увеличение активного сопротивления индуктирующего провода. Однако он затрудняет нагрев внутренних поверхностей, действуя противоположно эффекту близости и уменьшая напряженность магнитного поля у нагреваемой поверхности.

### ***1.6 Влияние магнитопровода на распределение тока в проводнике***

Если проводник, по которому пропускается ток высокой частоты, окружить с трех сторон ферромагнитным материалом, имеющим большое электрическое удельное сопротивление (феррит или расслоенное железо), но являющимся хорошим проводником магнитного потока и уменьшающим рассеяние магнитного поля в пространстве, то можно наблюдать явление одностороннего поверхностного эффекта. Наибольшая плотность тока будет в той части проводника, которая находится у открытой стороны паза. В присутствии магнитопровода часть проводника, лежащая в глубине паза, охватывается полным магнитным потоком, поэтому в этой части индуктируется наибольшая противоэлектродвижущая сила и создается большое индуктивное сопротивление. Вследствие этого ток проходит в части проводника, обладающей наименьшим сопротивлением в зоне открытого конца паза.

Явление вытеснения тока в проводнике, расположенном в пазу магнитопровода, к открытому концу паза называют эффектом паза или эффектом Фильда.

Поскольку в магнитопроводе за счет вихревых токов и потерь на гистерезис выделяется значительная мощность, то его практически всегда нужно охлаждать водой. Для изготовления магнитопроводов, используемых при частотах звукового диапазона (от 0,5 до 10 кГц), применяют пластины толщиной от 0,01 до 0,35 мм, выполненные из трансформаторной кремнистой стали и покрытые термостойким слоем изоляции с помощью лакирования, оксидирования или лучше всего фосфатирования. Толщина пластины выбирается в зависимости от частоты, индукции и интенсивности охлаждения. Для частот от 0,5 до 2,5 кГц применяют пластины толщиной от 0,35 до 0,2 мм, а для частот от 8 до 10 кГц – толщиной от 0,2 до 0,1 мм. Магнитопроводы, применяемые в устройствах с частотой радиодиапазона (70 кГц и выше), изготавливают только из феррита.

### 1.7 Изменение физических свойств нагреваемого металла. Стадии нагрева

При нагреве стали изменяются ее удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость металлов.

Магнитная проницаемость слабо зависит от температуры примерно до 650-700 °С, после чего быстро уменьшается и достигает значения, примерно равного проницаемости вакуума. В приближенных расчетах обычно считается, что она падает скачком до  $\mu = 1$  в точке магнитных превращений (точке Кюри), примерно соответствующей температуре 750-770 °С.

Зависимость удельного сопротивления от температуры для стали с содержанием углерода 0,4 - 0,5 % приведена на рисунке 3.

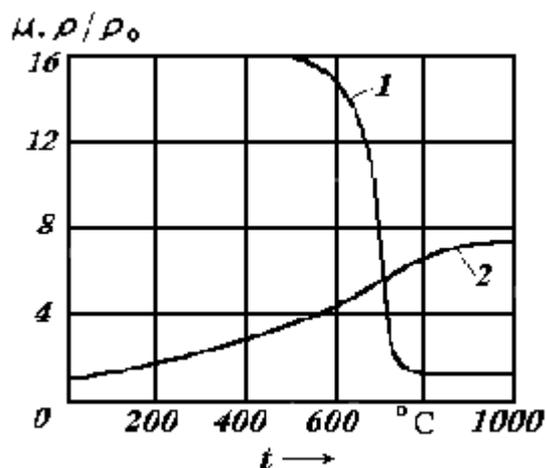


Рисунок 3 – Зависимость относительной магнитной проницаемости (1) и удельного электрического сопротивления (2) от температуры для стали 45

Из рисунка 3 видно, что в промежутке от 15 до 800 °С удельное электрическое сопротивление возрастает примерно в 5 раз. В дальнейшем рост удельного сопротивления замедляется, причем значения его для разных сортов стали становятся почти равными. В среднем можно принять, что в интервале температур от 800 до 900 °С удельное электрическое сопротивление равно  $10^{-6}$  Ом·м. В результате снижения магнитной проницаемости и роста удельного сопротивления в процессе нагрева глубина проникновения тока возрастает в 8 – 10 раз.

Для определения глубины проникновения тока в сталь, нагретую выше точки магнитных превращений  $\Delta_K$ , м, можно использовать простую формулу, подставив в выражение (7)  $\rho = \rho_K = 10^{-6}$  Ом·м и  $\mu = 1$ . Тогда

$$\Delta_K \approx 0,5/\sqrt{f}. \quad (8)$$

Глубину проникновения тока в этом случае называют горячей глубиной проникновения тока.

При нагреве сталь теряет свои магнитные свойства, прогреваясь постепенно, от слоя к слою, от поверхности вглубь. Металл становится как бы двухслойным. При качественном рассмотрении можно считать, что распределение плотности тока изображается ломаной линией, состоящей из отрезков двух экспонент, первая из которых соответствует слою стали, нагретого выше точки магнитных превращений, а вторая – слою, ещё обладающего магнитными свойствами (рисунок 4).

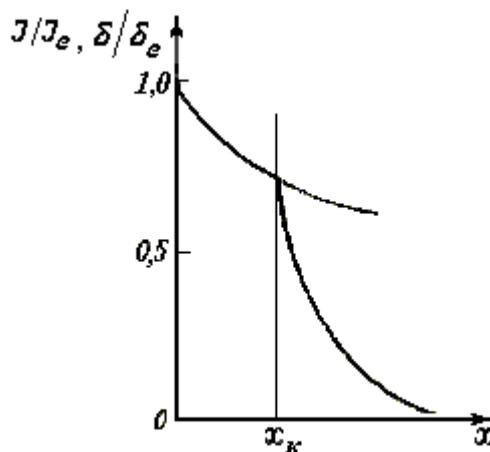


Рисунок 4 – Распределение тока в стальной заготовке, нагретой выше точки превращений на глубину  $x_k$

Излом кривой ярко выражен, если глубина прогретого слоя  $x_k$  меньше горячей глубины проникновения тока  $\Delta_k$ . В этом случае выделение энергии в слое  $x_k$  наиболее равномерно, вследствие чего нагрев происходит быстро, без большого перепада температуры в нагреваемом слое и с малыми тепловыми потерями на нагрев сердцевины.

В таблице 1 приведены значения холодной и горячей глубины проникновения тока в медь и сталь 45 при стандартных частотах тока, применяющихся в нашей стране для индукционного нагрева.

На рисунке 5 представлено распределение температуры при нагреве под поверхностную закалку на глубину  $x_k$ .

Таблица 1- Глубина проникновения тока ( $m \cdot 10^{-2}$ ) в углеродистую сталь и медь при различных частотах /1/

Частота тока, Гц	Сталь 45		Медь при 20 °С
	При 20 °С	При 800 °С	
50	0,5	1,0	1,0
500	0,15	0,3	0,3
1000	0,11	0,2	0,2
2500	0,067	0,13	0,13
4000	0,056	0,11	0,11

8000	0,039	0,08	0,08
$10^4$	0,034	0,07	0,07
$10^5$	0,011	0,022	0,022
$10^6$	0,0034	0,07	0,07

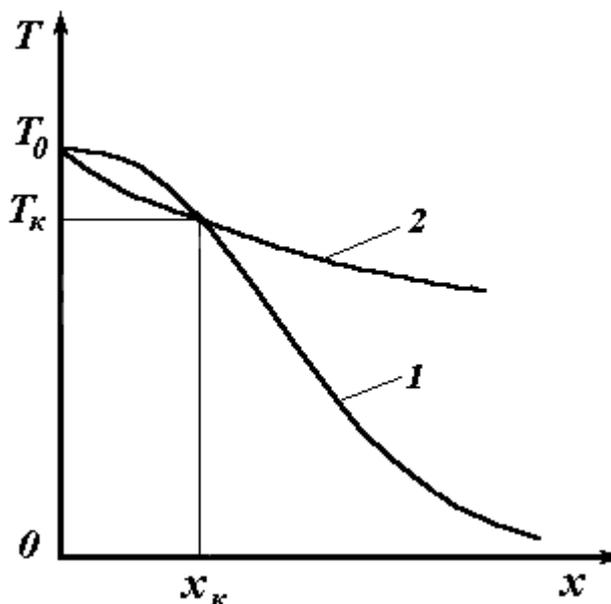


Рисунок 5 – Распределение температуры по сечению при индукционном нагреве

Кривая 1 соответствует режиму  $x_K > \Delta_K$ , называемому глубинным, т. к. теплота выделяется по всей глубине слоя  $x_K$ . Кривая 2 соответствует случаю  $x_K < \Delta_K$ . Здесь основную роль играет теплопроводность, так же, как и при нагреве внешними источниками тепла, например, в соляной ванне или печи сопротивления. Он характеризуется большими потерями на утечку тепла в глубь нагреваемого объекта, чем глубинный.

При рассмотрении индукционного нагрева стали до температуры, превышающей точку магнитных превращений, вводят понятия о стадиях нагрева, характеризующих режим работы системы. Выделяют три основные стадии нагрева.

1. Начало нагрева – холодный режим. Удельное сопротивление постоянно по всему сечению и равно исходному. Магнитная проницаемость в любой точке сечения определяется кривой намагничивания. Магнитная проницаемость возрастает от поверхности, где сталь находится в состоянии сильного магнитного насыщения, вглубь.

2. Промежуточный режим. Температура поверхности нагреваемого объекта выше исходной, но ниже точки магнитных превращений. Эта стадия нагрева отличается от первой зависимостью удельного электрического сопротивления от координаты, т.к. функцией координаты является температура, убывающая от поверхности в глубь объекта.

3. Горячий режим. Начало горячего режима соответствует образованию у поверхности слоя глубиной  $x_K$ , нагретого выше точки магнитных превращений, в то время как остальная часть сечения, имеющая более низкую температуру, постепенно спадающую по мере удаления от поверхности, остается ферромагнитной. Переменными являются  $\rho$  и  $\mu$ , причем  $\mu$  изменяется почти скачком на границе слоя  $x_K$ . Расчетной моделью этой стадии нагрева является двухслойная среда, в которой на границе слоев магнитная проницаемость меняется скачком от  $\mu = 1$  до некоторого значения  $\mu > 1$ .

В предельном случае горячего режима все сечение прогрето и  $\rho$  и  $\mu$  можно считать постоянными ( $\rho = \rho_K$  и  $\mu = 1$ ).

## **2 Расчет индукторов**

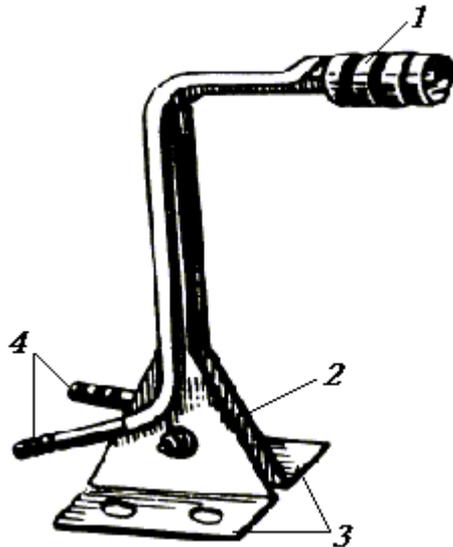
### **2.1 Типы индукторов**

Передача энергии от источника питания в нагреваемое изделие при индукционном нагреве производится при помощи специального устройства – индуктора.

Индукторы изготавливают обычно из медных трубок. Во время работы индуктор охлаждается проточной водой. Форма и размеры индуктора зависят от условий нагрева, величины и конфигурации нагреваемой поверхности, а также от мощности и частоты источника питания.

Индукторы в зависимости от того, какую поверхность имеет нагреваемая деталь, разделяются на четыре вида: для нагрева внешних цилиндрических поверхностей, для нагрева внутренних цилиндрических поверхностей (рисунок 6), для нагрева плоских (рисунок 7) и сложных по форме поверхностей (рисунки 8,9).

Основные части любого индуктора (рисунок 6) – индуктирующий провод 1, токопроводящие шины 2, контактные колодки для соединения индуктора с понижающим трансформатором 3 и устройством для подачи воды 4. Во многих конструкциях имеется также устройство для охлаждения изделий при закалке.



1 – индуктирующий провод; 2 – токоведущие шины; 3 – колодки для присоединения к трансформатору; 4 – трубки для подачи воды

Рисунок 6 - Многовитковый индуктор для закалки внутренней поверхности, используемый преимущественно на радиочастоте

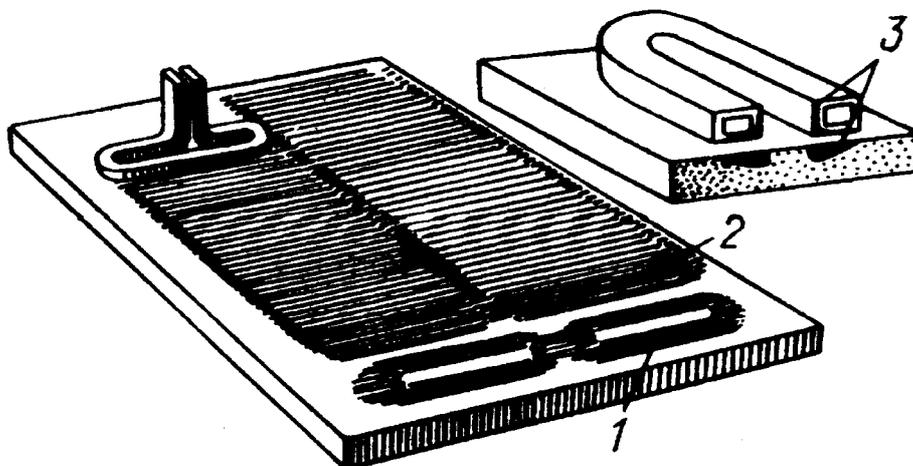
На работу индуктора влияет ширина индуктирующего провода, а также величина зазора между внутренней рабочей поверхностью индуктора и поверхностью нагреваемой детали. Ширина индуктирующего провода при одновременном способе нагрева определяется требуемой шириной нагреваемого слоя. При непрерывно-последовательном способе нагрева деталей ширина индуктирующего провода определяется мощностью генератора или заданной производительностью.

Одновитковый индуктор для нагрева поверхности непрерывно-последовательным способом показан на рисунке 7. В этом индукторе ток в результате совместного действия эффекта близости и кольцевого эффекта протекает по стороне, обращенной к нагреваемой поверхности, и частично по внутренней боковой.

Для закалки зубчатых колес, т.е. для закалки боковых поверхностей и впадин, применяют специальные индукторы. Индуктор в зависимости от мощности и производительности может быть выполнен для закалки одной или нескольких впадин сразу. Закалка производится непрерывно-последовательным способом при движении индуктора вдоль образующей шестерни (рисунки 8).

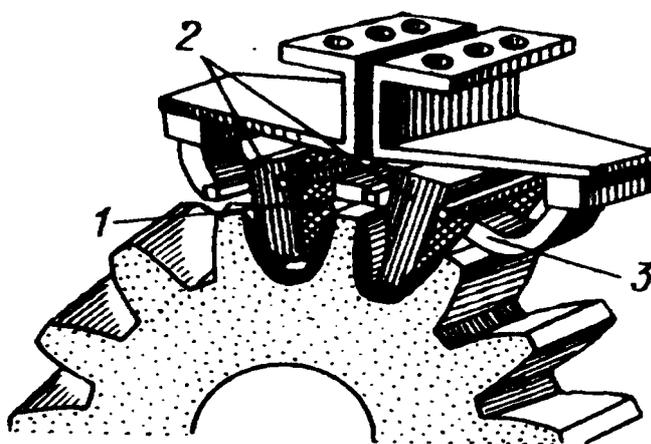
Нагрев с более высоким к.п.д. можно осуществить по схеме показанной на рисунке 9. В закаливаемой впадине помещены один над другим, два индуктирующих провода, токи в которых равны и направлены одинаково. Обратные провода распределены симметрично по четырем впадинам, причем две впадины, соседние с нагреваемой, пропускаются. Индуктированный в нагреваемой впадине ток вследствие эффекта близости замыкается главным образом через впадины, в которые помещены обратные провода. Благодаря

этому нагрев соседних впадин в 12 –16 раз слабее, чем закаливаемой. В соседних с нагреваемой впадиной помещены душевые устройства, охлаждающие противоположные поверхности зубьев, с тем, чтобы избежать их отпуска.



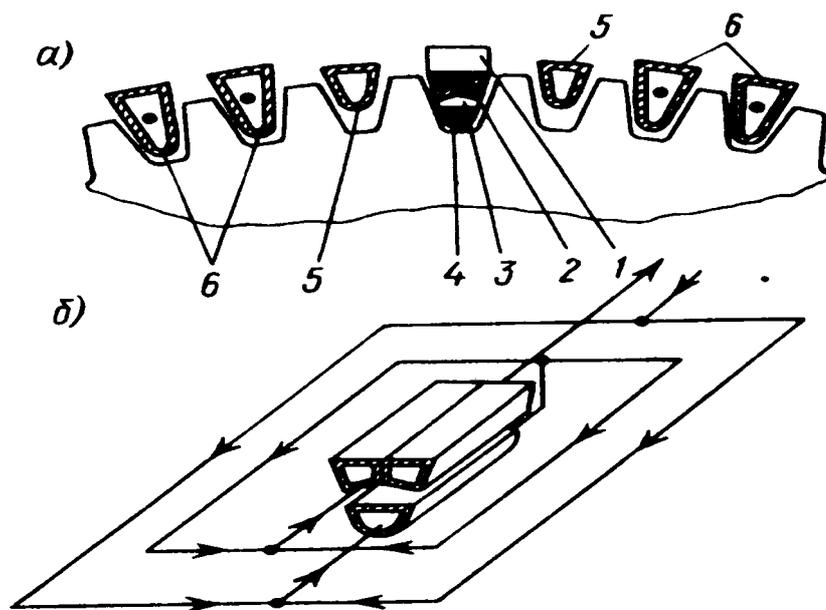
1 – цвета побежалости соответствуют пути прохождения индуктированного тока; 2 – поверхность, закаленная при движении индуктора; 3 – распределение тока в сечениях индуктора и детали

Рисунок 7 – Одновитковый петлевой индуктор для нагрева плоской поверхности непрерывно-последовательным способом



1 – водоохлаждаемые экраны, предохраняющие боковые поверхности зубьев от перегрева; 2 – магнитопровод; 3 – индуктирующий провод

Рисунок 8 - Индуктор для закалки крупномодульных зубчатых колес



а – расположение проводов; б – схема соединения индуктора;

1 – магнитопровод; 2 – виток индуктирующего провода; 3 – промежуточный магнитопровод; 4 – виток индуктирующего провода; 5 – дополнительные душевые устройства для охлаждения ранее закаленных поверхностей зуба; 6 – обратные провода индуктора.

Рисунок 9 - Индуктор для нагрева впадин шестерен среднего модуля одновременным способом

## 2.2 Расчет индукторов

Выбор и расчет индуктора состоит из следующих этапов:

- 1) по детали выбирается конфигурация индуктора. Выбор ведется для упрощенного одновиткового индуктора количество витков, применение магнитопроводов определяется в последующих расчетах;
- 2) выбор частоты, глубины и ширины закаленного слоя;
- 3) теплового расчета в результате которого определяются мощность и время, требуемое для нагрева детали на заданную глубину при заданной температуре поверхности;
- 4) электротехнического расчета, который позволяет выбрать основные параметры индуктора, окончательную его конфигурацию и его охлаждение.

## 2.2.1 Определение ширины и глубины закаленного слоя. Выбор частоты

Ширина закаленного слоя  $h'_2$  детали, подлежащей закалке (рисунок 10), 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  $h_1 = h_2$ , поскольку в этом случае теплоотвод в толщу детали невелик.

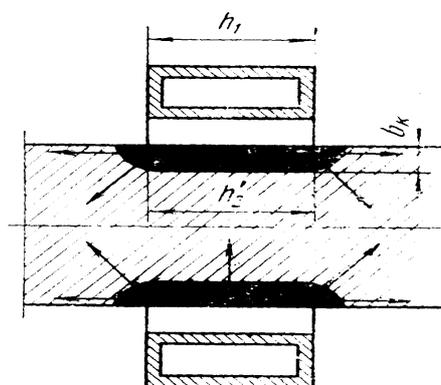


Рисунок 10 - Система индуктор – деталь установки одновременного нагрева

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:

$$b_k = (0,05 - 0,10)D_2. \quad (10)$$

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

$$b_k < \Delta_k, \quad (11)$$

где  $\Delta_k$  — горячая глубина проникновения тока.

Подставив в уравнение выражение для  $\Delta_k$ , перепишем его в виде:

$$F < 1/4 b_k^2. \quad (12)$$

Полученное выражение определяет верхний предел частоты. Следует обратить внимание на то, 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,  $Вт/м^2$ :

$$P_{э.и} < 4 \cdot 10^6 \quad (13)$$

В этом случае

$$f > 1/70 b_k^2. \quad (14)$$

Таким образом, область допустимых частот при поверхностной закалке:

$$\frac{1}{70 b_k^2} < f < \frac{1}{4 b_k^2}. \quad (15)$$

Для уточнения выбора  $f$  в этом диапазоне частот рекомендуется пользоваться выражением

$$f_{opt} \approx \frac{1}{(15 - 20) b_k^2}, \quad (16)$$

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, при  $b_k < 2$  используются ламповые преобразователи.

Высокочастотные установки, выпускаемые промышленностью, имеют фиксированную частоту преобразователя.

Стандартный ряд частот:

Машинные и тиристорные преобразователи: 1; 2,4; 4; 8  $кГц$ .

Ламповые преобразователи: 0,025; 0,066; 0,250; 0,440; 5,280  $МГц$ .

Выбирается ближайшая стандартная частота, заново пересчитывается  $\Delta_k$  и дальнейший расчет ведется по этому значению.

### 2.2.2 Определение времени нагрева и средней мощности, подведенной к заготовке

Время нагрева заготовки определяется заданным перепадом температуры  $\Delta T$  между ее поверхностью и серединой сечения. Это время зависит от частоты тока, размеров и формы сечения, свойств материала, абсолютного значения температуры поверхности, а также от особенности режима нагрева.

Ниже приведены полуэмпирические соотношения для определения времени нагрева цилиндрических и прямоугольных стальных заготовок, нагреваемых до температуры 1200 – 1300 °С при  $\Delta T = 100 - 150$  °С для обычного способа нагрева с постоянным шагом витков индуктора, а также для ускоренного при  $\Delta T = 100$  °С. Первый режим для краткости мы и дальнейшем будем именовать обычным.

Во всех упомянутых случаях время нагрева может быть выражено формулой:

$$t_k = KD_2'^2, \quad (17)$$

где  $K$  – коэффициент, значения которого приведены в таблице 2;

$D_2'$  – приведенный диаметр для цилиндрической и наименьший размер сечения для прямоугольной заготовок.

$$D_2' = D_2 - \xi, \quad (18)$$

где  $\xi$  – глубина слоя, в котором выделяется главная часть энергии индуктированного тока;

$D_2$  – наименьший размер поперечного сечения заготовки.

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \Delta_k \text{ при } \frac{D_2}{\Delta_k} \geq 5, \\ \xi &= 0,2D_2 \text{ при } \frac{D_2}{\Delta_k} < 5 \text{ - для цилиндра,} \\ \xi &= 0,22D_2 \text{ при } \frac{D_2}{\Delta_k} < 5 \text{ - для широкой пластины.} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Таблица 2 – Значения коэффициента  $K$

Деталь	$\Delta T$	$K$ при нагреве	
		обычном	ускоренном
Цилиндр	100	6	2,5
	150	3,7	
Пластина	100	11,7	5,3
	150	6,9	

Для квадратной заготовки вместо  $D_2$  подставляется эквивалентный диаметр

$$D_{2э} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} D_2. \quad (20)$$

Значения коэффициента  $K$  для пластин действительны для  $b_2/D_2 \geq 5$ . С уменьшением отношения  $b_2/D_2$  до единицы он почти линейно приближается к значению  $K$  для цилиндра.

Глубина проникновения тока  $\Delta_K$  определяется по усредненным значениям удельного сопротивления.

При нагреве до температуры на поверхности  $T_0 = 1200 - 1300$  °С среднее значение удельного сопротивления в интервале температур от 750 до 1250 °С принимается равным  $1,24 \cdot 10^{-2}$  Ом · м.

Тогда

$$\Delta_K = \frac{0,56}{\sqrt{f}} \text{ м.} \quad (21)$$

Средняя полезная мощность  $P_T$ , кВт вычисляется по теплосодержанию заготовки и известному времени нагрева

$$P_T = 840 \frac{G}{t_K}, \quad (22)$$

где  $G$  – масса заготовки, кг.

### 2.2.3 Электрический расчет индуктора. Расчет охлаждения

Расчет будет вестись на примере индуктора периодического действия для нагрева мерных заготовок.

Мощность, подводимая к заготовке, а следовательно, и к индуктору, в течение цикла нагрева меняется вследствие изменения удельного сопротивления и магнитной проницаемости заготовки. На основании анализа расчетных и экспериментальных данных можно считать, что мощность  $P_{2z}$  в конце нагрева стальной заготовки до температуры 1200 – 1300 °С при условии приблизительно постоянного напряжения на индукторе связана со средней мощностью  $P_{2cp}$  соотношением

$$P_{2z} \approx 0,72 P_{2cp}, \quad (23)$$

где

$$P_{2cp} \approx 1,05 \cdot (P_T + \Delta P_T), \quad (24)$$

где  $\Delta P_T$  - тепловые потери в окружающую среду.

Коэффициент 1,05 учитывает потери в направляющих. Зная мощность  $P_{2z}$ , можно для определения требуемого числа витков индуктора для конца нагрева (так называемый горячий режим), когда заготовка парамагнитна ( $\mu_{отн} = 1$ ).

Ниже приведен расчет типичного случая нагрева цилиндрической заготовки в индукторе периодического действия. Попутно приводятся соответствующие формулы применительно к заготовкам прямоугольного сечения.

*Пример расчета.*

Задано: частота  $f = 2500$  Гц,  $D_2 = 75$  мм,  $a_2 = 830$  мм,  $U_u = 750$  В,  
 $T_0 = 1250 - 1300$  °С,  $\Delta T = 100$  К.

Требуется определить число витков индуктора  $\omega$ , мощность  $P_u$ , подводимую к индуктору, и его основные размеры  $D_1$  и  $a_1$ .

Вначале расчет ведется для условного одновиткового индуктора. Число витков определяется в конце расчета.

1 Время нагрева  $t_k$ , с:

по формуле (21) определяем глубину проникновения тока:

$$\Delta_K = \frac{0,56}{\sqrt{f}} = \frac{0,56}{\sqrt{2500}} = 1,12 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad (25)$$

Так как отношение  $\frac{D_2}{\Delta_k} = 6,7 > 5$ , то из выражений (19) следует, что

$$\xi = \Delta_K.$$

По формуле (18) находим размер сечения заготовки:

$$D_2' = D_2 - \xi = 75 - 11,2 = 63,8 \text{ мм}. \quad (26)$$

Подставляя найденные значения в выражение (17) найдем время нагрева время нагрева:

$$t_k = KD_2'^2 = 6 \cdot 6,38^2 = 244 \text{ с}.$$

Значения  $K$  смотреть в таблице 2.

2 Средняя полезная мощность:

$$P_T = 840 \frac{G}{t_K} = 840 \frac{28,4}{244} = 97,8 \text{ кВт};$$

$$G = \frac{\rho D_2^2}{4} a_2 \gamma 10^{-6} = \frac{\rho 75^2}{4} \cdot 830 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 28,4 \text{ кг},$$

где  $a_2$  – длина заготовки, мм;

$\gamma$  – плотность заготовки, кг/м<sup>3</sup>.

3 Внутренний диаметр индуктора и толщина тепловой изоляции.

Опыт и расчет показывают, что максимальный полный к.п.д.  $\eta_u$  для цилиндрических индукторов и индукторов с квадратным поперечным сечением достигается при соблюдении соотношения

$$\frac{D_1}{D_2} = 1,3 \dots 2, \quad (27)$$

где  $D_1$  – внутренний диаметр индуктора.

Применительно к индукторам для нагрева заготовок с прямоугольным поперечным сечением верхний предел в формуле (27) может быть увеличен до 3. В этом случае  $D_2$  – наименьший размер поперечного сечения заготовки.

На основании соотношения (27) принимаем

$$D_1 = 1,6 \cdot D_2 = 1,6 \cdot 75 = 120 \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр тепловой изоляции  $D_3$  выбирается из следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} D_3 &= (1,1 \dots 1,2) D_2 \\ D_3 - D_2 &\geq 1 \text{ см} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Откуда  $D_3 = 85 \text{ мм.}$

Для прямоугольной заготовки

$$D_1 = (1,3 \dots 3) D_2. \quad (29)$$

4 Длина индуктора:

Равномерный нагрев заготовок по всей длине обеспечивается, если длина индуктора удовлетворяет соотношению

$$a_1 = a_2 + (1 \dots 2) D_1 \quad (30)$$

откуда  $a_1 = 830 + 1,4 \cdot 120 = 1000 \text{ мм.}$

5 Находим тепловые потери:

Мощность тепловых потерь для цилиндрических индукторов с шамотной изоляцией может быть подсчитана по формуле

$$\Delta P_T = 3,74 \cdot 10^{-3} \frac{a_1}{\lg \frac{D_1}{D_3}} \text{ кВт}, \quad (31)$$

где  $a_1$  – длина индуктора, мм;

$D_3$  – внутренний диаметр тепловой изоляции, мм.

Для индукторов с квадратным и прямоугольным поперечным сечением:

$$\Delta P_T = 1,33 \cdot 10^{-3} \frac{a_1 F_{uz}}{d_{uz}} \text{ кВт}, \quad (32)$$

где  $F_{uz}$  – средний периметр теплоизоляции в поперечном сечении, мм;

$d_{uz}$  – толщина теплоизоляции, мм.

Для цилиндрического индуктора:

$$\Delta P_T = 3,74 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{0,15} \approx 25 \text{ кВт.}$$

Для заготовок с прямоугольным и квадратным сечением:

$$DP_T = 1,33 \cdot 10^{-2} \frac{a_1 F_{uz}}{d_{uz}} \text{ кВт.}$$

6 Определяем среднюю мощность в заготовках по формуле (24):

$$P_{2cp} \approx 1,05 \cdot (97,8 + 25) = 129 \text{ кВт.}$$

7 Мощность в конце нагрева определяется по формуле (23):

$$P_{2e} = 0,72 \cdot 129 = 93 \text{ кВт.}$$

8 Активное  $r_2$ , Ом, и внутреннее реактивное  $x_{2m}$ , Ом, сопротивления заготовки определяются по формулам:

$$r_2 = \pi \rho_2 \frac{m_2^2}{a_2} A, \quad (33)$$

$$x_{2m} = \pi \rho_2 \frac{m_2^2}{a_2} B, \quad (34)$$

где  $m_2$  находится по формуле

$$m_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2\Delta_k}}; \quad (35)$$

$A = f(m_2)$  и  $B = f(m_2)$  – находят по таблице 3 в зависимости от значения  $m_2$ .

$$m_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2\Delta_k}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2 \cdot 1,12 \cdot 10^{-2}}} = 4,73$$

$A = f(m_2) = 0,25$ ;  $B = f(m_2) = 0,3$  (таблица 3).

При  $m_2 > 6$   $A \approx B \approx \sqrt{2}/m_2$ .

Таблица 3 – Значения расчетных коэффициентов А и В

$m_2$	A	B	$m_2$	A	B	$m_2$	A	B
0,0	0,0	1,0	3,0	0,36	0,5	10	0,13	0,14
0,5	0,03	0,99	3,5	0,33	0,41	15	0,09	0,09
1,0	0,12	0,98	4,0	0,29	0,36	20	0,071	0,071
1,5	0,25	0,91	5,0	0,24	0,28	25	0,057	0,057
2,0	0,34	0,77	6,0	0,21	0,24	30	0,047	0,047
2,5	0,38	0,62	8,0	0,16	0,18	40	0,035	0,035

$$r_2 = p \cdot 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4,73^2}{830} \cdot 0,25 = 2,63 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_{2M} = p \cdot 1,24 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4,73^2}{830} \cdot 0,3 = 3,15 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

При расчете сопротивлений полых цилиндров с толщиной стенки  $d_2 > 1,5\Delta_2$  можно с ошибкой, не превышающей 10 % для  $r_2$  и менее 2 % для  $x_{2M}$ , пользоваться данными таблицы 3.

При расчете  $r_2$  и  $x_{2M}$  заготовок с прямоугольной формой сечения следует пользоваться следующими соотношениями:

$$r_2 = \frac{2(D_2 + b_2)}{a_2} \cdot \frac{\rho_2}{\Delta_2} G, \quad (36)$$

$$x_{2M} = \frac{2(D_2 + b_2)}{a_2} \cdot \frac{\rho_2}{\Delta_2} Q, \quad (37)$$

где  $b$  – ширина заготовки;

$G$  и  $Q$  – функции соотношений  $D_2/\Delta_2$  и  $b_2/D_2$ , их значения приведены на рисунках 11 и 12.

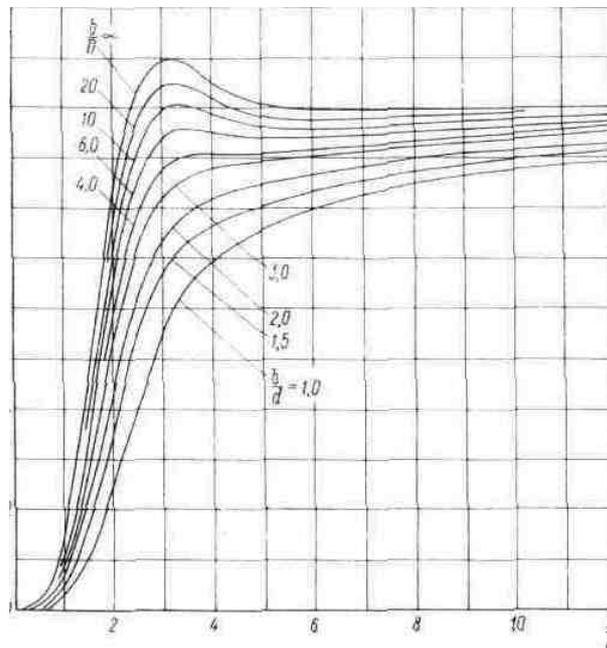


Рисунок 11 – График функции  $G$  для вычисления активного  $r_2$  сопротивления заготовки с прямоугольным поперечным сечением

9 Реактивность рассеивания индуктора:

$$x_S = 7,9 \cdot 10^{-9} \frac{fS_h}{a_2}, \quad (38)$$

где  $S_h$  – площадь зазора между заготовкой и индуктирующим проводом,  $мм^2$ .

$$x_S = 7,9 \cdot 10^{-9} \frac{2500 \pi (120^2 - 75^2)}{4 \cdot 830} = 16,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

10 Коэффициент приведения активного сопротивления заготовки:

$$C = \frac{I}{(r_2/x_e)^2 + [1 + (x_{m2} + x_S)/x_e]^2}, \quad (39)$$

где  $x_e = \frac{ka_1 x_{10}}{a_1 - a_2 k}$ ;

$$x_{10} = 7,9 \cdot 10^{-9} \frac{fS_1}{a_1} \text{ Ом,}$$

где  $S_1$  – площадь поперечного сечения индуктора,  $мм^2$ ;

$a_1$  и  $a_2$  – длина индуктора и заготовок,  $мм$ ;

$k = f(D_1/a_1)$  – для цилиндрических заготовок;

$k = f(D_1/b_1 \cdot D_1/a_1)$  – для заготовок прямоугольного и квадратного сечения.

Для цилиндрических заготовок при  $D_1/a_1 < 5$  имеем:

$$k = \frac{2,3}{2,3 + D_1/a_1}; \quad (40)$$

$$x_{10} = 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{2500 \pi 120^2}{4 \cdot 1000} = 22,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом;}$$

$$D_1/a_1 = 0,12; k = 0,951$$

$$x_e = \frac{0,951 \cdot 1000 \cdot 22,4 \cdot 10^{-5}}{1000 - 830 \cdot 0,951} = 101 \cdot 10^{-5} \text{ Ом;}$$

$$C = \frac{1}{(2,63/101)^2 + [1 + (3,15 + 16,4)/101]^2} = 0,705.$$

11 Приведенное активное  $r_2^I$  и реактивное  $x_2^I$  сопротивления заготовки:

$$r_2^I = Cr_2 = 0,705 \cdot 2,63 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_2^I = C \left[ x_S + x_{m2} + \frac{(x_S + x_{m2})^2 + r_2^2}{x_e} \right] = 0,705 \left[ 19,55 + \frac{(19,55^2 + 2,63^2)}{101} \right] \cdot 10^{-5} =$$

$$= 16,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

12 Активное  $r_1$  и внутреннее реактивное  $x_{m2}$  сопротивления индуктирующего провода.

Обычно  $d_1 > \Delta_1$ . Тогда

$$r_1 \approx x_{m1} \approx \frac{\pi D_1 \rho_1}{a_1 g \Delta_1}, \quad (41)$$

где  $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное сопротивление меди;

$\Delta_1$  – глубина проникновения тока в медь;

$g$  – коэффициент заполнения индуктора медью по высоте ( $g = 0,85 - 0,9$ );

$$r_1 \approx x_{m1} \approx \frac{\pi 120 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 0,85 \cdot 0,14 \cdot 10^{-3}} = 6,34 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

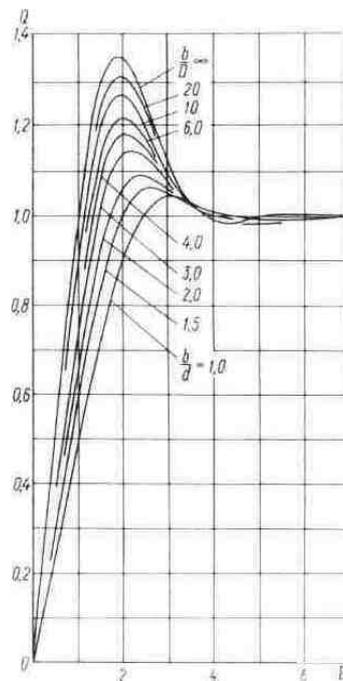


Рисунок 12 – График функции  $Q$  для вычисления внутреннего реактивного  $x_{m2}$  сопротивления заготовки с прямоугольным поперечным сечением

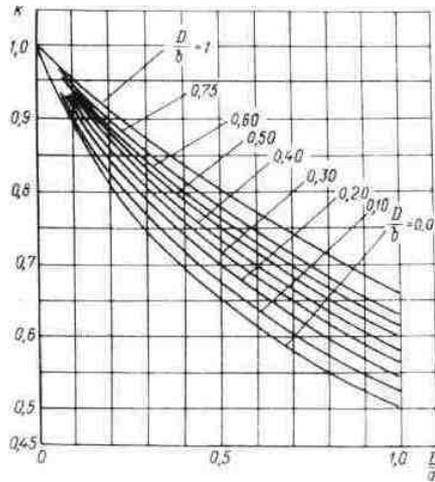


Рисунок 13 – Поправочный коэффициент для вычисления индуктивности прямоугольного соленоида

Применительно к овальным индукторам вместо  $\pi D_1$  в формулу (41) подставляется внутренний периметр витка индуктора, равный  $2(D_1 + b_1)$ .

13 Эквивалентные активные  $r_u$ , реактивное  $x_u$  и полное  $z_u$  сопротивления индуктора:

$$r_u = r_1 + r_2^1 = (0,63 + 1,85)10^{-5} = 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$x_u = x_{M1} + x_2^1 = (0,63 + 16,5)10^{-5} = 17,13 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$z_u = \sqrt{x_u^2 + r_u^2} = \sqrt{17,13^2 + 2,48^2} \cdot 10^{-5} = 17,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

14 Электрический КПД индуктора:

$$\eta_u = P_{2z} / P_{uz} = r_2^1 / r_u = 1,85 / 2,48 = 0,746.$$

15 Мощность, подводимая к индуктору в конце нагрева:

$$P_{uz} = P_{2z} / \eta_u = 93 / 0,746 = 125 \text{ кВт}.$$

16 Коэффициент мощности индуктора в конце нагрева:

$$\cos \varphi_{uz} = r_u / z_u = 2,48 / 17,3 = 0,143.$$

Если учесть, что в холодном и промежуточных режимах  $r_2$  больше, чем в горячем, и использовать формулу для среднего за время нагрева значения  $r_2$ , то получим среднее за это время значение электрического КПД индуктора  $\eta_u = 0,824$ . Коэффициент мощности, определяющий реактивную мощность конденсаторной батареи, вычисляется только по горячему режиму, где он имеет наименьшее значение.

17 Ток в одновитковом индукторе:

$$I_u^1 = \sqrt{P_{2z} 10^3 / r_2^1} = \sqrt{93 \cdot 10^3 / (1,85 \cdot 10^{-5})} = 7,09 \cdot 10^4 \text{ A.}$$

18 Напряжения на одновитковом индукторе:

$$U_u^1 = I_u^1 z_u = 7,09 \cdot 10^4 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} = 12,25 \text{ B.}$$

19 Число витков индуктора:

$$\omega = U_u / U_u^1 = 750 / 12,25 \approx 61.$$

20 Плотность тока в индукторе:

$$I_{II} = I_u^1 \cdot 10^{-4} / (a_1 \Delta_1 g) = 7,09 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4} / (1000 \cdot 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot 0,85) \approx 64 \text{ A/мм}^2,$$

что допустимо ( $I < 150 \text{ A/мм}^2$ ).

21 Размер трубки индуктирующего провода:

$$b = a_1 g / (\omega + I) = 1000 \cdot 0,85 / 62 \approx 12 \text{ мм.}$$

Выбираем трубку размером (12×10) / (8×6) мм.

22 Полные потери в индукторе.

Полные потери в индукторе, вызывающие его нагрев, складываются из потерь  $\Delta P_u = I_u^2 r_1 = P_u - P_2$  и тепловых потерь  $\Delta P_m$  через тепловую изоляцию, воспринимаемых индуктирующим проводом:

$$\begin{aligned} \Delta P_u &= P_u - P_2 = 125 - 93 = 32 \text{ кВт}; \\ \Delta P &= \Delta P_u + \Delta P_m = 32 + 25 = 57 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

23 Расход охлаждающей воды.

Считая допустимой разность температур воды, входящей в индуктор и выходящей из него,  $\Delta T_B = 30 \text{ K}$ , имеем

$$W = 0,24 \Delta P 10^{-3} / \Delta T_B = 0,24 \cdot 57 \cdot 10^{-3} / 30 = 0,456 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

24 Скорость воды:

$$v = W/s = 0,456 \cdot 10^{-3} / (0,008 \cdot 0,006) = 9,5 \text{ м/с},$$

где  $s$  – площадь отверстия трубки,  $\text{м}^2$ .

25 Проверка на турбулентность.

Гидравлический диаметр:

$$D_0 = 4s/F = 4 \cdot 0,48 \cdot 10^{-4} / [2(0,8 + 0,6) 10^{-2}] = 0,685 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

где  $F$  – охлаждаемый периметр трубки, м.

Критерий Рейнольдса:

$$R_E = vD_0 / (0,66 \cdot 10^{-6}) = 9,5 \cdot 0,685 \cdot 10^{-2} / (0,66 \cdot 10^{-6}) \approx 10^5 > 2300,$$

то есть движение турбулентное, так как  $R_E > 2300$ .

26 Перепад давления в трубке индуктора.

Коэффициент сопротивления при шероховатости 2-го рода:

$$\lambda_l = 10^{-2} (5/D_0)^{0,314} = 10^{-2} (5 \cdot 10^2 / 0,685)^{0,314} = 0,0795.$$

Длина трубки индуктора:

$$l_u = \pi D_l \omega = \pi 12 \cdot 10^{-2} \cdot 61 = 23 \text{ м};$$

$$\Delta p = 4,9 \cdot 10^2 \lambda_l v^2 l_u / D_0 = 4,9 \cdot 10^2 \cdot 0,0795 \cdot 9,5^2 \cdot 23 / (0,685 \cdot 10^{-2}) = 118 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Величина  $\Delta p \approx 120 \text{ Па}$ , что недопустимо много. Если индуктор питается от городского водопровода, то перепад давления должен быть менее  $1,96 \cdot 10^5 \text{ Па}$  ( $2 \text{ кгс/см}^2$ ). Для этого охлаждение индуктора нужно разделить на четыре ветви. Тогда перепад давления будет:

$\Delta p_n = \Delta p / n^3 = 118 \cdot 10^5 / 64 = 1,84 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , что допустимо. А приведенной формуле  $n$  – число ветвей охлаждения.

### 3 Футеровка индукторов. Требования, предъявляемые к футеровке

Футеровка - важный и ответственный элемент индуктора, влияющий на его работоспособность и технико-экономические показатели. Футеровка снижает тепловые потери с поверхности нагреваемых заготовок и предохраняет электрическую изоляцию индуктора от обгорания и разрушения.

В зависимости от рабочей температуры индуктора или, иначе, в зависимости от рода нагреваемого металла футеровка может быть однослойной и многослойной. Так, при рабочей температуре до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , как это имеет место при нагреве под штамповку алюминиевых и магниевых сплавов, в качестве футеровки могут служить асбоцементные трубы или листовой асбест, свернутый в трубу и пропитанный жидким стеклом. В этом случае обычно футеровка состоит из одного слоя. Иногда между спиралью индуктора и слоем асбеста помещают второй слой в виде тонколистового стекломиканита. При нагреве медных и титановых сплавов до температур  $800 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , а также сталей и сплавов до  $1100 - 1250 \text{ }^\circ\text{C}$  к футеровке и к ее материалам предъявляют

более серьезные требования. В этом случае футеровка в зависимости от ее материала может быть также одно-, двух- и трехслойной. При нагреве металлов до температур свыше 1000 °С футеровка должна включать основную часть - огнеупорную и кроме нее - теплоизоляционную. В качестве огнеупорного элемента футеровки обычно применяют шамот или жароупорный бетон, а в качестве теплоизоляционного - асбест, миканит, стекломиканит и т. п.

К футеровке в целом и к ее составляющим при нагреве сталей предъявляют различные требования, в том числе взаимно противоположные.

При нагреве металлов выше 800°С вплоть до температур 1200 - 1300°С футеровка индуктора должна удовлетворять следующим требованиям: возможно меньшая толщина; низкая теплопроводность; достаточная механическая прочность; высокая огнеупорность; хорошая стойкость против растрескивания при резких изменениях температуры; возможно меньшая электропроводность; низкая гигроскопичность; высокая шлакоустойчивость.

С учетом расширения диапазона диаметров заготовок, нагреваемых в данном индукторе, выгоднее уменьшать толщину футеровки, так как при этом увеличивается рабочий диаметр окна индуктора. Однако с уменьшением толщины футеровки при прочих равных условиях возрастают тепловые потери через нее, что снижает термический КПД индуктора.

Таким образом, взаимодействие указанных противоположных факторов, а также учет других факторов заставляют на основе анализа теплообмена в системе индуктор - заготовка выбирать оптимальную толщину футеровки. Здесь главная роль принадлежит основному огнеупорному элементу футеровки, определяющему ее работоспособность.

Футеровка должна обладать возможно меньшей теплопроводностью, чтобы снизить тепловые потери с поверхности заготовки. Если футеровка состоит из нескольких слоев, то теплопроводность всей футеровки в целом характеризуется так называемым эквивалентным коэффициентом теплопроводности /6/.

$$\lambda_{\text{э}} = \ln \frac{d_{i+1}}{d_1} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_1}, \quad (42)$$

где  $\lambda_{\text{э}}$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности футеровки,  $Bm/(m \cdot ^\circ C)$ ;

$d_i$  - диаметр слоя,  $m$ ;

$\lambda_i$  - средний коэффициент теплопроводности слоя при данной температуре,  $Bm/(m \cdot ^\circ C)$ .

В таблице 4 приведены значения теплофизических свойств некоторых основных материалов, применяемых для футеровки индукторов.

Широко применяемые в печном хозяйстве огнеупорные материалы обладают сравнительно высоким коэффициентом теплопроводности, значение которого при температурах выше 1000 °С достигает 1,5  $Bm/(m \cdot ^\circ C)$  и бо-

лее. Снижение коэффициента теплопроводности огнеупора достигается повышением его пористости. Однако повышение пористости обычных огнеупорных материалов приводит к резкому снижению их механической прочности.

В связи с этим желательно создание специальных пористых шлаков, которые могут удовлетворять требованиям, предъявляемым к материалу по огнеупорности и теплопроводности.

Для наиболее часто применяемых материалов футеровки, таких как шамот, максимально допустимая рабочая температура зависит от класса шамота. Например, для шамота класса "А" максимальная рабочая температура составляет 1300 - 1400 °С, для класса "Б" - 1250 - 1300 °С, для класса "В" - 1200 - 1250 °С. Максимальная рабочая температура жароупорных бетонов достигает 1780 °С.

Таким образом, с точки зрения огнеупорности и шамот, и тем более жароупорный бетон являются достаточно приемлемыми материалами для огнеупорной части футеровки.

Таблица 4 - Теплофизические свойства некоторых материалов, применяемых для футеровки индукторов /3/

Материал	Плотность $\rho$ , $г/см^3$	Расчетная формула коэффициента теплопроводности при температуре $\lambda$ , $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^5$ , Ом·м, при температуре, °С	
			800	1200

Шамот	1,8 - 2,1	$0,835 + 0,58 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	7-15	1,0-1,5
Динас	1,8 - 2,1	$0,93 + 0,7 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	200	9-14
Карборунд	1,0	$20,9 - 10,44 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	800	40
Асбестовый картон	1,0 - 1,2	$0,157 + 1,39 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	-	-
Бетон с заполнителем (глинозем, глина)	1,8 - 1,9	$0,427 + 1,28 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	-	-
Слюда	2,6 - 3,2	0,46 - 0,58	20-50	-

Примечание:  $t_{cp}$  – средняя температура в сечении изделия

Материал основного элемента футеровки должен при прочих требованиях к нему обладать, возможно, меньшей усадкой. Размеры жаростойких бетонов при твердении и сушке изменяются незначительно (1 – 2 %), и поэтому такие бетоны при одинаковой с шамотом термостойкости более долговечны. Промышленная эксплуатация индукторов с втулками из жаростойкого бетона показывает, что они выдерживают без разрушения двух-, трех месячную эксплуатацию при температурах на их поверхности 1150 – 1170 °С и частых теплосменах. Шамотные втулки выходят из строя из-за растрескивания через 20 - 30 дней /5/.

Материалы футеровки должны быть хорошими диэлектриками для того, чтобы в них не наводились токи, не возникали лишние электрические потери и не происходило замыкания витков спирали индуктора. Соблюдение этого требования особенно важно при использовании спирали без специальной изоляционной обмотки.

Высокая гигроскопичность материалов футеровки исключительно вредна, так как может способствовать замыканию витков спирали индуктора, особенно в местах повреждений ее изоляции или в случаях применения неизолированной спирали, и, кроме того, вызывать дополнительные внутренние напряжения в футеровке при резком ее высыхании за счет парообразования в порах. Отпотевание спирали индуктора практически неизбежно при работе в зимнее время, когда в неработающий индуктор впускается холодная вода. Часто растрескиванию основного огнеупорного элемента футеровки способствует слой асбеста, помещаемый поверх него. Асбест, являясь материалом гигроскопичным, впитывает влагу при отпотевании спирали и передает ее огнеупорному элементу. Практика показывает, что иногда можно обходиться без слоя асбеста, обертывая огнеупорные втулки непосредственно листовым стекломиканитом.

Материал основной части футеровки не должен химически реагировать с окалиной, образующейся при нагреве заготовок, так как в противном случае на футеровке образуются наросты, которые препятствуют перемещению заготовок и тем самым создают аварийную ситуацию.

## Список использованных источников

- 1 Слухоцкий А.Е., Ненков В.С., Павлов Н.А., Бамунер А.В. Установки индукционного нагрева / Под ред. Слухоцкого А.Е. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское издание, 1981. - 328 с.
- 2 Слухоцкий А.Е. Индукторы. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 69 с.
- 3 Безручко И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. – 126 с.
- 4 Фомин Н. И., Затуловский Л. М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. - М.: Metallurgia, 1989.- 247 с.
- 5 Сидоренко В. Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении. -Л.: Машиностроение, 1980. - 230 с.
- 6 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. -М.: Энергия, 1977. - 343 с.