

А.Е.СЛУХОДКИЙ, С.Е.РЫСКИН

**ИНДУКТОРЫ
ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО
НАГРЕВА**

Scan by SAMSON
dmitry_samsonov@mail.ru
October 2009



**«ЭНЕРГИЯ»
Ленинградское отделение
1974**

6П2.1.08
С 49
УДК 621.365.5.044.3

2859



Слухоцкий А. Е. и Рыскин С. Е.
С 49 Индукторы для индукционного нагрева. Л., «Энергия»,
1974.

264 с. с ил.

Рек

В книге излагаются физические основы индукционного нагрева и методы расчета индукторов для поверхностного и сквозного нагрева. Расчет индукторов иллюстрирован конкретными примерами. Приводятся также принципы конструирования индукторов и описание наиболее характерных конструкций.

Книга предназначена для работников научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и заводов как изготавливающих, так и эксплуатирующих электротермическое оборудование, а также для студентов высших учебных заведений.

С 30307-152
051(01)-74 182-74

6П2.1.08

Рецензент Я. И. Жижмор

© Издательство «Энергия», 1974

ПРЕДИСЛОВИЕ

Суммарная мощность установок для индукционного нагрева металлов достигает у нас в стране сотен тысяч киловатт и быстро возрастает дальше, так как на многих строящихся предприятиях этот вид нагрева принимается в качестве основного. Мощности отдельных установок в особенности для нагрева проката составляют десятки тысяч киловатт.

Вопросами разработки и проектирования установок для индукционного нагрева занят ряд специализированных научно-исследовательских институтов и предприятий, таких, как Всесоюзный научно-исследовательский институт токов высокой частоты им. В. П. Володина, Всесоюзный научно-исследовательский институт электротермического оборудования, Московский автомобильный завод им. И. А. Лихачева, Горьковский автомобильный завод и многие другие организации.

В этих условиях с особой остротой встает вопрос о надежности проектирования индукционных нагревательных установок и о сокращении их экспериментальных доводок, поскольку современные нагреватели представляют собой сложные и дорогостоящие агрегаты. Прежде всего это касается самого индуктора, определяющего собой размеры и конструктивный облик нагревателя.

Первой попыткой создания систематизированного пособия по расчету и проектированию индукторов была книга авторов «Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей», Машгиз, 1954 г.

За истекшее с тех пор время появилось довольно большое число книг, посвященных индукционному нагреву, но ни одной, в которой бы расчеты индукторов были приведены в достаточно полном виде, отражающем многообразие применения индукционного нагрева.

В настоящей книге шире рассматриваются вопросы теории (по сравнению с упомянутой книгой авторов) приведен расчет индукторов для различных видов сквоз-

ного нагрева, даны новые материалы по выбору частоты и полностью переработан расчет коротких индукторов.

Расчеты по возможности даны в виде, легко доступном для использования инженерно-техническими работниками различных специальностей. Более строгие, но трудоемкие методы расчета можно найти в литературе, на которую ссылаются авторы.

В связи с тем, что в опубликованной за последние десять лет литературе конструирование индукторов и нагревателей рассматривается довольно полно [5, 9, 10, 18, 27, 34, 38], этим вопросам посвящены лишь четыре главы, где приведены наиболее новые конструкции индукторов и принципиальные соображения по их конструированию.

Главы 1—5, 7, 9, 11—16 написаны А. Е. Слухоцким, главы 6, 8, 10 и 17 — С. Е. Рыскиным.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 192041, Ленинград, Марсовое поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

Авторы

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

1-1. Составные части установки и способы нагрева

Установка для индукционного нагрева металлов состоит обычно из следующих основных элементов:

- 1) генератор (ламповый, машинный или статический преобразователь с ключевыми приборами) высокой частоты;
- 2) индуктор, представляющий собой спираль нужной формы по перечного сечения, или провод какой-либо формы в зависимости от типа нагреваемого объекта;
- 3) конденсаторная батарея, компенсирующая низкий коэффициент мощности индуктора.

Часто, а в установках для поверхностной закалки почти всегда индуктор подключается к генератору через понижающий трансформатор. Нагреватели с многовитковыми индукторами обычно подключаются к генератору без трансформатора.

В ряде случаев для нагрева используется промышленная частота, и тогда генератор отсутствует. При питании однофазной нагрузки вместо генератора устанавливается устройство, преобразующее трехфазную систему в однофазную, которое обеспечивает симметричную нагрузку сети.

Нагреваемая деталь помещается внутри индуктора или около него. Переменное магнитное поле индуктора вызывает появление индуцированного тока в детали, в результате чего она нагревается.

Существуют два основных способа нагрева.

Способ одновременного нагрева. Индуктор охватывает всю поверхность детали, подлежащей термообработке, причем нагрев ее во всех точках происходит одновременно. Температура поверхности и ее распределение по глубине зависят от времени нагрева t_k и энергии, переданной в деталь за это время..

Устройства для сквозного нагрева, работающие таким образом, обычно называют нагревателями периодического действия.

Способ непрерывно-последовательного нагрева. Узкий индуктор передвигается вдоль нагреваемой детали. При поверхностной закалке из индуктора или специального приспособления, расположенного около него, на нагретую поверхность детали выпускается охлаждающая ее вода. В этом случае глубина закалки и температура поверхности определяются скоростью движения индуктора, его шириной и мощностью, выделяющейся в нагреваемой детали.

В тепловых расчетах можно, как и прежде, пользоваться понятием времени нагрева, так как любой элемент поверхности находится под индуктором определенное время:

$$t_k = a/v,$$

где t_k — время нагрева элемента поверхности; a — ширина индуктирующего провода; v — скорость движения индуктора или детали.

Непрерывно-последовательный способ широко применяется для сквозного нагрева мерных заготовок, штанг и труб.

При нагреве коротких кузнецких заготовок или других подобных им объектов они часто подаются в длинный индуктор толкателем через короткие промежутки времени t_0 , которое называется темпом подачи или толкания. Этот способ является разновидностью способа непрерывно-последовательного нагрева. Устройства, работающие таким образом, называются нагревателями метода динамического действия.

Метод индукционного нагрева основан на использовании следующих законов и явлений: 1) закон электромагнитной индукции; 2) поверхностный эффект; 3) эффект близости; 4) изменение свойств стали в процессе нагрева. Последнее явление особенно существенно при поверхностной термообработке, на что впервые обратил внимание чл. кор. АН СССР проф. В. П. Вологдин, автор метода поверхностной индукционной закалки [7, 8].

При использовании метода индукционного нагрева приходится также считаться с наличием и других явлений, вызывающих своеобразие распределения токов в индукторе и нагреваемой детали. В одних случаях они могут быть полезными, в других — вредными.

Все эти явления известны уже достаточно давно. Однако почти во всех областях техники они, за исключением явления электромагнитной индукции, рассматривались как не имеющие значения или вредные. В условиях же индукционного нагрева эти явления являются полезными.

1-2. Закон электромагнитной индукции

Для метода индукционного нагрева значение электромагнитной индукции состоит прежде всего в возможности передать электромагнитную энергию в нагреваемый объект, не прибегая к контактам. Применение контактов значительно осложняет процесс и в ряде

случаев приводит к невозможности его осуществления (например, поверхностная закалка шеек коленчатых валов, деталей сложной формы и т. п.).

Индуктированная в контуре электродвижущая сила (э. д. с.) может быть определена на основании закона электромагнитной индукции:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt},$$

где e — мгновенное значение э. д. с., в; $\Psi = w\Phi$ — полное число потокосцеплений контура, состоящего из w витков и пронизываемого магнитным потоком Φ , измеряется в веберах (вб).

Приведенное выражение для числа потокосцеплений Ψ справедливо, если магнитные потоки всех витков одинаковы, что соблюдается во многих интересующих нас случаях с достаточной точностью.

Если зависимость потока Φ от времени близка к синусоидальной, можно для действующего значения э. д. с. написать:

$$E = 4,44f\omega\Phi, \text{ в},$$

где Φ — амплитуда магнитного потока, вб, f — частота, гц.

Тогда мощность можно определить из выражения:

$$P = EI \cos \varphi = 4,44f\omega I\Phi \cos \varphi, \text{ вт}. \quad (1-1)$$

Из уравнения (1-1) видно, что мощность P при прочих равных условиях пропорциональна частоте. Поэтому при повышении частоты увеличивается энергия, выделяющаяся в том же самом объеме, т. е. увеличивается ее концентрация. Именно этим и объясняются малые размеры и вес высокочастотных трансформаторов, а также применение более высоких частот при нагреве малых деталей.

1-3. Поверхностный эффект

Поверхностный эффект является основой метода индукционного нагрева, в особенности при поверхностной закалке. Он выражается в неравномерном распределении тока по сечению проводника, при котором наибольшая плотность тока наблюдается у одной из поверхностей проводника [1,23].

Рассмотрим поверхностный эффект на примере падения плоской электромагнитной волны на полуограниченное металлическое тело с плоской поверхностью. Будем считать, что размеры поверхности и глубина тела бесконечны, а его физические свойства — магнитная проницаемость μ и удельное сопротивление ρ — постоянны во всех точках. Этот весьма идеализированный случай тем не менее очень важен для рассмотрения электромагнитных явлений в реальных проводниках при ярко выраженном поверхностном эффекте.

При решении задачи исходными уравнениями являются основные уравнения электромагнитного поля, впервые полученные Мак-свеллом и носящие его имя. В общем случае эти уравнения имеют вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \delta + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1-2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1-3)$$

где $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$ — магнитная индукция; $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$ — электрическая индукция; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума; μ — относительная магнитная проницаемость; $\epsilon_0 = 1/(4\pi 9 \cdot 10^9)$ — диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость; δ — плотность тока проводимости.

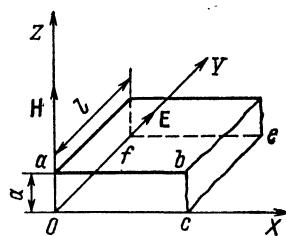


Рис. 1-1. Пояснение к решению уравнений электромагнитного поля и выводу формул для электрических и магнитных сопротивлений

Уравнения (1-2) и (1-3) выражают в дифференциальной форме законы полного тока и электромагнитной индукции соответственно. Второй член в правой части уравнения (1-2) представляет собой плотность тока смещения, которым в проводнике практически всегда можно пренебречь.

Так как в плоской волне векторы \mathbf{H} и \mathbf{E} имеют лишь по одной составляющей (в рассматриваемом случае H_z и E_y — на рис. 1-1), то уравнения (1-2) и (1-3) упростятся:

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \delta_y = \frac{E_y}{\rho} = \gamma E_y, \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} = \mu_0 \mu \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad (1-5)$$

где ρ — удельное сопротивление, $\text{ом}\cdot\text{м}$; γ — удельная проводимость, $\text{сим}/\text{м}$.

В дальнейшем индексы « y » и « z » будут опускаться. Если \mathbf{E} и \mathbf{H} синусоидальные функции времени, то

$$\left. \begin{aligned} \dot{H} &= H_m e^{j(\omega t + \theta_H)} = H_m e^{j\theta_H} e^{j\omega t} = \dot{H}_m e^{j\omega t}, \\ \dot{E} &= E_m e^{j(\omega t + \theta_E)} = E_m e^{j\theta_E} e^{j\omega t} = \dot{E}_m e^{j\omega t}, \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

где H_m и E_m , \dot{H}_m и \dot{E}_m — действительные и комплексные амплитуды напряженностей магнитного и электрического полей соответственно; θ_H и θ_E — соответствующие начальные фазы; ω — угловая частота.

Подставляя выражения (1-6) в уравнения (1-4) и (1-5) получим:

$$-\frac{d\dot{H}_m}{dx} = \delta_m = \gamma \dot{E}_m, \quad (1-7)$$

$$\frac{d\dot{E}_m}{dx} = -j\omega\mu_0\mu\dot{H}_m. \quad (1-8)$$

После подстановки в уравнение (1-8) выражения для \dot{E}_m из уравнения (1-7) получим:

$$\frac{d^2\dot{H}_m}{dx^2} = j\omega\mu_0\mu\gamma\dot{H}_m = j2k^2\dot{H}_m, \quad (1-9)$$

$$k = \frac{1}{\Delta} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu\gamma}{2}},$$

где Δ — глубина проникновения тока

$$\Delta = \sqrt{2/(\omega\mu_0\mu\gamma)} = \sqrt{2\rho/(\omega\mu_0\mu)} \approx 503 \sqrt{\rho/(\mu f)}, \text{ м.} \quad (1-10)$$

Решение уравнения (1-9) имеет вид:

$$\dot{H}_m = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}.$$

Коэффициент α находится из характеристического уравнения и равен:

$$\alpha_{1,2} = \pm k\sqrt{-2j} = \pm k(1+j).$$

Выражение для \dot{H}_m может содержать только член с отрицательным значением α , так как в противном случае \dot{H}_m будет неограниченно возрастать с возрастанием x , что невозможно.

При $x = 0$ и $\dot{H}_m = \dot{H}_{me} = A$, т. е. амплитуда напряженности равна своему значению на поверхности. Выбрав начало отсчета времени так, что при $x = 0$ $\theta_H = 0$, получим $\dot{H}_{me} = H_{me}$. Тогда выражение для H_m примет вид:

$$\dot{H}_m = \dot{H}_{me}e^{-k(1+j)x} = H_{me}e^{-(1+j)x/\Delta}. \quad (1-11)$$

Из уравнения (1-7) определим

$$\dot{E}_m = \rho\delta_m = -\rho \frac{dH_m}{dx} = \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta} H_{me} e^{j\pi/4} e^{-(1+j)x/\Delta}. \quad (1-12)$$

Модули этих выражений примут вид:

$$H_m = H_{me}e^{-x/\Delta}, \quad (1-13)$$

$$E_m = \rho\delta_m = E_{me}e^{-x/\Delta}. \quad (1-14)$$

На поверхности при $x = 0$ имеем:

$$E_m = E_{me} = \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta} H_{me}, \quad (1-15)$$

$$\delta_m = \delta_{me} = \frac{E_{me}}{\Delta} = \sqrt{2} \frac{H_{me}}{\Delta}. \quad (1-16)$$

Соответствующие фазы находятся из выражений (1-11) и (1-12) и равны:

$$\theta_H = -\frac{x}{\Delta}, \quad \theta_E = -\frac{x}{\Delta} + \frac{\pi}{4}.$$

Зависимости $\frac{H_m}{H_{me}} = \frac{E_m}{E_{me}}$ от относительной глубины x/Δ приведены на рис. 1-2.

На глубине $x = \Delta$ $\frac{\delta_m}{\delta_{me}} = \frac{E_m}{E_{me}} = \frac{H_m}{H_{me}} = \frac{1}{e} = 0,368$. Это соотношение указывает на условность названия глубина проникновения тока. Однако использование этой величины позволяет упростить многие расчеты, в частности расчет сопротивлений.

Рассмотрим параллелепипед, имеющий грани длиной l и a в направлении осей OY и OZ , и бесконечно длинную грань в направлении оси OX , выделенный в полуограниченной проводящей среде (рис. 1-1).

Найдем амплитуду тока (I_m), протекающего в полосе шириной a . Для этого применим закон полного тока к контуру $OabcO$. Тогда получим:

$$\oint_{OabcO} H dI = a H_{me} = I_m, \quad (1-17)$$

т. к. составляющая напряженности магнитного поля в направлении оси OX равна нулю, а сторона bc удалена в бесконечность (на достаточное расстояние), где $H = 0$. Из уравнения (1-17) видно, что полный ток находится в фазе с напряженностью магнитного поля на поверхности.

Учитывая соотношение (1-16), выразим полный ток I_m через плотность тока:

$$I_m = a \frac{\delta_{me}}{\sqrt{2}} \Delta. \quad (1-18)$$

Вычислим напряжение u , уравновешивающее э. д. с., паводимую на участке l магнитным потоком Φ , проходящим через сечение параллелепипеда в направлении OZ . Для этого применим закон электромагнитной индукции к контуру $OcefO$ (рис. 1-1):

$$\oint_{OcefO} E dI = -\frac{d\Phi}{dt} = -u.$$

Учитывая, что $E_x = 0$ и что составляющая интеграла $E_y \bar{ce} = 0$ (вследствие удаленности стороны ce), получим:

$$\dot{U}_m = j\omega \Phi_m = \dot{E}_{me} l, \quad (1-19)$$

где Φ_m — магнитный поток, пронизывающий контур $OcefO$.

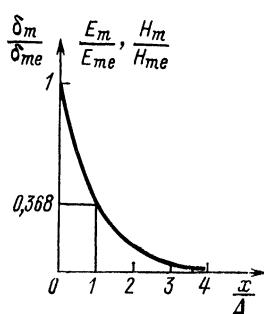


Рис. 1-2. Зависимость плотности тока, напряженности электрического и магнитного полей от глубины

Выражение для полного внутреннего электрического сопротивления полосы шириной a и длиной l , выделенной на поверхности полуограниченного пространства, получим, используя соотношения (1-17) и (1-19) в виде:

$$z = \frac{\dot{U}_m}{I_m} = \frac{l}{a} \frac{\dot{E}_{me}}{H_{me}} = r + jx_m, \quad (1-20)$$

где r — активное сопротивление полосы; x_m — внутреннее реактивное сопротивление, обусловленное только магнитным потоком, проходящим в металле через сечение $OabcO$.

Поставив значение \dot{E}_{me} из выражения (1-12), положив в нем $x = 0$, получим

$$\dot{z} = \frac{l}{a} \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta} e^{j\pi/4}, \quad z = \frac{l}{a} \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta}, \quad (1-21)$$

$$r = x_m = l\rho/(a\Delta). \quad (1-22)$$

Определим теперь магнитное сопротивление Z_m параллелепипеда:

$$Z_m = \frac{\oint \mathbf{H} d\mathbf{l}}{\Phi_m} = \frac{a H_{me}}{\Phi_m} = \frac{I_m}{\Phi_m} = j\omega \frac{I_m}{U_m}.$$

Окончательно имеем:

$$\dot{Z}_m = \frac{j\omega}{\dot{z}} = R_m + jX_m, \quad (1-23)$$

где \dot{z} — внутреннее электрическое сопротивление. Модуль магнитного сопротивления

$$Z_m = \frac{\omega}{z} = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}. \quad (1-24)$$

Остановимся на физическом смысле вещественной R_m и мнимой X_m составляющих магнитного сопротивления Z_m .

Полная мощность, выделяющаяся внутри параллелепипеда

$$\dot{P} = \frac{1}{2} \dot{U}_m \dot{I}_m^*,$$

причем $\dot{U}_m = j\omega \Phi_m$ и $\dot{I}_m = \Phi_m \dot{z}_m$. Тогда имеем:

$$\dot{P} = \frac{1}{2} j\omega \Phi_m \Phi_m^* \dot{Z}_m = \frac{1}{2} \omega \Phi_m^2 (X_m + jR_m) = P_a + jP_r.$$

Из полученного соотношения видно, что вещественная часть R_m магнитного сопротивления определяет собой реактивную мощность и составляющую магнитодвижущей силы, совпадающую по фазе с магнитным потоком Φ_m . В то же время мнимая часть X_m определяет активную мощность — потери в среде — и составляющую магнитодвижущей силы, совпадающую по фазе с напряжением U_m , уравновешивающим э. д. с., наведенную на поверхности среды. Обычно в электрических аппаратах эта составляющая

мала, в то время как при индукционном нагреве она определяет процесс. Например, в рассматриваемом случае полубесконечной среды с $\rho = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$, $R_m = X_m$.

Если $l = a = 1 \text{ м}$, то получим так называемые сопротивления единичного квадрата:

$$z_0 = r_0 + jx_0 = \dot{E}_{me}/H_{me}, \quad \dot{Z}_{m0} = R_{m0} + jX_{m0} = j\omega/z_0.$$

Следовательно,

$$z = \frac{l}{a} z_0, \quad \dot{Z}_m = \frac{a}{l} \dot{Z}_{m0}. \quad (1-25)$$

Отметим, что при выводе выражений (1-17), (1-19), (1-20) и (1-23) не делалось никаких предположений о характере зависимости удельного сопротивления и магнитной проницаемости от координаты x . В этом смысле эти зависимости являются общими и мы будем ими пользоваться также и при более сложных формах поверхностного эффекта. Например, если H и E не будут синусоидальными функциями времени, мы заменим их эквивалентными синусоидами — первыми гармониками функций $H(t)$, $E(t)$ и $\delta(t)$, как это было предложено Л. Р. Нейманом [22].

Формулы (1-18) и (1-22) поясняют название «глубина проникновения тока», позволяя формально считать, что ток проходит лишь в слое Δ с равномерной плотностью, равной $\delta_{me}/\sqrt{2}$, а за пределами этого слоя отсутствует. При этом активное сопротивление вычисляется как сопротивление постоянному току пластины, толщина которой равна глубине проникновения тока Δ .

Для многих особенно для тепловых расчетов существенно, что в пределах глубины проникновения тока выделяется главная часть энергии.

Определим мощность в полоске шириной a и длиной l (см. рис. 1-1), воспользовавшись выражением (1-14).

Мощность в элементарном слое толщиной dx на глубине x

$$dP = \frac{1}{2} (a\delta_{me} dx)^2 \frac{\rho l}{adx} = al \frac{1}{2} \rho \delta_{me}^2 e^{-2x/\Delta} dx.$$

Отсюда полная активная мощность, проходящая через поверхность $S = al$ проводящей среды

$$P = al \frac{\rho \delta_{me}^2}{2} \int_0^\infty e^{-2x/\Delta} dx = al \frac{\delta_{me} \rho \Delta}{4} = al p_0, \quad (1-26)$$

где p_0 — удельная мощность на поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

В пределах слоя толщиной x имеем:

$$P_{0+x} = al \frac{\rho \delta_{me}^2}{2} \int_0^x e^{-2x/\Delta} dx = al p_0 (1 - e^{-2x/\Delta}) = al (p_0 - p_x), \quad (1-27)$$

где P_{0+x} — мощность в слое толщиной x ; p_x — удельная мощность на глубине x .

В пределах слоя толщиной Δ , подставив $x = \Delta$, получим:

$$P_{0-\Delta} = \alpha p_0 (1 - e^{-2}) = 0,865 \alpha p_0. \quad (1-28)$$

Это дает основание при приближенных расчетах допускать, что в слое Δ выделяется вся тепловая энергия.

В табл. 1-1 приведены значения глубины проникновения тока при различных частотах для холодной стали, для стали, нагретой выше точки магнитных превращений, и для меди.

Таблица 1-1
Глубина проникновения тока в сталь и медь (в см)

Частота, Гц	Δ , см		
	Медь при 15°C ($\rho = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$ $\mu = 1$)	Сталь 45	
		при 15°C , ($\rho = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$ $\mu = 40$)	при 800°C ($\rho = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$ $\mu = 1$)
50	1,0	0,5	7,0
500	0,3	0,15	2,2
2 500	0,13	0,067	1,0
10 000	0,07	0,034	0,5
10^6	0,022	0,011	0,16
10^8	0,007	0,0034	0,05

В реальных условиях проводники имеют конечные размеры и далеко не всегда плоские. Однако и в этих случаях понятие глубины проникновения тока не теряет смысла, так как плотность тока спадает до малой величины уже на расстоянии от поверхности, равном $(2 \div 3) \Delta$, а мощность еще быстрее. При $x > 2\Delta$ мощность практически равна нулю. Поэтому влияние кривизны поверхности или толщины проводника очень часто совершенно не оказывается на точности полученного по формулам (1-4) — (1-28) результата.

1-4. Эффект близости

На рис. 1-3 показаны приблизительные картины магнитных полей двух проводников, с прямоугольным сечением, для случая одинаково направленных (рис. 1-3, а, разность фаз равна нулю) и встречно направленных (рис. 1-3, б, разность фаз равна 180°) токов.

Из рис. 1-3 видно, что наибольшая напряженность поля в системе с однонаправленными токами наблюдается у внешних поверхностей проводников, а в системе с противоположно направленными токами у внутренних поверхностей.

Очевидно, что главная часть электромагнитной энергии, поглощаемой проводником, поступает в него из зоны сильного поля,

в связи с чем там будет расположена и зона с наибольшей плотностью тока, как то показано на рис. 1-3 (здесь и далее глубина зачерненного слоя пропорциональна плотности тока). Распределение тока по глубине подчиняется разобранным выше закономерностям поверхностного эффекта. Сам эффект близости представляет собой разновидность поверхностного эффекта и состоит в концентрации тока в определенных зонах поверхности проводников в результате суммарного взаимодействия электромагнитных полей всех проводников с током, входящим в рассматриваемую систему.

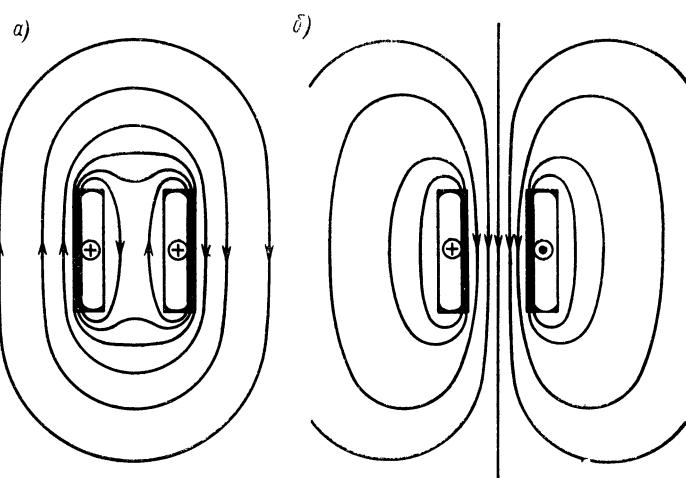


Рис. 1-3. Картина магнитного поля и распределения тока при эффекте близости: а — одинаково направленные токи, б — встречно направленные токи

Используя эффект близости, можно подбором соответствующей формы индуктора концентрировать нагрев в определенных частях поверхности обрабатываемой детали. Например, если индуктор представляет собой кольцо, охватывающее нагреваемую деталь, то в детали индуцируется ток, путь которого имеет также кольцевую форму. Ток концентрируется в полосе, по ширине мало отличающейся от ширины индуктора.

Эффект близости проявляется тем сильнее, чем меньше расстояние между проводниками и чем сильнее проявляется поверхностный эффект, т. е. чем больше отношение толщины проводника к глубине проникновения тока.

Не следует смешивать перераспределение тока в проводнике при эффекте близости с электродинамическими взаимодействиями между проводниками. Проводники с одинаково направленными токами притягиваются друг к другу, а с встречно направленными — отталкиваются.

1-5. Изменение свойств стали в процессе нагрева

При нагреве стали изменяются ее удельное сопротивление и магнитная проницаемость, причем удельное сопротивление возрастает вплоть до точки магнитных превращений, после чего его рост замедляется.

Отметим, что при температуре выше 800°C , удельные сопротивления сталей различных сортов почти одинаковы. В среднем можно принять, что удельное сопротивление в интервале температур $800 - 900^{\circ}\text{C}$ приблизительно равно $10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Зависимость удельного сопротивления температуры для стали с содержанием углерода $0,4 - 0,5\%$ приведена на рис. 1-4. Из кривой видно, что в промежутке $15 - 800^{\circ}\text{C}$ удельное сопротивление возрастает примерно в 5 раз.

Магнитная проницаемость слабо зависит от температуры примерно до $650 - 700^{\circ}\text{C}$, после чего быстро уменьшается и достигает величины, примерно равной магнитной проницаемости вакуума. Обычно считается, что она падает скачком. Примерная зависимость относительной магнитной проницаемости от температуры также приведена на рис. 1-4. Исходное значение магнитной проницаемости принято равным 16, что объясняется применением при индукционном нагреве чрезвычайно сильных магнитных полей. Нередко ее исходное значение составляет 5—6. Поэтому глубина проникновения тока в сталь возрастает при нагреве в 8—10 раз. Значения ее при $T = 800^{\circ}\text{C}$ даны в табл. 1-1. Для определения глубины проникновения тока в сталь, нагретую выше точки магнитных превращений, можно написать простую формулу, подставив в формулу (1-10) значения $\rho = \rho_k = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$ и $\mu = 1$. Тогда

$$\Delta_k \approx 0.5/\sqrt{f}, \text{ м.} \quad (1-29)$$

Индекс « k » указывает, что значение соответствующих величин относится к температуре выше точки магнитных превращений. Глубину проникновения тока в этом случае будем для краткости называть горячей глубиной проникновения тока.

При нагреве сталь теряет магнитные свойства, прогреваясь от слоя к слою, от поверхности внутрь. Распределение плотности тока, приведенное на рис. 1-2, искажается, а металл становится как бы двухслойным. Грубо приближенно можно считать, что распределение плотности тока изобразится линией, состоящей из отрезков двух экспонент (рис. 1-5).

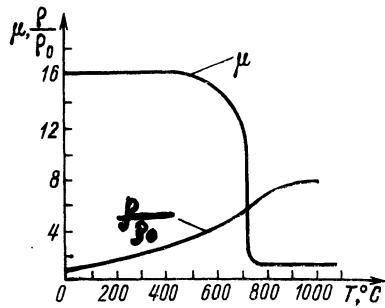


Рис. 1-4. Зависимость относительной магнитной проницаемости и удельного сопротивления от температуры для стали 45

Первая экспонента соответствует стали, нагретой выше точки магнитных превращений. На рис. 1-5 она продолжена штриховой линией. Вторая экспонента соответствует стали, обладающей магнитными свойствами.

Более подробное рассмотрение (см. § 4-2) показывает, что кривая в наружном слое идет более полого из-за частичного отражения от внутренней границы слоя электромагнитной энергии, проникающей в металл. При таком характере распределения плотности тока выделение энергии в нагреваемом слое, и, следовательно, нагрев его происходят более равномерно.

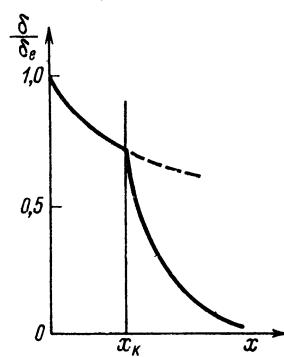


Рис. 1-5. Примерное распределение тока в стальном предмете, нагретом выше точки превращений на глубину x_k

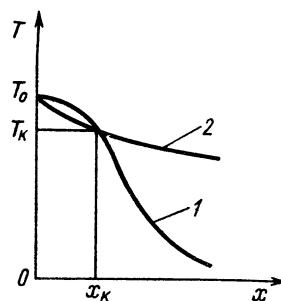


Рис. 1-6. Распределение температуры по сечению при индукционном нагреве
1 — нагрев глубинного типа;
2 — нагрев поверхностного типа;
 T_0 — температура поверхности, T_k — температура магнитных превращений (расчетная температура закалки)

Излом кривой ярко выражен, если глубина прогретого слоя x_k меньше горячей глубины проникновения тока Δ_k . В этом случае нагрев происходит быстро, без большого перепада температуры в нагреваемом слое и с малыми тепловыми потерями на нагрев сердцевины.

На рис. 1-6 представлено распределение температуры при индукционном нагреве под поверхностную закалку. Кривая 1 соответствует режиму нагрева при $x_k < \Delta_k$, называемому глубинным. При этом режиме нагрева роль теплопроводности в значительной мере снижена, хотя она и проявляется в процессе нарастания нагретого слоя.¹ Кривая 2 соответствует случаю $x_k > \Delta_k$. Здесь основную роль играет теплопроводность так же, как и при нагреве внешними источниками тепла, например, в печи или соляной ванне. Такой тип нагрева называют чисто поверхностным. Он характеризуется большими тепловыми потерями, чем глубинный. Время

¹ Здесь и дальше для сокращения вместо «слой, нагретый выше точки магнитных превращений», говорится «нагретый слой».

нагрева при том же перепаде температуры в нагреваемом слое резко увеличивается и становится примерно таким же, как и при нагреве с внешними источниками тепла. Этот тип нагрева является невыгодным.

1-6. Кольцевой эффект

Известно, что 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 поверхностного эффекта, объясняется асимметрией магнитного поля витка или соленоида. Во внутренней полости (рис. 1-7) 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 индуцирующего провода. Однако он затрудняет нагрев внутренних поверхностей, действуя противоположно эффекту близости и уменьшая напряженность магнитного поля у нагреваемой поверхности.

1-7. Распределение плотности тока в индуцирующем проводе и нагреваемой детали

На рис. 1-8 приведена картина магнитного поля индуктора, внутрь которого помещен металлический цилиндр. Ток в индукторе вследствие кольцевого эффекта и эффекта близости сосредоточен

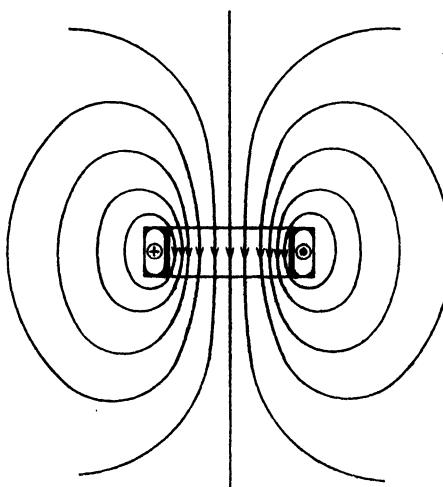


Рис. 1-7. Магнитное поле пустого индуктора

на его внутренней поверхности, в большей ее части с почти равномерной плотностью, которая несколько увеличивается к углам провода. Это объясняется тем, что нити тока, лежащие на углах провода, охвачены меньшим магнитным потоком, чем находящиеся в средней части, и в этих нитях индуцируется меньшая противов. д. с., чем в нитях, расположенных в средней части провода.

Наоборот, в цилиндре ток протекает именно под воздействием э. д. с., наведенной в цилиндре. Эта э. д. с. тем больше, чем больше магнитный поток, связанный с рассматриваемой кольцевой нитью тока.

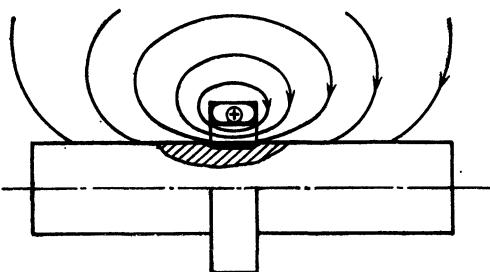


Рис. 1-8. Магнитное поле индуктора, внутрь которого помещена нагреваемая деталь

рина которой мало отличается от ширины индуктора. Обычно мы будем считать, что ширина этой полосы, для краткости называемой активной, приблизительно равна ширине индуктора.

1-8. Приближенный расчет электромагнитных процессов в системах с конечным поперечным сечением

Если толщина проводника, в который электромагнитная энергия проникает с одной стороны, превышает $(2,5 \div 3) \Delta$, то он может быть уподоблен полуограниченной среде с плоской поверхностью. Если электромагнитная волна проникает в проводник по всему периметру поперечного сечения, то, например, у цилиндра диаметр должен превышать глубину проникновения тока в 5—6 раз. Рассмотрим два наиболее характерных для индукционного нагрева случая.

Цилиндр в продольном магнитном поле. Этот случай соответствует индукционному нагреву цилиндрического объекта в цилиндрическом индукторе.

Чтобы не осложнять вопрос учетом краевых эффектов, рассмотрим отрезок a системы бесконечной длины (рис. 1-9). Тогда магнитное поле в зазоре между индуктором и цилиндром будет равномерным, а вне индуктора будет равно нулю. Примем, что диаметр цилиндра $D_2 > 6\Delta_2$, где Δ_2 — глубина проникновения тока в материал цилиндра, а толщина стенки трубки, из которой выполнен

из картины поля видно, что с наибольшим магнитным потоком связаны нити тока, расположенные в средней плоскости индуктора, где и наблюдается максимальный настил (поверхностная плотность) тока. За пределами индуктирующего провода, индуцированный ток быстро спадает.

Таким образом, ток, индуцированный в цилиндре, сосредоточен в полосе, ши-

индуктор $d_1 > 3\Delta_1$. Условимся также, что все величины, относящиеся к индуктору, будут помечаться индексом 1, а относящиеся к нагреваемому объекту индексом 2.

Так как тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля (в рассматриваемом случае — единственная) не претерпевает скачка на границе раздела различных сред, то напряженность поля в воздушном зазоре одновременно является и напряженностью магнитного поля на поверхности обмотки индуктора, а также на поверхности нагреваемого цилиндра, т. е. $H_b = H_{me}$.

Учитывая, что внешнее магнитное поле индуктора равно нулю, выразим ток в индукторе (I_u) через напряженность магнитного поля, воспользовавшись законом полного тока. Тогда, совершив обход по контуру $abcta$ (рис. 1-9), получим:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \oint_{abcta} \dot{H}_m d\ell = \frac{1}{\sqrt{2}} aH_{me} = \omega I_u, \quad (1-30)$$

где ω — число витков индуктора.

Напряжение на зажимах индуктора

$$\begin{aligned} \dot{U}_u = \frac{j\omega\dot{\Phi}}{\sqrt{2}} = \frac{j\omega\omega}{\sqrt{2}} (\Phi_{1M} + \Phi_b + \Phi_{2M}) = \dot{U}_{1M} + \\ + \dot{U}_b + \dot{U}_{2M}, \end{aligned} \quad (1-31)$$

где Φ — полный магнитный поток индуктора (амплитудное значение), v ; Φ_{1M} — составляющая магнитного потока, проходящая через поперечное сечение обмотки индуктора; Φ_b — составляющая магнитного потока, проходящая через воздушный зазор; Φ_{2M} — составляющая магнитного потока, проходящая через сечение цилиндра; \dot{U}_{1M} — составляющая напряжения, уравновешивающая э. д. с., наведенную в обмотке магнитным потоком Φ_{1M} , v ; \dot{U}_{2M} — составляющая напряжения, уравновешивающая э. д. с., наведенную магнитным потоком Φ_{2M} ; \dot{U}_b — составляющая напряжения, уравновешивающая э. д. с., наведенную магнитным потоком Φ_b .

Для составляющей напряжения \dot{U}_{1M} , учитывая формулы (1-20) (1-23), (1-30) и (1-31), можно написать:

$$\dot{U}_{1M} = \frac{j\omega\dot{\Phi}_{1M}}{\sqrt{2}} = \frac{j\omega\omega}{\sqrt{2}} \frac{aH_{me}}{\dot{z}_{m1}} = I_u \omega^2 \dot{z}_1^{(1)},$$

где $\dot{z}_1^{(1)} = \pi D_1 z_{01}/a$ внутреннее электрическое сопротивление одновиткового индуктора, определяемое магнитным потоком Φ_{1M} ; z_{01} — электрическое сопротивление единичного квадрата индуктора ($z_{01} = \sqrt{2}\rho_1 e^{j\pi/4}/\Delta_1$).

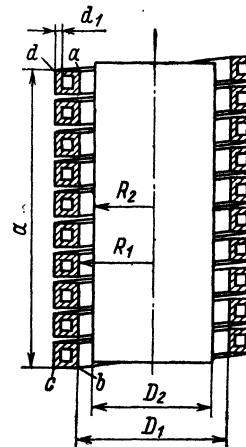


Рис. 1-9. Индуктор (отрезок a системы бесконечной длины) для нагрева цилиндра

Электрическое сопротивление индуктора, имеющего w витков, намотанных без зазора,

$$z_1 = w^2 \frac{\pi D_1}{a} z_{01} = r_1 + jx_{1M}, \quad (1-32)$$

причем

$$r_1 \approx x_{1M} \approx w \frac{\pi D_1}{b} \frac{\rho_1}{\Delta_1} = w^2 \frac{\pi D_1}{a} \frac{\rho_1}{\Delta_1}, \quad (1-33)$$

где r_1 — активное сопротивление провода индуктора, om ; x_{1M} — его внутреннее реактивное сопротивление; $b = a/w$ — ширина витка индуктора при плотной намотке.

Таким образом, имеем:

$$\dot{U}_{1M} = I_u (r_1 + jx_{1M}). \quad (1-34)$$

Составляющая напряжения

$$\dot{U}_B = \frac{j\omega\dot{\Phi}_B}{\sqrt{2}}, \quad \dot{\Phi}_B = \Phi_B = \mu_0 H_{me} S_h = \mu_0 \frac{\omega \sqrt{2} I_u}{\sqrt{2}} S_h,$$

где S_h — площадь поперечного сечения воздушного зазора, m^2 .

В рассматриваемом случае $S_h = \pi/4 (D_1^2 - D_2^2)$. Подставив полученное значение магнитного потока Φ_B в выражение для \dot{U}_B , получим:

$$\dot{U}_B = I_u \cdot jx_B, \quad (1-35)$$

$$x_B = \omega \mu_0 \frac{S_h}{a} w^2 = \omega \mu_0 \frac{\pi}{4a} (D_1^2 - D_2^2) w^2, \quad om, \quad (1-36)$$

где x_B — реактивное сопротивление, определяемое магнитным потоком Φ_B в воздушном зазоре.

Составляющую напряжения \dot{U}_{2M} определим подобно тому, как была определена составляющая \dot{U}_{1M} :

$$\dot{U}_{2M} = \frac{j\omega\dot{\Phi}_{2M}}{\sqrt{2}} = \frac{j\omega\omega}{\sqrt{2}} \frac{aH_{me}}{Z_{m2}} = I_u w^2 z_2 = I_u w^2 (r_2 + jx_{2M}), \quad (1-37)$$

где r_2 и x_{2M} — соответственно активное и внутреннее реактивное сопротивления цилиндра;

$$r_2 \approx x_{2M} \approx \pi D_2 \rho_2 / (a \Delta_2). \quad (1-38)$$

Формулу (1-37) можно представить в виде:

$$\dot{U}_{2M} = I_u (r'_2 + jx'_{2M}), \quad (1-39)$$

где $r'_2 = w^2 r_2$ и $x'_{2M} = w^2 x_{2M}$ — активное и реактивное сопротивления, приведенные к току индуктора.

Таким образом, для напряжения на индукторе имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_u &= I_u [r_1 + r'_2 + j(x_B + x_{1M} + x'_{2M})] = \\ &= I_u [r_1 + r'_2 + j(x_s + x'_{2M})] = I_u \dot{z}_u, \end{aligned} \quad (1-40)$$

где x_s — реактивность рассеяния индуктора;

$$x_s = x_B + x_{1M}. \quad (1-41)$$

Можно также написать:

$$\left. \begin{aligned} U_i &= U_{r1} + U_s + U_{2m}, \\ U_{r1} &= I_i r_1, \quad U_s = I_i j x_s, \quad U_{2m} = I_i (r'_2 + j x'_{2m}). \end{aligned} \right\} \quad (1-42)$$

Соотношения (1-36), (1-39), (1-40) и (1-42) являются общими и мы будем часто ими пользоваться в дальнейшем.

К. п. д. индуктора равен отношению полезной мощности P_2 , переданной в цилиндр, к полной мощности P_1 , подведенной к индуктору:

$$\eta_i = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{\Delta P_1 + P_2} = \frac{I_i^2 r'_2}{I_i^2 r_1 + I_i^2 r'_2} = \frac{1}{1 + r_1/r'_2}, \quad (1-43)$$

где $\Delta P_1 = I_i^2 r_1$ — потери в проводе индуктора.

Подставив вместо r_1 и r'_2 их значения из формул (1-33), (1-38) и (1-39), получим, учитывая, что индуктор выполняется из меди и $\mu_1 = 1$:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\Delta_2}{\Delta_1}} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}}. \quad (1-44)$$

Таким образом, в области сильного проявления поверхностного эффекта к. п. д. индуктора зависит от соотношения диаметров индуктора и цилиндра, от удельных сопротивлений материалов, но не зависит от частоты. Последнее объясняется тем, что как r_1 , так и r'_2 прямо пропорциональны корню квадратному из частоты; это вытекает из формул (1-10), (1-33) и (1-38).

Формула (1-44) показывает, что наибольший к. п. д. получается при нагреве ферромагнитных материалов с большим удельным сопротивлением. При нагреве же, например, медного цилиндра в медном индукторе максимальный к. п. д. даже при $D_1 = D_2$ равен 0,5. Следует указать, что при нагреве объектов любой формы структура формулы для к. п. д. индуктора остается неизменной.

В заключение укажем, что точность вычислений сопротивлений r_2 и x_{2m} повышается, если вместо диаметра D_2 в расчеты подставить средний расчетный диаметр

$$D'_2 = D_2 - \Delta_2, \quad (1-45)$$

что в некоторой степени учитывает кривизну поверхности.

Пластина в продольном магнитном поле. На рис. 1-10 представлен овальный индуктор с находящейся в нем пластиной и обозначены основные размеры. По-прежнему считается, что длина системы a велика и поверхностный эффект ярко выражен ($D_2 > 6\Delta_2$). Тогда могут быть использованы все формулы, полученные для ци-

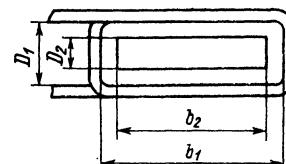


Рис. 1-10. Индуктор для нагрева пластины (вид спереди)

линдрической системы. Следует только вместо πD_1 и πD_2 всюду подставить периметры

$$F_1 = 2(b_1 + D_1) \text{ и } F_2 = 2(b_2 + D_2), \quad (1-46)$$

где b_1 и b_2 — ширина окна индуктора и ширина пластины соответственно; D_1 и D_2 — высота окна индуктора и толщина пластины.

Для реактивности рассеяния получим:

$$x_s = \omega \mu_0 \frac{S_h}{a} w^2 + x_{1m} = \omega \mu_0 \frac{b_1 D_1 - b_2 D_2}{a} w^2 + x_{1m}. \quad (1-47)$$

Формула для к. п. д. индуктора будет подобна формуле (1-44):

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{F_1}{F_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_0}}}. \quad (1-48)$$

ГЛАВА ВТОРАЯ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РЕЖИМА НАГРЕВА

2-1. Основные режимы нагрева

Нагрев изделия проходит обычно при изменяющихся температуре (на поверхности) и тепловом потоке. Зависимость их от времени может быть очень разнообразной. Однако можно выделить несколько характерных режимов, которые не встречаются в совершенно чистом виде, но в той или иной степени приближаются к режимам, имеющим место в практике.

В литературе (например, в работе [2]) иногда встречаются указания, что зависимость мощности в нагреваемой детали от времени имеет вид, показанный на рис. 2-1, кривая 1. При объяснении этой зависимости обычно исходят из формулы:

$$p_0 = 10^{-3} H_{me}^2 V \rho \mu f, \text{ вт/м}^2, \quad (2-1)$$

где p_0 — удельная мощность, вт/м^2 ; H_{me} — амплитуда магнитного поля на поверхности, а/м ; ρ — удельное сопротивление, $\text{ом}\cdot\text{м}$; μ — относительная магнитная проницаемость; f — частота, гц .

Формула (2-1) легко получается из формулы (1-26) при замене плотности тока δ_{me} и глубины проникновения тока Δ их значениями [формулы (1-10) и (1-16)]. Поделив выражение (2-1) на H_{me}^2 , получим выражения для r_0 и x_0 . Таким образом, кривая, приведенная на рис. 2-1, дает изменение во времени также активного и внутреннего реактивного сопротивлений при ярко выраженном поверхностном эффекте.

Если предположить, что напряженность магнитного поля постоянна или, что почти то же самое, постоянен ток в индукторе, то при постоянной частоте мощность зависит от произведения $\rho\mu$. Поэтому $V \rho \mu$ часто называют фактором поглощения [2]. При тем-

пературах ниже точки магнитных превращений фактор поглощения возрастает с течением времени вследствие роста удельного сопротивления, тогда как магнитная проницаемость остается почти неизменной. По достижении поверхностью температуры магнитных превращений магнитная проницаемость, а вместе с ней и мощность быстро падают. В дальнейшем удельная мощность снова начинает слабо возрастать за счет медленного роста удельного сопротивления, оставаясь много меньше не только своей максимальной, но и начальной величины.

Однако такое представление процесса нагрева является очень упрощенным и во многих случаях неправильным. Условие даже приблизительного постоянства тока в индукторе соблюдается лишь в отдельных частных случаях. Чаще всего, в особенности при частотах звукового диапазона, применяется стабилизация напряжения генератора, которая приводит к приблизительному постоянству напряжения на зажимах индуктора. При этом ток в индукторе и мощность могут в зависимости от ряда условий меняться различным образом. Рассмотрим наиболее характерные режимы нагрева при приблизительно постоянном напряжении на индукторе.

Если зазор между индуктором и нагреваемой деталью относительно велик и превышает глубину проникновения тока Δ_2 в конце нагрева в несколько раз, то реактивное сопротивление нагруженного индуктора x_u в основном определяется реактивностью рассеяния x_s , которая значительно превышает приведенное реактивное сопротивление x_{2m} и не зависит от режима нагрева.

Следовательно,

$$x_u = x_r + x'_{2m} \approx x_s \gg r_u,$$

где $r_u = r_1 + r'_2$ — эквивалентное активное сопротивление индуктора.

Тогда полное электрическое сопротивление индуктора

$$z_u = \sqrt{x_u^2 + r_u^2} \approx x_s = \text{const}$$

и

$$I_u = \frac{U_u}{z_u} \approx \text{const}.$$

Таким образом, при относительно больших зазорах режим нагрева протекает приблизительно так же, как и при постоянном токе в индукторе.

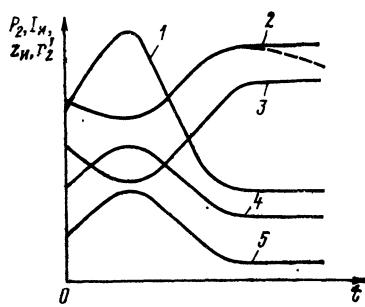


Рис. 2-1. Зависимость мощности, тока в индукторе и электрических параметров от времени
1 — $P_2 = f(t)$ при $I_u = \text{const}$; 2 — $P_2 = f(t)$ при $U_u = \text{const}$ и малом зазоре;
3 — $I_u = f(t)$; 4 — $z_u = f(t)$; 5 — $r_2 = f(t)$

Практически режим, близкий к рассмотренному, обычно осуществляется при сквозном нагреве кузнечных заготовок, так как вследствие необходимости размещения тепловой изоляции в промежутке между индуктором и заготовкой зазор всегда велик по абсолютной величине и в несколько раз превышает горячую глубину проникновения тока Δ_κ .

Этот же режим почти всегда характерен для нагрева на радиочастотах вследствие малой по абсолютному значению величины Δ_κ (см. табл. 1-1).

Существенным образом картина меняется, если зазор между нагреваемым изделием и индуктором относительно мал. В этом случае x'_{2m} , r'_2 и r_i одного порядка с x_s и претерпевают сильное изменение в процессе нагрева. В первой стадии нагрева, пока деталь ферромагнитна, x'_{2m} и r'_2 возрастают вследствие роста удельного сопротивления ρ_2 . Растет и полное электрическое сопротивление z_i индуктора, в то время как ток индуктора $I_i = U_i/z_i = \text{const}/z_i$ падает. В дальнейшем по мере утраты деталью магнитных свойств r'_2 и x'_{2m} падают, падает z_i , а ток I_i возрастает.

Полезная мощность в детали $P_2 = I_i^2 r_2$. При достаточно ярко выраженном поверхностном эффекте, что является, кстати, необходимым условием высокого к. п. д. индуктора (см. § 11-3), рост I_i^2 преобладает над падением r'_2 и мощность к концу нагрева может даже возрасти, как это показано на рис. 2-1 (кривая 2).

Практически вследствие падения напряжения на контурных шинах и понижающем трансформаторе напряжение на индукторе при постоянном напряжении на генераторе несколько падает. Поэтому вместо возрастания мощности к концу нагрева может наблюдаться некоторое ее падение (штриховая линия в конце кривой 2).

Необходимо отметить, что при поверхностной закалке с нагревом глубинного типа изменение параметров r , x и z значительно меньше, чем при сквозном нагреве или нагреве поверхностного типа, когда прогревается слой, превосходящий горячую глубину проникновения тока. Поэтому даже при отсутствии стабилизации напряжения изменение мощности оказывается довольно незначительным и обычно не превышает 30% максимальной ее величины, что дает основание при расчетах принимать удельную мощность постоянной и равной некоторой средней величине. Такой режим энергетически более выгоден, чем режим с постоянным током в индукторе, при котором вследствие резкого колебания потребляемой мощности использование генератора оказывается низким.

Режим с постоянной во времени удельной мощностью мы будем считать основным. В практических работах, приведенных ниже, указано, как произвести приближенный учет изменения удельной мощности во времени. Необходимость в этом обычно возникает при сквозном нагреве кузнечных заготовок. Отметим также, что если горячая глубина проникновения тока Δ_κ оказывается близкой к радиусу нагреваемой цилиндрической или к толщине прямоугольной заготовки, то к концу нагрева электрический к. п. д. индуктора

сильно падает. Вследствие этого даже при незначительном изменении мощности, подводимой к индуктору, мощность в нагреваемой заготовке падает иногда в 2—2,5 раза. Такие режимы являются невыгодными, и их следует применять лишь в крайних случаях, когда нет возможности повысить частоту:

В специальных случаях поверхностного нагрева, а в особенности в высокопроизводительных установках для сквозного нагрева [49], применяется режим нагрева, характеризующийся приблизительно постоянной температурой поверхности. Такой режим часто называют скоростным или ускоренным нагревом. Этот режим требует или специального регулирования мощности, если применяется способ одновременного нагрева, или специальной конструкции индуктора при непрерывно-последовательном нагреве, а также при использовании нагревателей методического действия [49].

2-2. Нагрев при постоянной температуре поверхности

Рассмотрим наиболее простой случай нагрева чисто поверхностного типа считая, что внутри тела источники тепла отсутствуют, т. е. что глубина проникновения тока равна нулю.

Применимально к задачам сквозного нагрева будут введены поправки, учитывающие глубину активного слоя, по которому протекает индуцированный в нагреваемом теле ток.

Здесь и далее мы будем считать, что нагреваемое тело имеет идеальную теплоизоляцию, т. е. что теплоотдача с его поверхности в окружающее пространство отсутствует. Учет теплоотдачи будет производиться в необходимых случаях отдельно.

Основные исходные формулы приводятся без выводов, так как они опубликованы в ряде трудов.

Тело неограниченной толщины с плоской поверхностью. Если требуемая глубина прогрева x_k в десять и более раз меньше толщины плоского тела, то без ущерба для точности расчета толщина тела может быть исключена из рассмотрения.

Температура T на расстоянии x от поверхности выражается формулой [16]:

$$T = T_0 [1 - \Phi(z)], \quad (2-2)$$

где T_0 — температура поверхности, $^{\circ}\text{C}$; $z = x / (2 \sqrt{at})$; a — температуропроводность, $\text{м}^2/\text{сек}$; t — время нагрева, сек ; $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\alpha^2} d\alpha$ — интеграл вероятности.

Значения $\Phi(z)$ содержатся в таблицах [50].

Температуропроводность $a = \lambda/c\gamma$, $\text{м}^2/\text{сек}$. Здесь λ — коэффициент теплопроводности, $\text{вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$; c — теплоемкость, $\text{дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$; γ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Г. А. Разоренов [35] рекомендует брать для расчета процесса нагрева стали $a = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$, что соответствует примерно 800°C и $\lambda = 41,87 \text{ вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$. Последнее число представляет

собой среднее значение в интервале температур 0—800° С. Эксперимент подтверждает целесообразность выбора таких значений.

Используя формулу (2-2), можно получить выражение для удельной мощности в любой момент времени t :

$$p_0 = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \lambda T_0 \Phi_1(0) \left(\frac{dz}{dx} \right)_{x=0}$$

или

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{V \pi a t} = 0,564 \frac{\lambda T_0}{V a t}, \text{ вт/м}^2. \quad (2-3)$$

Здесь $\Phi_1(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2}$ — первая производная интеграла вероятности, значения ее даются в таблицах [50].

Если $x = 0$, то и $z = 0$, а следовательно, $\Phi_1(z) = \Phi_1(0) = 2/\sqrt{\pi}$.

Из формулы (2-3) видно, что в чистом виде режим с постоянной температурой поверхности осуществлен быть не может, так как для этого в момент включения удельная мощность должна быть бесконечно большой. Практически температура поднимается быстро в течение промежутка времени, который значительно меньше, чем общая длительность нагрева, а затем температура поддерживается постоянной. Начальное значение удельной мощности может быть в 10—20 раз больше, чем конечное.

При определенных значениях температуры поверхности T_0 и температуры T_κ различные значения глубины закаленного слоя x_κ будут соответствовать вполне определенному значению $z = z_\kappa$. Это следует прямо из формулы (2-2), если ее переписать в виде:

$$T_\kappa/T_0 = 1 - \Phi(z_\kappa) = \text{const.}$$

Правая часть может быть равна левой только при условии $z_\kappa = \text{const}$. Тогда

$$x_\kappa = 2z_\kappa \sqrt{at_\kappa}. \quad (2-4)$$

Подставив в формулу (2-3) выражение для $\sqrt{at_\kappa}$ из формулы (2-4), выразим удельную мощность в момент t_κ через глубину прогрева x_κ :

$$p_{0\kappa} = 1,128 \frac{\lambda T_0 z_\kappa}{x_\kappa} = \frac{\text{const}}{x_\kappa}. \quad (2-5)$$

Определим среднюю мощность $p_{0\text{ср}}$ за время нагрева t_κ , нужную для расчета затраченной энергии:

$$p_{0\text{ср}} = \frac{1}{t_\kappa} \int_0^{t_\kappa} p_0 dt = 0,564 \frac{\lambda T_0}{t_\kappa V a} \int_0^{t_\kappa} \frac{dt}{V t}.$$

Откуда

$$p_{0\text{ср}} = 2p_{0\kappa} = 1,128 \frac{\Delta T_0}{V a t_\kappa}, \text{ вт/м}^2, \quad (2-6)$$

где $p_{0\text{ср}}$ — средняя удельная мощность за время t_κ .

В качестве примера рассмотрим характерный частный случай: $T_0 = 900^\circ\text{C}$; $T_\kappa = 750^\circ\text{C}$. Тогда $T_\kappa/T_0 = 0,833$, $\Phi(z_\kappa) = 1 - T_\kappa/T_0 = 0,167$ и $z_\kappa = 0,15$. Отсюда имеем:

$$x_\kappa = 0,3 \sqrt{at_\kappa} = 7,5 \cdot 10^{-4} \sqrt{t_\kappa}, \text{ м},$$

$$p_{0\kappa} = \frac{6,37 \cdot 10^3}{x_\kappa}, \text{ вт/м}^2, \quad p_{0\text{ср}} = \frac{12,74 \cdot 10^3}{x_\kappa}, \text{ вт/м}^2.$$

Определим значение термического к. п. д. как отношение энергии, затраченной на сообщение слою x_κ температуры T_κ , к полной энергии, переданной в нагреваемое тело:

$$\eta_t = \frac{Sx_\kappa\gamma cT_\kappa}{Sp_{0\text{ср}}t_\kappa} = \sqrt{\pi} z_\kappa \frac{T_\kappa}{T_0},$$

где S — одновременно нагреваемая поверхность, м^2 . При $t_\kappa \rightarrow \infty$, $T_0 \rightarrow T_\kappa$, $z_\kappa \rightarrow 0$, $\eta_t \rightarrow 0$; при $t_\kappa \rightarrow 0$, $T_0 \rightarrow \infty$, $\eta_t \rightarrow 0$.

Для всех режимов нагрева на произвольную глубину x_κ при постоянных T_0 , T_κ и z_κ термический к. п. д. постоянен. Для поверхностной закалки практический интерес представляет область $T_\kappa/T_0 = 0,75 \div 0,9$.

Плоская стенка конечной толщины.¹ При нагреве плоской стенки с одной стороны распределение температуры по ее сечению определяется по формуле:

$$T = T_0 [1 + S(\beta, \tau)], \quad (2-7)$$

где $\beta = x/D$ — относительная глубина; D — толщина стенки (пластины); $\tau = at/D^2$ — критерий Фурье (относительное время);

$$S(\beta, \tau) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau} \frac{\sin v_n \beta}{v_n}, \quad (2-8)$$

где $v_n = (2n - 1)\pi/2$; n — порядковый номер члена ряда. Обычно достаточно вычислить 5—6 членов ряда, так как ряд быстро сходится.

Расчет времени нагрева на глубину x_κ производится по заданному отношению температуры T_0 к T_κ :

$$\frac{T_0}{T_\kappa} = \frac{1}{1 + S(\beta_\kappa, \tau)} = A. \quad (2-9)$$

Нахождение $\tau = \tau_\kappa$, а следовательно, времени нагрева t_κ производится графически. Для этого достаточно задаться тремя значениями t и построить зависимость $T_0/T_\kappa = f(t)$. В точке пересечения ее с заданным значением A получим время нагрева t .

Удельная мощность в любой момент времени t

$$p_0 = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = \frac{2\lambda T_0}{D} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau}, \text{ вт/м}^2. \quad (2-10)$$

¹ Решение задачи приведено в книге А. В. Лыкова [16]. Здесь оно преобразовано к более удобному виду.

Для средней удельной мощности за время t получим:

$$p_{0 \text{ cp}} = \frac{1}{t} \int_0^t p_0 dt = \frac{2\lambda D T_0}{at} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-v_n^2 \tau}}{v_n^2}.$$

Учитывая, что $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{v_n^2} = 0,5$, имеем:

$$p_{0 \text{ cp}} = \frac{2\lambda D T_0}{at} \left(0,5 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-v_n^2 \tau}}{v_n^2} \right), \text{ вт/м}^2. \quad (2-11)$$

Для достаточно точного вычисления удельной мощности по формулам (2-10) и (2-11) обычно можно ограничиться одним или двумя членами суммы.

Падение удельной мощности со временем выражено в этом случае сильнее, чем для стенки неограниченной толщины.

Если стенка нагревается с двух сторон, то в формулы (2-7) — (2-11) следует вместо толщины стенки D подставить $D/2$. Основанием для этого служит равенство нулю градиента температуры на обратной стороне стенки, окруженной идеальной теплоизоляцией, и в средней плоскости стенки, нагреваемой с двух сторон. В последнем случае это следует из условий симметрии.

Таким образом, имеем

$$\beta = \frac{x}{\left(\frac{D}{2}\right)}; \quad \tau = \frac{at}{\left(\frac{D}{2}\right)^2};$$

$$p_0 = \frac{4\lambda T_0}{D} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau}, \text{ вт/м}^2; \quad (2-12)$$

$$p_{0 \text{ cp}} = \frac{\lambda D T_0}{at} \left(0,5 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-v_n^2 \tau}}{v_n^2} \right), \text{ вт/м}^2. \quad (2-13)$$

В этом случае термический к. п. д.

$$\eta_t = \beta \frac{T_\kappa}{T_0} \frac{1}{2S'}, \quad (2-14)$$

где β_κ — относительная глубина прогретого слоя, причем $\beta_\kappa = x_\kappa/D$, если нагрев производится с одной стороны, и $\beta_\kappa = 2x_\kappa/D$, если с двух;

$$S' = 0,5 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-v_n^2 \tau}}{v_n^2}.$$

При $t_\kappa \rightarrow \infty$, $S' \rightarrow 0,5$, $T_0 \rightarrow T_\kappa$, $\eta_t \rightarrow \beta_\kappa$; при $t_\kappa \rightarrow 0$, $\eta_t \rightarrow 0$.

При одном и том же значении T_0/T_κ термический к. п. д. в рассматриваемом случае выше, чем при нагреве стенки неограниченной толщины.

Если при некотором режиме нагрева имеем T_0, t_κ, D и температуру T_κ на глубине x_κ , то при изменении размера D в m раз и времени t_κ в m^2 раз, получим ту же температуру T_κ на глубине $x'_\kappa = mx_\kappa$. Точки с одинаковыми температурами расположатся на глубине $x' = mx$. Таким образом, подобное распределение температуры будет иметь место при условии:

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= \text{const}, \quad T_\kappa = \text{const}, \quad D' = mD, \quad t'_\kappa = m^2 t_\kappa; \\ x'_\kappa &= mx_\kappa, \quad x' = mx, \quad p'_0 = p_0/m, \quad \eta'_t = \eta_t. \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

Здесь m — коэффициент подобия.

Формулы подобия (2-15) являются общими. Они справедливы также и для стенки неограниченной толщины.

При $\tau < 0,025$ можно пользоваться более простыми формулами для стенки неограниченной толщины.

Цилиндр [13, 16]. В этом случае распределение температуры также выражается формулой (2-7), но отличается значением $S(\beta, \tau)$:

$$S(\beta, \tau) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau} \frac{J_0(v_n \beta)}{v_n J_1(v_n)}, \quad (2-16)$$

где $\tau = at/R_2^2$ — критерий Фурье; R_2 — радиус цилиндра, м; J_0 и J_1 — символы бесселевых функций нулевого и первого порядков первого рода; $\beta = \frac{R}{R_2} = 1 - \frac{x}{R_2}$ — относительная координата; R — переменный радиус, м; x — расстояние от поверхности, м; v_n — корень уравнения $J_0(v_n) = 0$.

Значения $v_n, J_1(v_n)$ и $J_0(v_n \beta)$ имеются в различных таблицах [17, 50].

В этом случае также справедливы формулы подобия (2-15).

Выражения для удельной мощности в момент времени t и средней удельной мощности имеют вид:

$$p_0 = \frac{2\lambda T_0}{R_2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau}, \quad \text{вт}/\text{м}^2, \quad (2-17)$$

$$p_{0 \text{ cp}} = \frac{2\lambda R_2 T_0}{at} \left(0,25 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-v_n^2 \tau}}{v_n^2} \right), \quad \text{вт}/\text{м}^2. \quad (2-18)$$

Удельная мощность падает с течением времени еще сильнее, чем в предыдущих случаях.

Время нагрева на глубину x_κ вычисляется так, как было описано выше.

Определяя термический к. п. д., так же, как и раньше, получим:

$$\eta_t = \frac{1 - \beta_k^2}{4S'} \frac{T_k}{T_0},$$

где

$$S' = 0,25 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-v_n^2 \tau}}{v_n^2}.$$

Если t_k или, что то же самое, τ стремится к бесконечности, то

$$S' \rightarrow 0,25, T_0 \rightarrow T_k, \eta_t \rightarrow 1 - \beta_k^2.$$

Следует отметить, что $1 - \beta_k^2$ представляет собой отношение площади нагретого кольцевого слоя к полной площади поперечного сечения цилиндра.

2-3. Нагрев при постоянной удельной мощности

Рассмотрим как наиболее общий вариант нагрев глубинного типа. Рис. 1-8 показывает, что в прогретом выше точки магнитных превращений слое плотность тока, а следовательно, и мощность спадают медленно. Для приближенного теплового расчета это распределение плотности тока можно заменить более простым, считая, что плотность тока постоянна в пределах слоя, глубина которого (см. § 4-5):

$$\xi = \Delta_k M; \quad (2-19)$$

$$M = \frac{1}{\sqrt{2K \cos \varphi}}, \quad (2-20)$$

где ξ — глубина активного (в отношении выделения тепла) слоя, м; Δ_k — горячая глубина проникновения тока, м; M , K и φ зависят от отношения x_k/Δ_k и от относительной магнитной проницаемости μ (§ 4-4, 4-5); x_k — глубина слоя, нагретого выше температуры магнитных превращений, м.

Значения M приведены в табл. 4-6. Для магнитной проницаемости можно принять среднее значение $\mu = 16$, так как при обычно применяемых удельных мощностях 0,4—1,5 квт/см² ее значения лежат в пределах 9 ÷ 25. Глубина нагретого слоя x_k соответствует глубине слоя, содержащего после закалки не менее 50% мартенсита. В качестве расчетной температуры на внутренней границе слоя примем $T_k = 750^\circ\text{C}$, что, как показывает опыт, справедливо для большинства конструкционных сталей. Это определение глубины закаленного слоя широко распространено и мы будем им пользоваться и в дальнейшем. Таким же образом определяется глубина цементации и прокаливаемости. При электрических и тепловых расчетах это определение особенно удобно, так как при температуре выше 750°C большинство сталей почти полностью теряет магнитные свойства и тогда глубина закаленного слоя x_k совпадает с глубиной слоя, потерявшего магнитные свойства. Если должна

быть известна глубина x'_k слоя, содержащего чистый мартенсит, то необходимо при нагреве глубинного типа определить глубину активного слоя по формулам (2-19) и (2-20). После этого находится глубина x'_k , соответствующая необходимой температуре T'_k .

В качестве дальнейшего упрощения примем, что глубина слоя ξ неизменна во времени и равна своему значению в конце нагрева. В пределах слоя ξ мощность источников тепла постоянна, а за его пределами равна нулю. Опыты показывают, что такое допущение обеспечивает достаточную точность расчета.

Тело неограниченной толщины с плоской поверхностью. Распределение температуры по глубине может быть получено из уравнения Фурье с правой частью, неравной нулю:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{a}{\lambda} w, \quad (2-21)$$

где T — температура в точке x , $^{\circ}\text{C}$; a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{сек}$; λ — коэффициент теплопроводности, $\text{вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$; w — мощность источников тепла, $\text{вт}/\text{м}^3$; t — время, сек;

$$w = p_0/\xi, \text{ вт}/\text{м}^3, \quad (2-22)$$

где p_0 — удельная мощность, $\text{вт}/\text{м}^2$.

При решении уравнения (2-21) предполагаем, что потери тепла во внешнее пространство отсутствуют. Это не вносит существенной ошибки при расчетах режимов поверхностного нагрева, так как реальные значения удельных мощностей во много раз превосходят удельную мощность потерь, которая при температурах $800-900^{\circ}\text{C}$ составляет около $10-15 \text{ вт}/\text{см}^2$.

Решение уравнения (2-21) имеет вид [7, 8, 35].

$$T = \frac{p_0}{4\lambda\xi} \left\{ (x + \xi)^2 \left[F\left(\frac{x + \xi}{2\sqrt{at}}\right) - 1 \right] - (x - \xi)^2 \left[F\left(\frac{x - \xi}{2\sqrt{at}}\right) - \varepsilon \right] \right\}, \quad (2-23)$$

где t — время нагрева, сек; $\varepsilon = +1$ при $x > \xi$, $\varepsilon = -1$ при $x < \xi$;

$$F(z) = \left(1 + \frac{1}{2z^2}\right) \Phi(z) + \frac{1}{z} \Phi_1(z).$$

Значения $F(z)$ приведены в приложении в табл. П-1 [8].

$$\text{При } z \geq 1,17 F(z) \approx 1 + 1/2z^2; \text{ при } z \leq 0,17 F(z) \approx 2/(\sqrt{\pi}z). \quad (2-24)$$

Следует иметь в виду, что

$$\Phi(-z) = -\Phi(z), \quad F(-z) = -(F(z)). \quad (2-25)$$

Если $x = 0$, то $T = T_0$ и формула (2-23) примет вид:

$$T_0 = \frac{p_0\xi}{2\lambda} [F(z_0) - 1], \quad (2-26)$$

где

$$z_0 = \xi/2\sqrt{at}.$$

Обычно для теплового расчета бывают заданы T_0 , T_κ , x_κ и частота f . Зная частоту, определяем ξ . Необходимо найти время нагрева t_κ и удельную мощность p_0 . Удобнее всего это сделать, построив график $T_0/T_\kappa = f(t_\kappa)$, откладывая время нагрева по оси абсцисс (рис. 2-2) и вычисляя T_0/T_κ по формуле:

$$\frac{T_0}{T_\kappa} = \frac{2\xi^2 [F(z_0) - 1]}{(x_\kappa + \xi)^2 \left[F\left(\frac{x_\kappa + \xi}{2\sqrt{at_\kappa}}\right) - 1 \right] - (x_\kappa - \xi)^2 \left[F\left(\frac{x_\kappa - \xi}{2\sqrt{at_\kappa}}\right) + 1 \right]} \quad (2-27)$$

Абсцисса точки на кривой, соответствующая заданному значению $T_0/T_\kappa = A$, определяет искомое время нагрева t_κ .

Удельная мощность на основании соотношения (2-26) определяется по формуле:

$$p_0 = \frac{2\lambda T_0}{\xi [F(z_0) - 1]}, \text{ вт/м}^2. \quad (2-28)$$

Часто нагревается только часть изделия или применяется непрерывно-последовательный способ нагрева. В этих случаях следует учесть утечку тепла в осевом направлении. Тогда удельная мощность будет больше, чем вычисленная по формуле (2-28), и в среднем можно принять:

$$p'_0 = (1,2 \div 1,3) p_0. \quad (2-29)$$

Особенностью кривой $T_0/T_\kappa = f(t_\kappa)$ является наличие максимума (рис. 2-2). При $t_\kappa = 0 T_0/T_\kappa = 1$ и при $t_\kappa \rightarrow \infty T_0/T_\kappa \rightarrow 1$. Такой характер кривой объясняется принятым допущением о независимости глубины активного слоя ξ от времени.

Если $\xi = \text{const}$, то при очень малом времени нагрева, пока влияние теплопроводности мало, зависимость температуры от глубины изобразится прямоугольником так же, как соответствующая зависимость от глубины мощности источников тепла w . Перепад температуры в пределах активного слоя ξ будет отсутствовать, а за его пределами температура будет равна нулю (исходной). С увеличением времени нагрева и одновременным уменьшением удельной мощности начнет, заметным образом, сказываться утечка тепла в глубь металла и появится перепад температуры. Достигнув максимума, он при дальнейшем увеличении времени нагрева будет уменьшаться, стремясь к нулю, что соответствует равномерному длительному прогреву сечения при очень малой удельной мощности.

В самом деле, в начале нагрева глубина активного слоя мала. Поэтому максимум будет отсутствовать и кривая пойдет примерно так, как показано штриховой линией на рис. 2-2. Часть кривой влево от максимума из рассмотрения исключается, и для нахождения времени нагрева используется лишь правая ее часть.

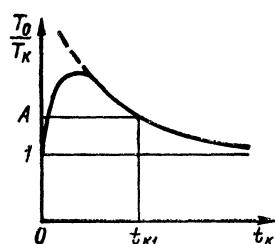


Рис. 2-2. Графическое определение времени нагрева по заданному перепаду температуры при глубинном нагреве с постоянной удельной мощностью

На рисунке 2-2 изображена кривая $T_0/T_\kappa = f(t_\kappa)$, которая имеет максимум и убывает к единице. Пунктирная линия показывает теоретическую зависимость без учета утечки тепла.

Формулу (2-27) можно переписать в виде:

$$\frac{T_0}{T_K} = \frac{2 \left[F \left(\frac{\frac{\xi}{x_K}}{\sqrt{\frac{at_K}{x_K^2}}} \right) - 1 \right]}{\left(\frac{x_K}{\xi} + 1 \right)^2 \left[F \left(\frac{1 + \frac{\xi}{x_K}}{\sqrt{\frac{at_K}{x_K^2}}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{x_K}{\xi} - 1 \right)^2 \left[F \left(\frac{1 - \frac{\xi}{x_K}}{\sqrt{\frac{at_K}{x_K^2}}} \right) + 1 \right]} \quad (2-30)$$

Из формулы (2-30) видно, что полное подобие в распределении температуры по сечению при изменении x_K в m раз может быть получено при условиях:

$$\frac{\xi}{x_K} = \frac{\Delta_K}{x_K} \frac{1}{\sqrt{2K \cos \phi}} = \text{const}, \quad \frac{at_K}{x_K^2} = \text{const}.$$

Если принять, что магнитная проницаемость сердцевины постоянна, то первую формулу можно переписать в виде:

$$\frac{\Delta_K}{x_K} = \text{const}.$$

Отсюда получим:

$$\text{если } x'_K = mx_K, \text{ то } t'_x = m^2 t_K, \quad f' = f/m^2, \quad p'_0 = p_0/m, \quad \eta'_t = \eta_t.$$

Таким образом, для соблюдения полного подобия должна быть изменена и частота, что было несущественно при чисто поверхностном типе нагрева, так как предполагалось, что частота всегда достаточно велика для соблюдения неравенства $x_K \gg \Delta_K$.

Если $\xi = 0$, что можно принять если $\xi_K < 0,3x_K$, то имеем нагрев поверхного типа. Формула (2-23) примет вид [8]:

$$T = \frac{p_0 x}{\lambda} \left[F_1 \left(\frac{x}{a \sqrt{at}} \right) - 1 \right], \quad (2-31)$$

где

$$F_1(z) = \frac{1}{2z} \Phi_1(z) + \Phi(z).$$

Значения $F_1(z)$ приведены в табл. П-1.

$$\text{При } z \leq 0,1 \quad F_1(z) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(z + \frac{1}{z} \right), \quad \text{при } z \geq 1,14 \quad F_1(z) \approx 1. \quad (2-32)$$

Тогда на основании формул (2-31) и (2-32) при $x = 0$ имеем:

$$T_0 = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} p_0 \sqrt{t_K} \quad (2-33)$$

или, обозначив

$$T_1 = p_0 \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}}, \quad (2-34)$$

получим

$$T_0 = T_1 \sqrt{t_K}. \quad (2-35)$$

Таким образом, видим, что при $p_0 = \text{const}$ T_1 представляет собой температуру в конце первой секунды нагрева.

При принятых значениях a и λ имеем:

$$T_1 = 6,74 \cdot 10^5 p_0.$$

Отношение T_0/T_κ получим, поделив уравнение (2-33) на (2-31):

$$\frac{T_0}{T_\kappa} = \frac{1}{\sqrt{\pi} z_\kappa [F_1(z_\kappa) - 1]}, \quad (2-36)$$

где

$$z_\kappa = x_\kappa / (2 \sqrt{at_\kappa}).$$

Эта зависимость не имеет максимума. При $t_\kappa \rightarrow 0$ $T_0/T_\kappa \rightarrow \infty$ и при $t_\kappa \rightarrow \infty$ $T_0/T_\kappa \rightarrow 1$.

Формула (2-36) показывает, что $T_0/T_\kappa = \text{const}$, если $z_\kappa = \text{const}$. Отсюда при заданных значениях T_0 и T_κ можно получить зависимости p_0 и x_κ от t_κ подобно тому, как это было сделано в предыдущем параграфе. Считая, как и прежде, $T_0 = 900^\circ\text{C}$ и $T_\kappa = 750^\circ\text{C}$, получим:

$$z_\kappa = 0,1; x_\kappa = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{t_\kappa}, \text{ м}; p_0 = 6670/x_\kappa, \text{ кПа}.$$

Отсюда видно, что при $p_0 = \text{const}$ время нагрева на заданную глубину x_κ значительно больше, чем при $T_0 = \text{const}$.

Исследуем зависимость термического к. п. д. от относительного перегрева для простого случая нагрева чисто поверхностного типа.

Значение полезной энергии найдем, зная массу металла, нагретого до температуры T_κ , и его теплоемкость c :

$$W_\kappa = G_\kappa c T_\kappa = S x_\kappa \gamma c T_\kappa, \text{ дж},$$

где G_κ — масса нагретого металла, кг; γ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; c — теплоемкость, в $\text{дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$; S — одновременно нагреваемая площадь, м^2 .

Полная энергия

$$W = S p_0 t_\kappa, \text{ дж}.$$

Термический к. п. д.

$$\eta_t = \frac{W_\kappa}{W} = \frac{x_\kappa \gamma c T_\kappa}{p_0 t_\kappa}.$$

Подставляя вместо p_0 его значение из формулы (2-33), получим:

$$\eta_t = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{T_\kappa}{T_0} z_\kappa.$$

Здесь $z_\kappa = x_\kappa / (2 \sqrt{at_\kappa})$ есть функция T_κ/T_0 и находится путем графического решения уравнения (2-36). Зависимость термического к. п. д. от относительного перепада температуры представлена на рис. 2-3. К. п. д. достигает максимального значения, равного 0,405, при $T_\kappa/T_0 = 0,401$.

На рис. 2-4 приведено примерное распределение температуры в нагреваемом теле. Площадь, ограниченная кривой, пропорциональна полной энергии, затраченной на нагрев. Площади S_1 и S_3 пропорциональны тепловым потерям: S_1 — потерям на перегрев слоя x_k выше температуры закалки и S_3 — на нагрев сердцевины. Площадь S_2 соответствует энергии, затраченной на полезный нагрев слоя x_k . Поэтому для термического к. п. д. можно написать выражение:

$$\eta_t = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3}.$$

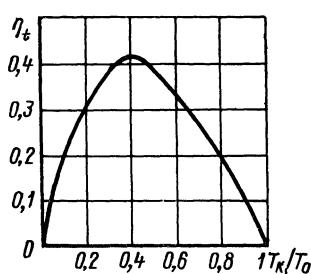


Рис. 2-3. Зависимость термического к. п. д. от относительного перепада температуры

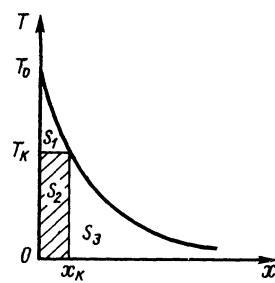


Рис. 2-4. Пояснение к зависимости термического к. п. д. от перепада температуры

Если при неизменной глубине слоя x_k уменьшать время нагрева t_k , то будут увеличиваться T_0 и площадь S_1 при одновременном уменьшении площади S_3 . Если t_k стремится к нулю, то T_0 стремится к бесконечности. К бесконечности стремится также и площадь S_1 . Термический к. п. д. при этом стремится к нулю. Если t_k стремится к бесконечности, T_0 стремится к T_k и площадь S_3 стремится к бесконечности, так как толщина тела принята бесконечно большой. Поэтому к. п. д. опять стремится к нулю. В промежутке при указанном выше соотношении T_k/T_0 , к. п. д. достигает максимума.

В реальных условиях $\frac{T_k}{T_0} > 0,8$ и, если толщина изделия много больше x_k , к. п. д. меньше 20%.

Если толщина изделия конечна (одного порядка с x_k), то с приближением T_k/T_0 к единице к. п. д. стремится к соотношению:

$$\eta_t = x_k/D,$$

где D — толщина изделия. Термический к. п. д. в этом случае при прежних значениях перепада температуры в слое x_k , будет выше и может достигать 40—60%.

Нагрев широкой пластины. Если нагрев ведется с одной стороны, а другая имеет идеальную теплоизоляцию, то решение уравнения (2-21) имеет вид:¹

$$T = \frac{\rho_0 D}{\lambda} [\tau + S(\alpha, \beta, \tau)], \quad (2-37)$$

где D — толщина пластины, m ; $\tau = at/D^2$ — критерий Фурье; $\alpha = \xi/D$ — относительная глубина активного слоя; $\beta = x/D$ — относительная координата рассматриваемой точки;

$$S(\alpha, \beta, \tau) = \frac{2}{\pi^3 \alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cos(n\pi\beta) \sin(n\pi\alpha) e^{-\pi^2 n^2 \tau}.$$

В таком виде выражение для $S(\alpha, \beta, \tau)$ представляет собой медленно сходящийся ряд, в котором приходится вычислять много членов. Однако этот ряд разбивается на два: первый, не содержащий экспоненты, медленно сходящийся, но который может быть суммирован точно, и второй, — быстро сходящийся.

Для преобразования первого ряда воспользуемся формулой:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nx}{n^3} = \frac{\pi^2 x}{6} + \frac{\pi x^2}{4} + \frac{x^3}{12} \quad (0 < x < 2\pi).$$

Первую сумму легко разбить на две, содержащие только синусы, воспользовавшись формулой для суммы синусов: если $\alpha > \beta$,

$$\sin(n\pi\alpha) \cos(n\pi\beta) = \frac{1}{2} [\sin n\pi(\alpha + \beta) + \sin n\pi(\alpha - \beta)];$$

если $\alpha < \beta$,

$$\sin(n\pi\alpha) \cos(n\pi\beta) = \frac{1}{2} [\sin n\pi(\alpha + \beta) - \sin n\pi(\alpha - \beta)].$$

Тогда получим:

1) при $\alpha > \beta$ — (область внутри активного слоя)

$$S(\alpha, \beta, \tau) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\alpha}{3} - \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2} + \frac{\alpha(\alpha^2 + 3\beta^2)}{6} - \frac{2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cos(n\pi\beta) \sin(n\pi\alpha) e^{-\pi^2 n^2 \tau} \right]. \quad (2-38)$$

2) при $\alpha < \beta$ (область за пределами активного слоя)

$$S(\alpha, \beta, \tau) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\alpha}{3} - \alpha\beta + \frac{\alpha(\alpha^2 + 3\beta^2)}{6} - \frac{2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cos(n\pi\beta) \sin(n\pi\alpha) e^{-\pi^2 n^2 \tau} \right]. \quad (2-39)$$

¹ Формула (2-37) и последующие формулы для распределения температуры заимствованы из [8], но для удобства пользования им придан несколько иной вид.

На границе активного слоя при $\alpha = \beta$ обе формулы дают одинаковый результат.

При $\tau > 0,3$ члены второго ряда составляют менее 5% от соответствующих членов первого. Поэтому вторым рядом можно пренебречь. Тогда имеем:

$$\alpha > \beta, S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\alpha}{3} - \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2} + \frac{\alpha(\alpha^2 + 3\beta^2)}{6} \right];$$

$$\alpha < \beta, S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = \frac{1}{3} - \beta + \frac{\alpha^2 + 3\beta^2}{6}.$$

Время нагрева t_κ и удельная мощность p_0 находятся подобно тому, как это было описано выше, с помощью формул:

$$\frac{T_0}{T_\kappa} = \frac{\tau + S(\alpha, 0, \tau)}{\tau + S(\alpha, \beta_\kappa, \tau)} = f(t), \quad (2-40)$$

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{D[\tau + S(\alpha, 0, \tau)]}, \text{ вт/м}^2, \quad (2-41)$$

где $S(\alpha, 0, \tau)$ и $S(\alpha, \beta_\kappa, \tau)$ — значения функции S при $x = 0$ ($\beta = 0$) и $x = x_\kappa$ ($\beta = \beta_\kappa$) соответственно.

При непрерывно-последовательном нагреве или при нагреве узкого участка в значение удельной мощности вводится поправка по формуле (2-29).

При $\tau > 0,3$ время нагрева может быть сразу найдено из решения уравнения (2-40), так как в этом случае $S(\alpha, \beta, \tau)$ перестает зависеть от τ :

$$t_\kappa = \frac{D^2}{a} \frac{\frac{S(\alpha, 0) - \frac{T_0}{T_\kappa} S(\alpha, \beta_\kappa)}{\frac{T_0}{T_\kappa} - 1}}{T_\kappa}.$$

Если $\xi < 0,3 x_\kappa$, то, как и прежде, принимаем $\xi \approx 0$ и, следовательно, $\alpha \approx 0$. Тогда вместо формул (2-38) и (2-39) имеем одну более простую формулу:

$$S(\beta, \tau) = \frac{1}{3} - \beta + \frac{\beta^2}{2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos(n\pi\beta) e^{-n^2\pi^2\tau};$$

$$\text{при } \tau > 0,3 \quad S(\beta, \tau) \approx S(\beta) = \frac{1}{3} - \beta + \frac{\beta^2}{2}.$$

Значения $S(\alpha, \beta, \tau)$ приведены в табл. П-2. При $\tau < 0,05$ проще пользоваться формулами (2-23), (2-27) и (2-28) для тела бесконечной толщины с плоской поверхностью.

Если толщину нагреваемого тела изменить в m раз, то полное подобие в распределении температуры будет получено при соблюдении условий:

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= \text{const}, \quad T_\kappa = \text{const}, \quad D' = mD, \quad x'_\kappa = mx_\kappa, \\ t'_\kappa &= m^2 t_\kappa, \quad p'_0 = p_0/m, \quad f' = f/m^2. \end{aligned} \right\} \quad (2-42)$$

Если частота настолько высока, что во всех пересчитываемых режимах сохраняется нагрев поверхностного типа, то из условий подобия частоту можно исключить, оставляя ее неизменной.

При нагреве глубинного типа в приближенных расчетах можно применять неполное подобие, оставляя частоту постоянной. Это приведет к некоторому преувеличению времени нагрева и преуменьшению удельной мощности, если $m < 1$, и, наоборот, к небольшому преуменьшению времени нагрева и к преувеличению удельной мощности, если $m > 1$. Необходимо следить, чтобы при пересчете сохранялся глубинный тип нагрева.

Термический к. п. д. определится, как и прежде, общей формулой:

$$\eta_t = \lambda x_k T_k / (ap_0 t_k)$$

для любого типа нагрева.

Подставив значение p_0 из выражения (2-41), получим:

$$\eta_t = \beta_k \frac{T_k}{T_0} \left[1 + \frac{S(\alpha, 0, \tau)}{\tau} \right].$$

При $\tau \rightarrow \infty$, $t_k \rightarrow \infty$ $T_0 \rightarrow T_k$ и $\eta_t \rightarrow \beta_k$.

При нагреве пластины с двух сторон во все формулы вместо D подставляется $D/2$ (середина сечения соответствует в этом случае задней стороне стенки толщиной $D/2$ с идеальной тепловой изоляцией — см. § 2-2).

Нагрев цилиндра. Из решения уравнения теплопроводности получим:

$$T = 2 \frac{p_0 R_2}{\lambda} [\tau + S(\alpha, \beta, \tau)], \quad (2-43)$$

где T — температура на расстоянии x от поверхности; R_2 — радиус цилиндра, m ; $\alpha = 1 - \xi/R_2$ — относительная глубина активного слоя; $\beta = 1 - x/R_2$ — относительная координата;

$$S(\alpha, \beta, \tau) = -\frac{2\alpha}{1 - \alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [J_0(v_n)]^2} J_0(v_n \beta) \left(1 - e^{-v_n^2 \tau} \right),$$

где v_n — корни уравнения $J_1(v_n) = 0$. Значения v_n , а также $J_0(v_n x)$ и $J_1(v_n x)$ содержатся в таблицах [17, 50].

Формула для $S(\alpha, \beta, \tau)$ упрощается, если разбить ее на две суммы и выразить первую из них в конечном виде. Тогда имеем:

1) при $\beta > \alpha$ — (область внутри активного слоя ξ):

$$S(\alpha, \beta, \tau) = \frac{2\alpha}{1 - \alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [J_0(v_n)]^2} J_0(v_n \beta) e^{-v_n^2 \tau} - \frac{2\alpha^2}{8(1 - \alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta); \quad (2-44)$$

2) при $\beta < \alpha$ (область вне активного слоя ξ)

$$S(\alpha, \beta, \tau) = \frac{2\alpha}{1 - \alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [J_0(v_n)]^2} J_0(v_n \beta) e^{-v_n^2 \tau} + \frac{\beta^2}{4} + \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^2}{2(1 - \alpha^2)} \ln \alpha. \quad (2-45)$$

При $\beta = \alpha$ формулы (2-44) и (2-45) дают одинаковый результат.

Если $\tau > 0,2$, то можно считать, что $S(\alpha, \beta, \tau)$ не зависит от τ . Тогда имеем:

при $\beta > \alpha$

$$S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = -\frac{\alpha^2}{8(1 - \alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta); \quad (2-46)$$

при $\beta < \alpha$

$$S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = \frac{\beta^2}{4} + \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^2 \ln \alpha}{2(1 - \alpha^2)}. \quad (2-47)$$

Время нагрева и удельная мощность определяются по формулам:

$$\frac{T_0}{T_\kappa} = \frac{\tau + S(\alpha, 1, \tau)}{\tau + S(\alpha, \beta_\kappa, \tau)} = f(t_\kappa); \quad (2-48)$$

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{2R_2[\tau + S(\alpha, 1, \tau)]}, \text{ вт/м}^2, \quad (2-49)$$

где $S(\alpha, 1, \tau)$ — значение функции S при $x = 0$ ($\beta = 1$); $S(\alpha, \beta_\kappa, \tau)$ — значение функции S при $x = x_\kappa$ ($\beta = \beta_\kappa$). При $\tau > 0,2$

$$t_\kappa = \frac{R_2^2}{a} \frac{s(\alpha, 1) - \frac{T_0}{T_\kappa} S(\alpha, \beta_\kappa)}{\frac{T_0}{T_\kappa} - 1}.$$

Если нагреву подвергается не вся деталь, а лишь некоторый участок на ее поверхности или применяется непрерывно-последовательный нагрев, то при окончательном вычислении удельной мощности вводится поправка по формуле (2-29).

Если $\xi < 0,3 x_\kappa$ (нагрев поверхностного типа) считаем $\xi \approx 0$ и $\alpha \approx 1$. Тогда формула для функции S упростится:

$$S(\beta, \tau) = \frac{\beta^2}{4} - \frac{1}{8} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(v_n \beta)}{v_n^2 J_0(v_n)} e^{-v_n^2 \tau}.$$

При $\tau > 0,2$

$$S(\beta, \tau) \approx S(\beta) = \frac{\beta^2}{4} - \frac{1}{8}.$$

Значения $S(\alpha, \beta, \tau)$ приведены в табл. П-3.

Для пересчетов режимов нагрева пригодны формулы подобия (2-42), но в них D следует заменить на R_2 .

Термический к. п. д. определяется как обычно.

Полное количество тепла на единицу высоты цилиндра

$$W = 2\pi R_2 p_0 t_k.$$

Полезное тепло, затраченное на нагрев слоя x_k до заданной температуры T_k :

$$W_k = \pi [(R_2^2 - (R_2 - x_k)^2) c \gamma T_k] = \frac{\lambda}{a} \pi T_k x_k R_2 (1 + \beta_k);$$

Тогда $\eta_t = \frac{\lambda T_k x_k R_2 (1 + \beta_k)}{2 a p_0 t_k}.$

Подставив вместо p_0 его значение из выражения (2-49), получим:

$$\eta_t = \frac{T_k}{T_0} (1 - \beta_k^2) \left[1 + \frac{S(\alpha, 1, \tau)}{\tau} \right].$$

Если $\tau, t_k \rightarrow \infty$, то $T_0 \rightarrow T_k$ и $\eta_k \rightarrow (1 - \beta_k^2)$.

2-4. Примеры тепловых расчетов

Тело неограниченной толщины с плоской поверхностью. Задано: $x_k = 0,5 \text{ см}$, $f = 2500 \text{ ед}$; $T_0 = 900^\circ \text{ С}$; $T_k = 750^\circ \text{ С}$. Определить p_0 и t_k .

Решение. 1. $\frac{T_0}{T_k} = \frac{900}{750} = 1,2$.

2. Принимая $\mu_2 = 16$, из табл. 4-6 находим ξ :

$$\Delta_k = \frac{0,5}{\sqrt{2500}} = 0,01 \text{ м}; \frac{x_k}{\Delta_k} = 0,5, \xi = 0,00614 \text{ м.}$$

3. Задаемся $t_k = 4 \text{ сек}$:

$$z_0 = \frac{\xi}{2 \sqrt{at_k}} = \frac{0,00614}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2} = 0,614;$$

$$z_1 = \frac{x_k + \xi}{2 \sqrt{at_k}} = \frac{0,01114}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 1,114;$$

$$z_2 = \frac{x_k - \xi}{2 \sqrt{at_k}} = - \frac{0,00114}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = - 0,114.$$

Из табл. П-1 находим:

$$F(z_0) = 2,068; F(z_1) = 1,387; F(z_2) = - 9,96.$$

По формуле (2-27) получим:

$$\frac{T_0}{T_k} = 2 \cdot 0,614^2 \frac{2,068 - 1}{1,114^2 (1,387 - 1) - (-0,114)^2 (-9,96 + 1)} = 1,345.$$

Так как перепад температуры слишком велик, увеличиваем время нагрева до $t_k = 9$ сек.

Тогда $z_0 = 0,41$; $z_1 = 0,743$; $z_2 = -0,076$; $F(z_0) = 2,905$; $F(z_1) = 1,784$; $F(z_2) = -14,94$, $T_0/T_k = 1,242$.

При $t_k = 16$ сек имеем:

$z_0 = 0,307$; $z_1 = 0,557$; $z_2 = -0,076$; $F(z_0) = 3,789$; $F(z_1) = 2,229$; $F(z_2) = -19,95$; $T_0/T_k = 1,185$.

Строим график зависимости $T_0/T_k = f(t_k)$ и определяем требуемое время нагрева t_k , как показано на рис. 2-5 (кривая 1). Из графика находим $t_k = 13,6$ сек.

Далее, по формуле (2-28) определяем ρ_0 : $z_0 = 0,00614/(2 \cdot 2,5 \times 10^{-3} \cdot 3,69) = 0,333$; $F(z_0) = 3,513$; $\rho_0 = 2 \cdot 41,87 \cdot 900/[0,00614(3,513 - 1)] = 4,9 \cdot 10^6 \text{ вт}/\text{м}^2$.

Если нагревается участок, то $\rho'_0 = 1,25 \cdot 0,49 \cdot 10^6 = 6,12 \cdot 10^6 \text{ вт}/\text{м}^2 = 0,612 \text{ квт}/\text{см}^2$.

Широкая пластина. Задано: $D = 2,5 \text{ см}$; $x_k = 0,5 \text{ см}$; $f = 2500 \text{ гц}$; $T_0 = 900^\circ \text{ С}$; $T_k = 750^\circ \text{ С}$.

Определить ρ_0 и t_k .

Решение. $T_0/T_k = 1,2$; $\xi = 0,00614 \text{ м}$; $\alpha = \xi/D = 0,246$; $\beta_k = x_k/D = 0,2$.

Задаемся $\tau = 0,05$. Из табл. П-2 с помощью интерполяции определяем: $S(0,246; 0; 0,05) = 0,1040$; $S(0,246; 0,2; 0,05) = 0,067$; по формуле (2-40): $T_0/T_k = (0,05 + 0,1040)/(0,05 + 0,067) = 1,316$.

Задаемся $\tau = 0,1$. Имеем: $S(0,246; 0; 0,1) = 0,1528$; $S(0,246; 0,2; 0,1) = 0,1070$; $T_0/T_k = 1,22$.

Задаемся $\tau = 0,15$. Тогда получим: $S(0,246; 0,2; 0,15) = 0,1802$; $S(0,246; 0,2; 0,15) = 0,127$; $T_0/T_k = 1,19$.

По кривой 2 на рис. 2-5 находим: $t_k = 13$ сек.

Определяем ρ_0 :

$$\tau = \frac{at_k}{D^2} = \frac{6,25 \cdot 10^{-6} \cdot 13}{6,25 \cdot 10^{-4}} = 0,13;$$

$S(0,246; 0; 0,13) = 0,1692$; $\rho_0 = 41,87 \cdot 900/[0,025 \cdot (0,13 + 0,1692)] = 5,05 \cdot 10^6 \text{ вт}/\text{м}^2$; $\rho'_0 = 1,25 \cdot 5,05 \cdot 10^6 = 6,31 \cdot 10^6 \text{ вт}/\text{м}^2 = 0,631 \text{ квт}/\text{см}^2$, т. е. мы получили результат, почти не отличающийся от предыдущего. Это объясняется тем, что обратная сторона пластины при таком режиме нагревается только до $10,6^\circ \text{ С}$, чем вполне можно пренебречь. Таким образом при нагреве на относительно малые глубины ($x_k < 0,25 D$) часто можно использовать формулы, полученные для тела неограниченной толщины. Однако если $T_0/T_k < 1,1$, ошибка будет быстро возрастать, так как температура на противоположной стороне пластины будет сильно возрастать, что окажет влияние на распределение температуры в целом.

Приведенный пример соответствует также случаю нагрева пластины толщиной $D = 5 \text{ см}$, но с двух сторон.

Цилиндр. Задано $R_2 = 2,5 \text{ см}$; $x_k = 0,5 \text{ см}$; $f = 2500 \text{ гц}$; $T_0 = 900^\circ \text{ С}$; $T_k = 750^\circ \text{ С}$.

Определить ρ_0 и t_k .

Решение. $T_0/T_k = 1,2$; $\xi = 0,00614 \text{ м}$;

$$\alpha = 1 - \frac{\xi}{R_2} = 0,754; \quad \beta_k = 1 - \frac{x_k}{R_2} = 0,8.$$

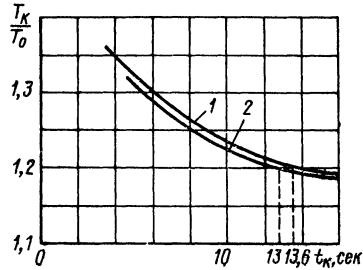


Рис. 2-5. Пример определения времени нагрева плоского тела

1 — тело неограниченной толщины;
2 — пластина толщиной 2,5 см

Задаемся $\tau = 0,05$. Из табл. П-3 определяем: $S(0,754; 1; 0,05) = 0,0424$; $S(0,754; 0,8; 0,05) = 0,0230$. Следовательно; $T_0/T_k = 0,05 + 0,0424/(0,05 + 0,0230) = 1,267$.

Задаемся $\tau = 0,1$. Тогда имеем:
 $S(0,754; 1; 0,1) = 0,0579$; $S(0,754; 1; 0,1) = 0,0316$, следовательно $T_0/T_k = 1,20$.

Полученное соотношение совпадает с заданным.

Время нагрева $t_k = \tau R^2/a = 10$ сек.

По формуле (2-49) получим:

$$p_0 = 41,87 \cdot 900 / [2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} (0,1 + 0,0579)] = 4,78 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2, \quad p'_0 = 1,25 \cdot 4,78 \cdot 10^6 = 5,97 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2 = 0,597 \text{ квт/см}^2.$$

В этом случае p_0 и t_k заметно меньше, чем в двух предыдущих, что свидетельствует о более высоком термическом к. п. д.

2-5. Приближенное определение времени нагрева и удельной мощности при сквозном нагреве цилиндрических заготовок

Расчет по средней удельной мощности. Применимально к нагревателям периодического действия, работающим при $U_n = \text{const}$ и нагревателям методического действия с постоянным шагом витков используем расчет при постоянной удельной мощности, выбрав ее по среднему значению за время нагрева.

Так как длительность сквозного нагрева значительно больше, чем поверхностного, то обычно $\tau > 0,2$. Поэтому расчет можно производить по упрощенным формулам (2-47) и (2-48). Время нагрева можно вычислить однозначно. Для расчета задаются температура поверхности T_0 и температура на оси T_n .

Тогда можно написать:

$$\frac{T_0}{T_n} = \frac{\tau + S(\alpha, 1)}{\tau + S(\alpha, 0)} = f(t).$$

Отсюда имеем, заменяя в выражении для τ радиус R_2 на диаметр D_2 :

$$t_k = \frac{D_2^2}{4a} \frac{S(\alpha, 1) - T_0/T_k S(\alpha, 0)}{\frac{T_0}{T_n} - 1}, \text{ сек.} \quad (2-50)$$

Нагрев под ковку и штамповку производится обычно до температуры 1200—1300° С. Принимаем в качестве средних значения тепловых коэффициентов при 800° С. Тогда имеем: $c = 6,68 \cdot 10^2 \text{ дж/(кг·град)}$, $\lambda = 33,5 \text{ вт/(м·град)}$, $a = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$.

В практике допускают перепад температуры между поверхностью и осью заготовки $\Delta T = 100 \div 150^\circ \text{ С}$. За промежуток времени между концом нагрева и началом пластической обработки температура выравнивается в достаточной степени вследствие теплоотдачи во внешнюю среду и теплопроводности. Если считать $T_0 = 1300^\circ \text{ С}$, то температура на оси T_n при $\Delta T = 100^\circ \text{ С}$ равна 1200° С и при $\Delta T = 150^\circ \text{ С}$ равна 1150° С.

Однако при расчете необходимо учесть следующие два обстоятельства, не рассмотренные при выводе формулы (2-50).

1. Благодаря большому времени нагрева удельная мощность мала и составляет $0,2 - 0,05 \text{ квт}/\text{см}^2$. Поэтому существенное влияние на характер распределения температуры в сечении оказывают тепловые потери в окружающее пространство. Наличие тепловых потерь приводит к уменьшению перепада температуры в пределах активного слоя ξ по сравнению с расчетным, а следовательно, сокращает время нагрева.

2. Удельная мощность в начале нагрева, когда заготовка ферромагнитна больше, чем в конце. Это также сокращает время нагрева. Эти вопросы рассмотрены в ряде опубликованных работ (например, [40, 41]). Ниже приводится упрощенный, но пригодный для практики способ расчета.

Опыт показывает, что для получения правильного результата следует в формулу (2-50) подставлять удвоенное значение температурного перепада.

Рассмотрим указанные выше случаи.

1. Перепад температуры $\Delta T = 100^\circ \text{C}$, $T_0 = 1300^\circ \text{C}$, $T_{\text{ц}} = 1200^\circ \text{C}$.

Принимаем для расчета $\Delta T' = T_0 - T_{\text{ц}} = 200^\circ \text{C}$. Тогда $T_{\text{ц}}' = 1100^\circ \text{C}$ и $T_0/T_{\text{ц}}' = 1,18$. $T_{\text{ц}}'$ — расчетная температура на оси заготовки. Подставив в формулу (2-50) значение $T_0/T_{\text{ц}}$ и приведенные выше тепловые коэффициенты, получим:

$$t_{\kappa} \approx 22 \cdot 10^4 [S(\alpha, 1) - 1,18S(\alpha, 0)], \text{ сек.} \quad (2-51)$$

2. Перепад температуры $\Delta T = 150^\circ \text{C}$; $T_0 = 1300^\circ \text{C}$; $T_{\text{ц}} = 1150^\circ \text{C}$. Для расчета принимаем $T_{\text{ц}} = 1000^\circ \text{C}$. Тогда $T_0/T_{\text{ц}} = 1,3$ и время нагрева

$$t_{\kappa} \approx 13 \cdot 10^4 [S(\alpha, 1) - 1,3S(\alpha, 0)], \text{ сек,} \quad (2-52)$$

где $S(\alpha, 1)$ и $S(\alpha, 0)$ находятся из табл. П-3.

Полезная удельная мощность находится по формуле (2-49) при $S(\alpha, 1, \tau) \approx S(\alpha, 1)$.

Полная полезная мощность

$$P_T = \pi D_2 a p_0,$$

где a — длина заготовки.

В расчетные формулы входит относительная глубина активного слоя α , которая, как и прежде, вычисляется для конца нагрева. В данном случае глубина активного слоя равна горячей глубине проникновения тока [формула (1-29)].

Однако в дальнейшем будет показано (§ 11-4), что равенство $\xi = \Delta_{\kappa}$ справедливо лишь до тех пор, пока $\Delta_{\kappa} \leq 0,4 R_2$. Когда $\Delta_{\kappa} > 0,4 R_2$, глубина активного слоя перестает увеличиваться с понижением частоты и $\xi \approx 0,4 R_2 = 0,2 D_2$. Таким образом имеем:

$$\alpha_{\text{пред}} \approx 0,6. \quad (2-53)$$

Поэтому в табл. П-3 значения $S(\alpha, \beta, \tau)$ даны лишь для $\alpha \leq 0,6$.

Примерно с той же точностью можно определить время нагрева, положив $\xi = 0$ и $\alpha = 1$, если вместо диаметра цилиндра D_2 подставить в формулы (2-51) и (2-52) расчетный диаметр $D'_2 = D_2 - \xi$.

Тогда $S(\alpha; 1) = S(1; 1) = 0,125$ и $S(\alpha; 0) = S(1; 0) = -0,125$. Формулы (2-51) и (2-52) примут вид:

$$\Delta T = 100^\circ C, t_\kappa \approx 5,9 \cdot 10^4 D'_2, \text{ сек}, \quad (2-54)$$

$$\Delta T = 150^\circ C, t_\kappa \approx 3,7 \cdot 10^4 D'_2, \text{ сек}. \quad (2-55)$$

Зная время нагрева, можно определить среднюю полезную мощность и через теплосодержание заготовки:

$$P_T = \frac{G c T_{cp}}{t_\kappa} = 8,4 \cdot 10^5 \frac{G}{t_\kappa} \text{ вт}, \quad (2-56)$$

где G — масса заготовки в kg ; $c = 6,68 \cdot 10^2 \text{ дж/(кг·град)}$ — средняя теплоемкость; $T_{cp} = 1250^\circ C$ — средняя по сечению температура заготовки.

В качестве примера рассмотрим нагрев заготовки диаметром 100 $мм$, длиной 300 $мм$, частота 2500 $Гц$, допустимый перепад температуры $150^\circ C$. Масса заготовки

$$G = \frac{\pi D_2^2}{4} a\gamma = \frac{\pi 0,1^2}{4} 0,3 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 18,4 \text{ кг};$$

Горячая глубина проникновения тока

$$\Delta_\kappa = \frac{0,5}{\sqrt{2500}} = 10^{-2} \text{ м} < 0,2 R_2$$

Расчетный диаметр заготовки $D'_2 = 0,1 - 0,01 = 0,09 \text{ м}$;

время нагрева $t_\kappa = 3,7 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^{-4} = 300 \text{ сек}$;

полезная мощность

$$P_T = 8,4 \cdot 10^5 \frac{18,4}{300} = 5,08 \cdot 10^4 \text{ вт} = 50,8 \text{ квт};$$

удельная полезная мощность

$$p_0 = \frac{5,08 \cdot 10^4}{\pi \cdot 0,1 \cdot 0,3} = 5,4 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2.$$

Расчет при постоянной температуре поверхности. При расчете времени нагрева используются формулы (2-16) — (2-18).

Как и в предыдущем случае заданными являются температура на поверхности T_0 , которая поддерживается постоянной, и температура на оси заготовки T_u . Отношение этих температур в конце нагрева

$$\frac{T_0}{T_u} = \frac{1}{1 + S(0, \tau)} = f(\tau), \quad (2-57)$$

так как при сквозном нагреве на глубину $x = R_2$ $\beta = 0$.

Как и в предыдущем случае, для приближенного учета активного слоя ξ , при определении времени нагрева вводится расчетный диаметр $D_2 = D_2' - \xi$. Тогда имеем:

$$\tau = \frac{at_k}{R_2'^2} = \frac{4at_k}{D_2'^2}. \quad (2-58)$$

Значение τ , а следовательно, и времени нагрева t_k находится графическим решением уравнения (2-57). Учитывая формулу (2-58), можно написать:

$$\tau = \varphi \left(\frac{T_0}{T_{\text{ц}}} \right), \quad t_k = \frac{\varphi(T_0/T_{\text{ц}})}{4a} D_2'^2 = K D_2'^2, \text{ сек.} \quad (2-59)$$

Считая, как и прежде, $T_0 = 1300^\circ \text{C}$, $a = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$, получим:

$$\Delta T = 100^\circ \text{C}, \quad K = 2,1 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2;$$

$$\Delta T = 150^\circ \text{C}, \quad K = 1,5 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2.$$

Однако в реальных условиях температура поверхности поднимается до конечного значения не мгновенно, а в течение 10—15% общего времени нагрева, что приводит к некоторому увеличению коэффициента K . Учитывая сказанное, для коэффициента K следует принять несколько большие значения:

$$\begin{aligned} \Delta T = 100^\circ \text{C}, \quad K = 2,5 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2; \\ \Delta T = 150^\circ \text{C}, \quad K = 1,8 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2. \end{aligned} \quad \} \quad (2-60)$$

Средняя полезная мощность может быть вычислена по формуле (2-56) или через среднюю удельную мощность [см. формулу (2-18)]. Удельная мощность в любой момент времени t вычисляется по формуле (2-17). Необходимо помнить, что при вычислении полной и удельной мощности в соответствующие формулы подставляется истинный диаметр D_2 . В литературе [30, 31] рассмотрены также различные варианты этого режима нагрева.

2-6. Приближенное определение времени нагрева и удельной мощности при сквозном нагреве заготовок прямоугольного сечения

Расчет по средней удельной мощности. Здесь справедливы все общие замечания, относящиеся к реальному ходу процесса нагрева и к вносимым им поправкам, высказанные применительно к нагреву цилиндрических объектов (см. также [29]).

Расчет ведется по формулам для стенки, нагреваемой с двух сторон. Следовательно,

$$\beta = \frac{x}{D_2/2}, \quad \alpha = \frac{\xi}{D_2/2}, \quad \tau = \frac{at}{(D_2/2)^2}.$$

Обычно время нагрева велико и $\tau > 0,3$. Тогда время нагрева получается из решения уравнения.

$$\frac{T_0}{T_{\text{ц}}} = \frac{\tau + S(\alpha, 0)}{\tau + S(\alpha, 1)} = f(t), \quad (2-61)$$

где $T_{\text{ц}}$ — условная температура в средней плоскости, $^\circ\text{C}$.

Для перепада температуры $\Delta T = 100^\circ \text{C}$ ($\Delta T' = 200^\circ \text{C}$) имеем

$$t_\kappa \approx 22 \cdot 10^4 D_2^2 [S(\alpha, 0) - 1,18 S(\alpha, 1)], \text{ сек.} \quad (2-62)$$

Соответственно для перепада температуры $\Delta T = 150^\circ \text{C}$ ($\Delta T' = 300^\circ \text{C}$) получим:

$$t_\kappa \approx 13 \cdot 10^4 D_2^2 [S(\alpha, 0) - 1,3 S(\alpha, 1)], \text{ сек.} \quad (2-63)$$

Здесь D_2 — толщина пластины, в м ; $S(\alpha, 0)$ и $S(\alpha, 1)$ — находятся из табл. П-2.

Для пластины, нагреваемой с двух сторон в овальном или прямоугольном индукторе, предельная глубина активного слоя достигается при $\Delta_\kappa \geq 0,2D_2$ и равна:

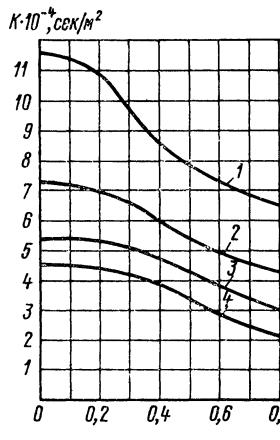


Рис. 2-6. Зависимость $K = f(D/b)$ для стальной пластины, нагреваемой до температуры $1200-1250^\circ \text{C}$

$$\xi_{\text{пред}} \approx 0,22D_2, \quad \alpha_{\text{пред}} = \frac{\xi_{\text{пред}}}{(D_2/2)} = 0,44. \quad (2-64)$$

Если $\Delta_\kappa \leq 0,2D_2$, то $\xi \approx \Delta_\kappa$.

Заменяя толщину пластины D_2 расчетной толщиной $D_2 = D_2 - \xi$, получим в соответствии с формулой (2-59) приближенные формулы для времени нагрева, аналогичные формулам (2-54) и (2-55):

$$\Delta T = 100^\circ \text{C}, \quad t_\kappa = K D_2^{r^2} = 11,5 \cdot 10^4 D_2^{r^2}, \quad (2-65)$$

$$\Delta T = 150^\circ \text{C}, \quad t_\kappa = 7,2 \cdot 10^4 D_2^{r^2}, \text{ сек.} \quad (2-66)$$

Средняя мощность может быть рассчитана по формуле (2-56) или через удельную мощность по формуле (2-41). В расчет подставляется истинная толщина пластины D_2 .

Приведенный расчет не учитывает поступления энергии через узкие боковые грани пластины. Поэтому он справедлив лишь для широких пластин, для которых соблюдается условие: $b_2/D_2 > 5$, где b_2 — ширина пластины.

С уменьшением ширины пластины время нагрева также уменьшается. Приближенное его определение возможно с помощью наложения температурных полей, определяемых энергией, поступающей от широких и узких граней, в предположении равномерного распределения удельной мощности по всему периметру.

Вычисленные таким образом для $\Delta T = 100$ и $\Delta T = 150^\circ \text{C}$ зависимости $K = f(D_2/b_2)$ соответственно представлены на рис. 2-6 кривыми 1 и 2. Средняя мощность рассчитывается по формуле (2-56).

Расчет при постоянной температуре поверхности. При расчете используются формулы (2-8) — (2-14). Сам расчет совершенно аналогичен приведенному для цилиндра.

Время нагрева широкой пластины ($b_2/D_2 > 5$) может быть найдено по формуле (2-59). При этом в предположении мгновенного подъема температуры получаем:

$$\Delta T = 100^\circ \text{C}, K = 4,45 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2,$$

$$\Delta T = 150^\circ \text{C}, K = 3,8 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2.$$

При реальных условиях нагрева, когда время подъема температуры от начального значения до T_0 составляет 10—15% от общего времени нагрева t_n , имеем¹:

$$\Delta T = 100^\circ \text{C}, K = 5,3 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2, \quad (2-67)$$

$$\Delta T = 150^\circ \text{C}, K = 4,5 \cdot 10^4 \text{ сек}/\text{м}^2. \quad (2-68)$$

Так же, как и в предыдущем случае, время нагрева уменьшается по мере уменьшения относительной ширины пластины.

Приближенные зависимости $K = f(D_2/b_2)$ представлены на рис. 2-6 кривыми 3 для $\Delta T = 100^\circ \text{C}$ и 4 для $\Delta T = 150^\circ \text{C}$.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОБЩИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

3-1. Постановка задачи

Режимы работы индуктора в процессе нагрева стального объекта. В соответствии с формулой (1-40) полное электрическое сопротивление индуктора

$$z_n = r_1 + r'_2 + j(x_s + x'_{2m}) = r_n + jx_n. \quad (3-1)$$

Активное сопротивление r_1 , а для весьма длинного индуктора и реактивное сопротивление рассеяние x_s не зависят от физических свойств нагреваемого объекта, изменяющихся в процессе нагрева. Однако сопротивления r'_2 и x'_{2m} нагреваемого объекта существенно зависят от его удельного сопротивления ρ_2 и относительной магнитной проницаемости μ , претерпевающих значительные изменения в течение нагрева (см., например, § 1-5 и 1-8).

При рассмотрении индукционного нагрева стали до температуры, превышающей точку магнитных превращений, целесообразно ввести понятие о стадиях нагрева, характеризующих режим работы системы. Выделим 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.

Так как мгновенное значение напряженности магнитного поля $H = f(x, t)$, то функцией x и t является и магнитная проницаемость $\mu = f_1(H) = f_2(x, t)$.

¹ Подробный расчет для широких пластин приведен в [28].

Вследствие нелинейной связи между индукцией и напряженностью магнитного поля зависимости E , H и B от времени оказываются несинусоидальными.

2. Промежуточный режим. Температура поверхности нагреваемого объекта ниже точки магнитных превращений, но выше исходной. Для температуры магнитных превращений примем среднее значение $T_\mu = 750^\circ\text{C}$. Эта стадия нагрева отличается от первой зависимостью удельного сопротивления от координаты, так как функцией координаты является температура.

Очевидно, что непостоянство удельного сопротивления существенно лишь в пределах участка, равного глубине проникновения электромагнитной волны: $x_\lambda = (1,5 \div 2,0) \Delta_2$. На таком расстоянии от поверхности температура и удельное сопротивление, как то следует из расчетов и опыта, падают не более, чем в два раза, что несомненно с изменением магнитной проницаемости, возрастающей от поверхности вглубь в сотни и тысячи раз. Поэтому в практических расчетах удельное сопротивление в этом режиме будет приниматься равным его значению на поверхности. Обычно расчет ведется для температуры поверхности $T_0 = 600 \div 650^\circ\text{C}$, при которой, в среднем, $\rho_2 \approx (6,0 \div 6,5) \cdot 10^{-7} \text{ ом}\cdot\text{м}$.

3. Горячий режим. У поверхности слой некоторой толщины x_κ прогрет выше точки магнитных превращений. Остальное сечение имеет более низкую температуру, постепенно спадающую по мере удаления от поверхности. Переменными являются ρ и μ , причем μ изменяется почти скачком на границе прогретого слоя.

В предельном случае горячего режима все сечение прогрето насквозь и тогда ρ_2 и μ можно считать постоянными ($\mu = 1$). Практически это возможно, если $x_\kappa > 2\Delta_\kappa$, где Δ_κ — горячая глубина проникновения тока [см. формулу (1-29)].

Общий случай горячего режима будет рассмотрен в гл. 4.

В настоящей главе мы рассмотрим первые две стадии нагрева, не разделяя их. Эти стадии имеют также и самостоятельное значение, если по условиям технологии конечная температура поверхности ниже точки магнитных превращений.

Применительно к ферромагнитной и частично ферромагнитной (начало третьей стадии нагрева) среде будет рассматриваться плоская волна в полуограниченной среде, что не внесет существенных ограничений при практическом применении полученных формул. Глубина проникновения тока в сталь при $\mu = 16$ и $f = 50 \text{ гц}$ составляет 8 мм, а при $f = 2500 \text{ гц}$ уже меньше 0,16 мм.

Среда с переменной магнитной проницаемостью. На рис. 3-1 представлена основная кривая намагничивания, а также зависимость от H относительной магнитной проницаемости μ . При $H = H_{\text{кр}}$ магнитная проницаемость достигает максимума и дальше спадает, стремясь к единице, если $H \rightarrow \infty$.

При индукционном нагреве напряженность магнитного поля H_{me} на поверхности нагреваемого объекта в сотни раз превосходит критическое значение $H_{\text{кр}}$, так как удельные мощности составляют

сотни ватт и киловатты на квадратный сантиметр. Следовательно, поверхностные слои находятся в состоянии сильного магнитного насыщения. С глубиной амплитуда напряженности магнитного поля уменьшается, что вызывает вначале рост магнитной проницаемости, пока она в некоторой точке x_1 не достигнет максимума (рис. 3-2). Так как $H_{me} \gg H_{kp}$, то x_1 представляет собой в сущности глубину проникновения электромагнитной волны, которая несомненно будет меньше, чем вычислительная по поверхностному значению магнитной проницаемости (μ_e) в предположении ее независимости от координаты x . Более круто будет спадать также и плотность тока.

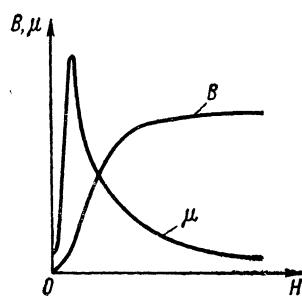


Рис. 3-1. Примерная зависимость магнитной индукции и относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

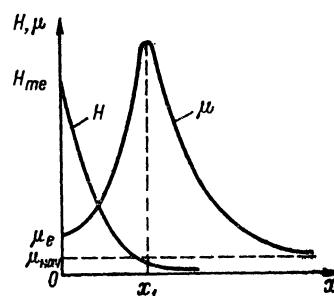


Рис. 3-2. Примерная зависимость напряженности магнитного поля и относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Вследствие более яркого проявления поверхностного эффекта значения электрических сопротивлений и мощности очевидно будут большими, чем вычисленные по формулам для $\mu = \text{const}$ при том же значении H_{me} . В общем случае следует, как это сделал в своей работе академик Л. Р. Нейман [22], учитывать и явление гистерезиса. Однако расчет показывает, что уже при $H > 5 \cdot 10^3 \text{ A/m}$ потери на гистерезис пренебрежимо малы по отношению к мощности, определяемой током проводимости, и с увеличением напряженности магнитного поля доля их продолжает уменьшаться. Так как при индукционном нагреве $H > 5 \cdot 10^4 \text{ A/m}$, то гистерезис мы в расчет принимать не будем.

Поверхностному эффекту в ферромагнитной среде посвящено много работ; наиболее соответствует физическому содержанию процесса и опыту упомянутая выше работа Л. Р. Неймана, которой мы и будем следовать, введя лишь некоторые упрощения, в соответствии с рассматриваемой задачей.

Рассмотрим исходные положения, принятые Л. Р. Нейманом при решении уравнений электромагнитного поля.

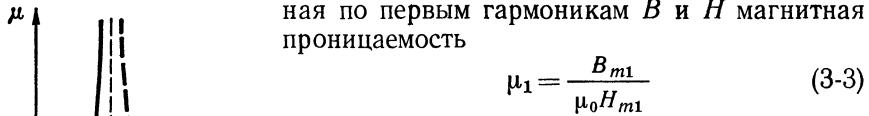
1. Основная кривая намагничивания аппроксимируется отрезками парабол:

$$B = kH^{1/n}, \quad (3-2)$$

где n — выбирается в зависимости от материала и степени магнитного насыщения.

При $H > H_{kp}$ для различных материалов $4 < n < 20$. При таких значениях n вычисленная зависимость $B = f(H)$ близко совпадает с действительной. При $H < H_{kp}$, $n \leq 1$.

2. Сложные зависимости $B(t)$ и $H(t)$ заменяются их первыми гармониками. Это позволяет исключить зависимость магнитной проницаемости от времени. Теперь вычисленная по первым гармоникам B и H магнитная проницаемость



$$\mu_1 = \frac{B_{m1}}{\mu_0 H_{m1}} \quad (3-3)$$

является функцией только амплитуды первой гармоники напряженности магнитного поля, т. е. $\mu_1 = f(H_{m1})$.

Возможность такой замены была обоснована экспериментально.

3. Подстановка в уравнение (1-9) зависимости $\mu = f(H_m)$ не позволяет получить решение уравнения в общем виде. Поэтому вместо нее введена зависимость $\mu = f(x)$, хотя на самом деле $\mu = f(H_m)$. Однако, так как $H_m = f_1(x)$ получаем, что $\mu = f[f_1(x)] = \varphi(x)$.

Зависимость $\mu = \varphi(x)$ должна удовлетворять следующим условиям:

а) если $H_{me} > H_{kp}$, то величина $\mu = \varphi(x)$ должна сначала возрастать, достигнуть максимума и затем убывать;

б) если $H_{me} < H_{kp}$, то величина $\mu = \varphi(x)$ должна монотонно убывать.

Требуемый характер имеет зависимость:

$$\mu_1 = \varphi(x) = \frac{\mu_{e1}}{\left(1 - \frac{x}{x_1}\right)^2}, \quad (3-4)$$

где μ_1 — относительная магнитная проницаемость в точке x , вычисленная по первым гармоникам H и B ; μ_{e1} — магнитная проницаемость на поверхности; x — расстояние от поверхности.

В дальнейшем мы будем рассматривать только случай сильного поля на поверхности, для которого $H_{me} > H_{kp}$.

Если $x_1 > 0$, то в области $x < x_1$ происходит возрастание μ , что соответствует сильному полю на поверхности (рис. 3-3).

В принятой зависимости μ от x имеется два явных отступления от действительности:

а) при $x = x_1$, $\mu = \infty$ и $H_m = 0$, в то время как на самом деле $\mu = \mu_{\max}$ и $H_m = H_{kp}$;

б) при $x \rightarrow \infty$ $\mu \rightarrow 0$, а на самом деле $H_m \rightarrow 0$ и $\mu \rightarrow \mu_{\text{нач}}$.

Однако оба эти отступления, в особенности второе, относятся к области, где электромагнитная волна практически полностью затухает, и потому не имеют существенного значения.

Более полное и строгое обоснование приведенных положений содержится в указанной выше работе Л. Р. Неймана [22].

Подставив выражение (3-4) в уравнения электромагнитного поля, получим для первых гармоник E и H :

$$-\frac{d\dot{H}_{m1}}{dx} = \gamma \dot{E}_{m1}, \quad (3-5)$$

$$\frac{d\dot{E}_{m1}}{dx} = -j\omega\mu_0\mu_{e1}\frac{\dot{H}_{m1}}{\left(1 - \frac{x}{x_1}\right)^2}, \quad (3-6)$$

$$\frac{d^2\dot{H}_{m1}}{dx^2} = j\omega\mu_0\mu_{e1}\gamma\frac{\dot{H}_{m1}}{\left(1 - \frac{x}{x_1}\right)^2} = j2k_e^2\frac{\dot{H}_{m1}}{\left(1 - \frac{x}{x_1}\right)^2}, \quad (3-7)$$

где $k_e = \frac{1}{\Delta_e} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_e}{2\rho}}$ — коэффициент затухания для первых гармоник H и E , величина, обратная глубине проникновения тока Δ_e , вычисленной по значению магнитной проницаемости на поверхности.

Уравнение (3-7) приводится к уравнению с постоянными коэффициентами известной подстановкой:

$$\ln\left(1 - \frac{x}{x_1}\right) = \xi.$$

Тогда после преобразований получим уравнение:

$$\frac{d^2\dot{H}_{m1}}{d\xi^2} - \frac{d\dot{H}_{m1}}{d\xi} - j2k_e^2x_1^2\dot{H}_{m1} = 0, \quad (3-8)$$

решение которого известно.

В дальнейшем мы будем опускать индекс 1, помня, что речь идет о первых гармониках H , B и E .

3-2. Зависимость напряженности магнитного поля и плотности тока от координаты

Решая уравнение (3-8), получим :

$$\dot{H}_m = A e^{\alpha\xi},$$

где α определяется из характеристического уравнения:

$$\alpha^2 - \alpha - j2k_e^2x_1^2 = 0.$$

Тогда имеем:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + j2k_e^2x_1^2} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + j8k_e^2x_1^2} \right),$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 + j8k_e^2x_1^2} \right).$$

Разделяя действительные и мнимые части, получим:

$$\alpha_1 = \alpha'_1 + j\alpha'_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\sqrt{1 + 64k_e^4x_1^4} + 1}{2}} \right) +$$

$$+ j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + 64k_e^4x_1^4} - 1}{2}}, \quad (3-9)$$

$$\alpha_2 = \alpha'_2 + j\alpha''_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\sqrt{1 + 64k_e^4x_1^4} + 1}{2}} \right) -$$

$$- j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + 64k_e^4x_1^4} + 1}{2}}. \quad (3-10)$$

Таким образом, решение уравнения принимает вид:

$$\dot{H}_m = A_1 e^{\alpha_1 \ln \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)} + A_2 e^{\alpha_2 \ln \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)} = A_1 \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{\alpha_1} +$$

$$+ A_2 \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{\alpha_2}. \quad (3-11)$$

В рассматриваемом случае $H_{me} > H_{kp}$ и $x_1 > 0$. Тогда при изменении x от нуля до x_1 модуль множителя $(1 - x/x_1)^{\alpha_1}$ изменяется от 1 до 0, так как вещественная часть α_1 положительна. Модуль множителя $(1 - x/x_1)^{\alpha_2}$ возрастает от 1 до ∞ , так как α_2 имеет отрицательную вещественную часть. Поэтому в точке $x = x_1$ при $A_2 \neq 0$ получаем $\dot{H}_m = \infty$, что невозможно, и, следовательно, $A_2 = 0$.

При $x = 0$ $\dot{H}_m = \dot{H}_{me} = H_{me}$, откуда $A_1 = H_{me}$. Окончательно решение уравнения (3-8) примет вид:

$$\dot{H}_m = H_{me} e^{\alpha_1 \ln \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)} = H_{me} \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{\alpha_1}. \quad (3-12)$$

Выражение (3-12) описывает процесс в интервале $0 < x < x_1$. При $x = x_1$ $\dot{H}_m = 0$. Следовательно, при $x > x_1$ $H_m = 0$, и, таким образом, во внутренней области массивного проводника поле отсутствует, а энергия не проникает глубже x_1 .

Если устремить x_1 к бесконечности, то выражение (3-12) превратится в обычное для $\mu = \mu_e = \text{const}$.

В самом деле:

$$\lim_{x_1 \rightarrow \infty} \alpha_1 \ln \left(1 - \frac{x}{x_1} \right) = -k_e (1+j) x,$$

и мы получаем формулу (1-11).

Определим численные значения α'_1 и α''_1 , которые в дальнейшем будем обозначать α' и α'' .

Для модуля напряженности магнитного поля можно написать:

$$H_m = H_{me} \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{\alpha'}. \quad (3-13)$$

В соответствии с формулами (3-2) и (3-4) получим¹:

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\mu_e} &= \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{-2} = \frac{B_m / (\mu_0 H_m)}{B_{me} / (\mu_0 H_{me})} = \frac{B_m H_{me}}{B_{me} H_m} = \\ &= \frac{k H_m^{1/n} H_{me}}{k H_{me}^{1/n} H_m} = \left(\frac{H_m}{H_{me}} \right)^{\frac{1}{n}-1}. \end{aligned}$$

Отсюда, учитывая также выражение (3-13), получим:

$$\begin{aligned} \frac{H_m}{H_{me}} &= \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{\frac{2n}{1-n}} = \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{\alpha'} \\ \text{и} \quad \alpha' &= -\frac{2n}{1-n} = \frac{2n}{n-1}. \end{aligned} \quad (3-14)$$

Теперь из выражения (3-9) легко определяются α'' и произведение $k_e x_1$:

$$\alpha'' = \alpha' \sqrt{\frac{n+1}{2n}}, \quad (3-15)$$

$$k_e x_1 = \frac{\sqrt{8n(3n+1)^2(n+1)}}{2(n-1)}. \quad (3-16)$$

Так как n представляет собой числовой параметр, характеризующий конкретную кривую намагничивания, все величины определяются однозначно, причем численное значение x_1 находится по известному k_e .

Напряженность электрического поля и плотность тока находятся из уравнения (3-5):

$$\dot{E}_m = -\frac{1}{\gamma} \frac{dH_m}{dx} = \frac{\alpha H_{me}}{\gamma x_1} \left(1 - \frac{x}{x_1} \right)^{\alpha-1}$$

или

$$\dot{E}_m = H_{me} \frac{k_e}{\gamma} \frac{\alpha}{k_e x_1} \left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1} \right)^{\alpha-1}. \quad (3-17)$$

¹ Можно показать [22], что формула (3-2) справедлива и для первых гармоник H и B .

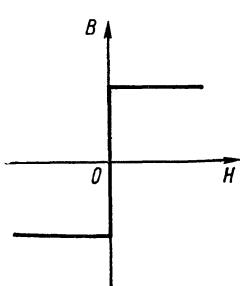
Так как при

$$x=0 \quad \dot{E}_m = \dot{E}_{me} = H_{me} \frac{k_e}{\gamma} \frac{\alpha}{k_e x_1}, \quad \text{то}$$

$$\dot{E}_m = \dot{E}_{me} \left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1}\right)^{\alpha'-1}. \quad (3-18)$$

Модуль этого выражения

$$E_m = \frac{\delta_m}{\gamma} = E_{me} \left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1}\right)^{\alpha'-1} = H_{me} \frac{k_e}{\gamma} \frac{|\alpha|}{k_e x_1} \left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1}\right)^{\alpha'-1}. \quad (3-19)$$



Если $H_{me} > 10^4 \text{ A/m}$, то без большой ошибки в конечных результатах можно принять $n = \infty$.
Тогда имеем

$$\alpha' = 2; \quad \alpha'' = \sqrt{2}; \quad k_e x_1 = 1,457. \quad (3-20)$$

Для напряженностей магнитного и электрического полей получим:

$$H_m = H_{me} \left(1 - \frac{k_e x}{1,457}\right)^2, \quad (3-21)$$

Рис. 3-4. Идеализированная кривая намагничивания при $n = \infty$

$$E_m = E_{me} \left(1 - \frac{k_e x}{1,457}\right) = 1,68 H_{me} \frac{k_e}{\gamma} \left(1 - \frac{k_e x}{1,457}\right). \quad (3-22)$$

Таким образом, напряженность электрического поля и плотность тока убывают с ростом x по закону, близкому к линейному. При этом плотность тока на поверхности ферромагнитной среды в 1,19 раза больше, чем при $\mu = \mu_e = \text{const}$, если в обоих случаях магнитная проницаемость на поверхности одинакова.

В любой точке x магнитная индукция

$$\dot{B}_m = \mu_0 \mu H_m = \mu_0 \frac{\mu_e}{\left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1}\right)^2} H_{me} \left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1}\right)^\alpha$$

или

$$\dot{B}_m = \mu_0 \mu_e H_{me} \left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1}\right)^{\alpha-2}. \quad (3-23)$$

Модуль выражения (3-23)

$$B_m = \mu_0 \mu_e H_{me} \left(1 - \frac{k_e x}{k_e x_1}\right)^{\alpha'-2}. \quad (3-24)$$

Если $n = \infty$ и $\alpha' = 2$, то имеем:

$$B_m = \mu_0 \mu_e H_{me} = B_{me},$$

т. е. в интервале $0 < x < x_1$, индукция не зависит от x , что понятно, так как при $n = \infty$ кривая намагничивания аппроксимируется прямоугольником (рис. 3-4).

3-3. Электрическое и магнитное сопротивления участка ферромагнитной среды

Полное электрическое сопротивление участка длиной l и шириной a получим на основании формулы (1-20), подставив в нее значения \dot{E}_{me} и H_{me} :

$$\dot{z} = \frac{l}{a} \frac{\dot{E}_{me}}{H_{me}} = \frac{l}{a} \frac{k_e}{\gamma} \frac{\alpha}{k_e x_1} = r + jx_m. \quad (3-25)$$

Отсюда получим активное и внутреннее реактивное сопротивления:

$$r = \frac{l}{a} \frac{\rho}{\Delta_e} \frac{\alpha'}{k_e x_1} = \frac{l}{a} \frac{\rho}{\Delta_e} f_1(n), \quad (3-26)$$

$$x_m = \frac{l}{a} \frac{\rho}{\Delta_e} \frac{\alpha''}{k_e x_1} = \frac{l}{a} \frac{\rho}{\Delta_e} f_2(n), \quad (3-27)$$

$$\dot{z} = ze^{j\varphi} = \frac{l}{a} \frac{\rho}{\Delta_e} \frac{\sqrt{2} |\alpha|}{\sqrt{2} k_e x_1} e^{j\varphi} = \frac{l}{a} \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta_e} f_3(n) e^{j\varphi}, \quad (3-28)$$

где $f_1(n)$, $f_2(n)$, $f_3(n)$ — представляют собой поправки к формулам для $\mu = \text{const}$, учитывающие непостоянство μ . φ — разность фаз между E и H .

На основании формул (3-14), (3-15) и (3-16) получим:

$$\left. \begin{aligned} f_1(n) &= \frac{4n}{\sqrt[4]{8n(3n+1)^2(n+1)}}, \\ f_2(n) &= \frac{2\sqrt{2n(n+1)}}{\sqrt[4]{8n(3n+1)^2(n+1)}}, \\ f_3(n) &= \sqrt[4]{\frac{2n}{n+1}}, f_4(n) = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\alpha''}{\alpha'} = \sqrt{\frac{n+1}{2n}}. \end{aligned} \right\} \quad (3-29)$$

В практически интересном для нас случае, когда $n = \infty$, имеем:

$$f_1(n) = 1,372; \quad f_2(n) = 0,972; \quad f_3(n) = 1,192; \quad f_4(n) = 0,707. \quad (3-30)$$

Таким образом видим, что активное сопротивление участка ферромагнитной среды почти на 40% больше, чем сопротивление среды с постоянными $\mu = \mu_e$. Соответственно большей оказывается и активная мощность при одинаковом значении H_{me} .

Почти не меняется в интервале значений $0,5 < n < \infty$ внутреннее реактивное сопротивление x_m и внутренняя реактивная мощность.

Если $n = 1$, то $f_1(n) = f_2(n) = f_3(n) = f_4(n) = 1$, а $k_e x_1 = \infty$. В этом случае имеем среду с постоянной магнитной проницаемостью.

Выражения для полного магнитного сопротивления и его составляющих получим, используя формулы (1-23) и (3-28).

Принимая для практических расчетов $n = \infty$, получим окончательные формулы для сопротивлений:

$$r = \frac{l}{a} 1,37 \frac{\rho}{\Delta_e}, \quad x_m = \frac{l}{a} 0,972 \frac{\rho}{\Delta_e} \approx \frac{l}{a} \cdot \frac{\rho}{\Delta_e}, \quad (3-31)$$

$$z = \frac{l}{a} \cdot 1,68 \frac{\rho}{\Delta_e}, \quad (3-32)$$

$$\varphi = 35^\circ 16', \quad \cos \varphi = 0,816, \quad \sin \varphi = 0,577, \quad (3-33)$$

где

$$\Delta_e = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_{ef}}}, \quad m$$

3-4. Определение магнитной проницаемости по заданной удельной мощности

Найдем выражение для удельной мощности на поверхности:

$$p_0 = I^{(1)}^2 r_0 = \frac{1}{2} H_{me}^2 r_0, \quad (3-34)$$

где $I^{(1)}$ — ток в полосе шириной 1 м; r_0 — активное сопротивление единичного квадрата.

В рассматриваемом случае $I^{(1)} = H_{me}/\sqrt{2}$. Тогда, используя формулу (3-31), имеем:

$$p_0 = \frac{1}{2} H_{me}^2 1,37 \frac{\rho}{\Delta_e} \approx 1,36 \cdot 10^{-3} H_{me}^2 \sqrt{\rho \mu_{ef}}, \quad \text{вт/м}^2, \quad (3-35)$$

или

$$p_0 = 2,72 \cdot 10^{-3} H_e^2 \sqrt{\rho \mu_{ef}}, \quad \text{вт/м}^2, \quad (3-36)$$

где H_e — действующее значение напряженности магнитного поля, а/м.

Формулы (3-35) и (3-36) могут быть использованы для определения магнитной проницаемости μ_e .

Удельная мощность p_0 определяется при тепловом расчете и для электрического расчета всегда является заданной. Также заданными являются удельное сопротивление ρ , частота f и кривые намагничивания $B = f(H)$. Однако в формулах (3-35) и (3-36) H_{me} и H_e — это амплитуда и действующее значение первой гармоники напряженности магнитного поля, а μ_e — магнитная проницаемость, определенная по амплитудам первых гармоник H и B , в то время как основная кривая намагничивания дает связь между амплитудами результирующих зависимостей $B(t)$ и $H(t)$. Таким образом, для определения магнитной проницаемости необходимо знать коэффициенты первых гармоник индукции (k_B) и напряженности магнитного поля (k_H), которые нужно ввести в формулу (3-36).

Магнитная проницаемость

$$\mu_e = \frac{B_{me1}}{\mu_0 H_{me1}} = \frac{k_B}{k_H} \frac{B_{me}}{\mu_0 H_{me}}, \quad (3-37)$$

где B_{me} и H_{me} — амплитуды результирующих кривых $B(t)$ и $H(t)$; k_B и k_H — коэффициенты первых гармоник B и H .

Так как формы кривых, а следовательно, k_B и k_H не известны заранее, определение μ_e сводится к громоздким вычислениям методом последовательных приближений.

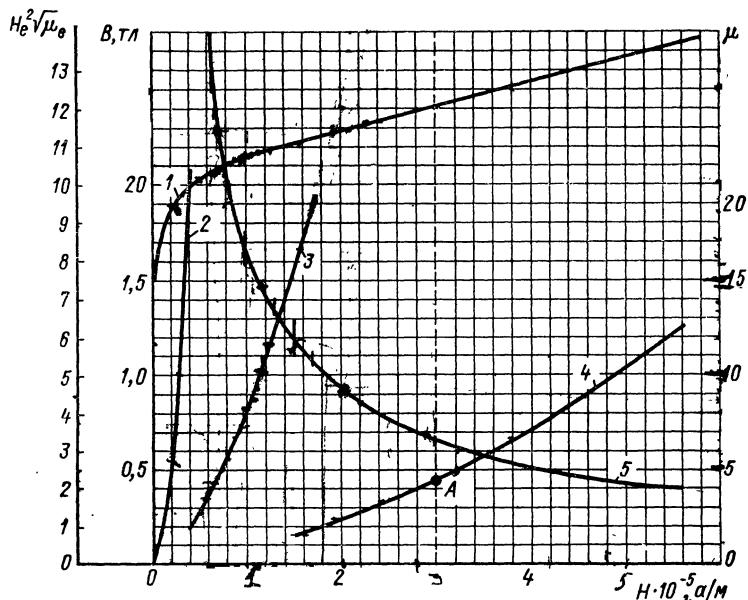


Рис. 3-5. Усредненные магнитные свойства стали и пример определения магнитной проницаемости

1 — $B = f(H)$; 2, 3, 4 — $H^2 \sqrt{\mu} = f(H)$ (значения $H^2 \sqrt{\mu}$ нужно умножить на 10^9 , 10^{10} , 10^{11} соответственно для каждой из трех кривых); 5 — $\mu = f(H)$

Однако, с достаточной точностью (ошибка меньше 5%) магнитную проницаемость можно определить из основной кривой намагничивания, если чисто формально принять, что на оси абсцисс отложено действующее значение первой гармоники H [22].

Тогда

$$\mu_e \approx \frac{B}{\mu_0 H_e}, \quad (3-38)$$

где μ_e — относительная магнитная проницаемость на поверхности, определяемая по первым гармоникам B и H ; H_e — действующее значение первой гармоники напряженности магнитного поля на поверхности, a/m ; B — индукция, найденная из кривой намагни-

чивания по действующему значению напряженности магнитного поля, *тл*.

Перепишем формулу (3-36) в виде:

$$H_e^2 \sqrt{\mu_e} = 3,67 \cdot 10^2 \frac{p_0}{\sqrt{\rho f}}, \quad (3-39)$$

где p_0 — удельная мощность, $\text{вт}/\text{м}^2$; ρ — удельное сопротивление, $\text{ом}\cdot\text{м}$; f — частота, Гц .

Построив по данным кривой намагничивания зависимость $H^2 \sqrt{\mu} = f(H)$ и вычислив по формуле (3-39) $H_e^2 \sqrt{\mu_e}$, легко определить μ_e .

Для определения μ_e необходимо иметь кривую намагничивания стали $B = f(H)$. При сильных полях ($H > 4 \cdot 10^4 \text{ а/м}$), обычно применяемых при индукционном нагреве, кривые намагничивания разных сортов стали весьма мало отличаются друг от друга, что дает возможность построить усредненную кривую $B = f(H)$, которая приведена в табл. 3-1 и на рис. 3-5. Там же приведены зависимости $\mu = f(H)$ и $H^2 \sqrt{\mu} = f(H)$.

Сравнение усредненных значений магнитной проницаемости с полученными для сталей с содержанием углерода от 0,23 до 0,99% [22] показывает, что ошибка не превышает 6,7% даже при $H = 4 \cdot 10^3 \text{ а/м}$, уменьшаясь до 2,5% при $H = 4 \cdot 10^4 \text{ а/м}$. Дальше она падает до долей процента. Так как μ во все формулы входит под знаком квадратного корня, то ошибка уменьшается еще в два раза и выходит за пределы точности самого измерения μ .

Напряженность поля приведена также в эрстедах, что облегчает сравнение с данными, приводимыми в литературе.

Таблица 3-1
Средние магнитные свойства конструкционной стали
при различной напряженности магнитного поля

$H \cdot 10^{-2}, \text{ а/м}$	$H, \text{ э}$	$B, \text{ тл}$	μ	$H^2 \sqrt{\mu}$
40	50	1,496	299	$2,75 \cdot 10^8$
80	100	1,635	164	$7,9 \cdot 10^8$
159	200	1,785	89,2	$2,4 \cdot 10^9$
239	300	1,873	62,3	$4,51 \cdot 10^9$
399	500	1,985	39,7	$1 \cdot 10^{10}$
797	1000	2,099	21,0	$2,91 \cdot 10^{10}$
1594	2000	2,228	11,1	$8,48 \cdot 10^{10}$
2391	3000	2,338	7,8	$1,6 \cdot 10^{11}$
3188	4000	2,441	6,1	$2,51 \cdot 10^{11}$
3587	4500	2,491	5,5	$3,02 \cdot 10^{11}$
3985	5000	2,540	5,1	$3,59 \cdot 10^{11}$
4770	6000	2,640	4,4	$4,77 \cdot 10^{11}$
5570	7000	2,740	3,9	$6,23 \cdot 10^{11}$

Приложение: Магнитная проницаемость приведена в относительных единицах.

Поясним определение магнитной проницаемости на конкретных примерах.

1. Холодный режим. Пусть $\rho = 1,5 \cdot 10^{-7}$ ом·м, $f = 2500$ Гц, $p_0 = 1,2 \text{ квт}/\text{см}^2 = 1,2 \cdot 10^7 \text{ вт}/\text{м}^2$.

Тогда

$$H_e^2 \sqrt{\mu_e} = 3,67 \cdot 10^2 \frac{1,2 \cdot 10^7}{\sqrt{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 2500}} = 2,28 \cdot 10^{11}.$$

На кривой 4 (рис. 3-5) точка A соответствует найденному значению

$$H_e^2 \sqrt{\mu_e}.$$

Получим:

$$H_e = 3 \cdot 10^5 \text{ а/м}; B = 2,415 \text{ тл}; \mu_e = 6,4.$$

2. Промежуточный режим. Считая $T_0 = 650^\circ \text{C}$, принимаем $\rho = \rho_e = 6,0 \cdot 10^{-7}$ ом·м, оставляя прежнее значение p_0 .

Тогда $H_e^2 \sqrt{\mu_e} = 1,14 \cdot 10^{11}$; $H_e = 2 \cdot 10^5 \text{ а/м}; \mu_e = 8$.

3-5. Эффективная глубина проникновения тока и глубина проникновения волны

Эффективную глубину проникновения тока, или глубину активного слоя ξ можно определить, сравнивая активные сопротивления при $\mu = \text{const}$ и при $\mu = \text{var}$ — при одинаковых значениях частоты и магнитной проницаемости на поверхности:

Тогда имеем:

$$\mu = \text{const } (n = 1), r_0 = \rho / \Delta_e;$$

$$\mu = \text{var } (n > 1), r_0 = \frac{\rho}{\Delta_e} f_1(n) = \frac{\rho}{\xi},$$

откуда

$$\xi = \Delta_e / f_1(n). \quad (3-40)$$

В наиболее интересном для нас случае, когда $n = \infty$, имеем:

$$\xi = \frac{\Delta_e}{1,37} = 366 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_{ef}}}, \text{ м.} \quad (3-41)$$

Представляет также интерес определение глубины проникновения волны.

При постоянной магнитной проницаемости мощность волны спадает по экспоненте. Очевидно полное затухание происходит на расстоянии от поверхности $x_1 = \infty$. До 0,05 p_0 мощность волны спадает на расстоянии $x_{0,05} \approx 1,5\Delta_e$.

При переменной магнитной проницаемости имеем:

$$x_1 = \Phi(n) \Delta_e,$$

где $\Phi(n)$ — определяется по формуле (3-16).

$$\text{при } n = 10, \quad \Phi(n) = 1,68, \quad x_1 = 1,68\Delta_e.$$

$$\text{при } n = \infty, \quad \Phi(n) = 1,457, \quad x_1 = 1,457\Delta_e, \quad x_{0,05} \approx \Delta_e.$$

Таким образом, при переменной магнитной проницаемости поверхностный эффект проявляется резче.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОБЩИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА ЧАСТИЧНО ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

4-1. Постановка задачи

Наиболее общее представление о процессах, происходящих при индукционном нагреве ферромагнитного проводящего тела, дает его заключительная стадия — горячий режим (см. § 3-1).

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, остается ферромагнитной. Здесь переменными величинами являются ρ и μ , причем последняя изменяется почти скачком на границе нагретого слоя. Металл становится как бы двухслойным.

В предельном случае горячего режима все сечение прогрето насквозь и тогда ρ и μ можно считать постоянными ($\mu = 1$, $\rho = \rho_k$).

При рассмотрении горячего режима примем следующие допущения:

- 1) имеются две резко разграниченные среды, на границе которых относительная магнитная проницаемость изменяется скачком от значения $\mu = 1$ в пределах первой среды до $\mu = \mu_2$ на границе второй;
- 2) удельное сопротивление ρ_1 первой среды в ее пределах неизменно;
- 3) удельное сопротивление ρ_2 второй среды постоянно и равно удельному сопротивлению первой среды ρ_1 ;
- 4) магнитная проницаемость второй среды μ_2 постоянна в ее пределах и зависит от удельной мощности на поверхности первой среды.

Перечисленные допущения можно обосновать следующим образом.

1. Магнитная проницаемость в области температур, близких к точке магнитных превращений, изменяется очень резко, и для приближенного рассмотрения это изменение может быть заменено скачком.

2. Кривая зависимости удельного сопротивления всех сортов стали от температуры выше точки магнитных превращений становится пологой. Перепад температуры по толщине первой среды (слой x_k) обычно не превышает 150—200° С, что дает основание принять для ρ_1 значение ρ_k , соответствующее температуре 800—850° С. Для всех сортов стали можно считать $\rho_k \approx 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

3. Удельное сопротивление на границе сред изменяется непрерывно, постепенно уменьшаясь с ростом глубины. Магнитная проницаемость имеет на границе значение μ_2 , зависящее от степени магнитного насыщения стали, и увеличивается с глубиной (см. гл. 3).

Таким образом, зависимости $\rho_2 = f(x)$ и $\mu_2 = f(x)$ имеют противоположный друг другу характер (рис. 4-1). Ниже будет показано, что если для любой точки среды с переменными ρ и μ соблюдается равенство $\rho\mu = \text{const}$, то с внешней стороны такая среда ведет себя так же, как имеющая ρ и μ постоянными по всему сечению и равными их значениям на поверхности этой среды [22]. В реальных условиях постоянство произведения $\rho\mu$ не соблюдается, так как μ изменяется значительно сильнее, чем ρ , однако для приближенного рассмотрения мы будем считать, что это условие соблюдается. Наличие первого слоя ослабит ошибку от принятого допущения.

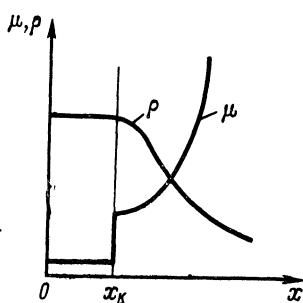


Рис. 4-1. Примерная зависимость удельного сопротивления и относительной проницаемости от глубины после появления нагретого слоя

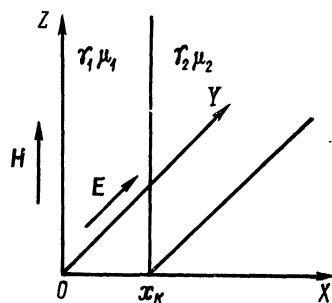


Рис. 4-2. Пояснение к распространению электромагнитной энергии в двухслойной среде

Закон распределения плотности тока в пределах второй среды имеет в рассматриваемом случае второстепенное значение. Поэтому, основываясь на сказанном выше, мы примем для нее ρ и μ постоянными и равными их значениям на границе раздела. Тогда $\rho_2 = \rho_1 = \rho_k$.

Магнитную проницаемость μ_2 мы будем определять как функцию напряженности магнитного поля на границе раздела сред, пользуясь кривой намагничивания. Так как напряженность магнитного поля находится в прямой зависимости от удельной мощности в нагреваемом металле, то и магнитная проницаемость является ее функцией. Удельная мощность обычно задается из теплового расчета.

Как показывает экспериментальная проверка, расчеты, произведенные на основе указанных допущений, являются достаточно точными для решения технических задач.

Необходимые соотношения будут получены из решения уравнений электромагнитного поля для плоской волны при бесконечной глубине второй среды, что мало ограничит практическую применимость расчетных формул (см. гл. 1).

4-2. Распределение плотности тока по сечению нагреваемого предмета

Пусть нагреваемый предмет представляет собой двухслойный проводник, бесконечный в направлении OY и OZ . Толщина первого слоя равна x_k . Второй простирается до бесконечности в направлении OX . На рис. 4-2 показано расположение векторов электрического и магнитного полей и направление движения энергии.

Для решения задачи используем уравнения поля [формулы (1-4) и (1-5)].

Тогда получим:

$$\begin{aligned}\dot{H}_m &= Ae^{-k(1+j)x} + Be^{k(1+j)x}, \\ \dot{E}_m &= -\frac{1}{\gamma} \frac{d\dot{H}_m}{dx} = \frac{k(1+j)}{\gamma} [Ae^{-k(1+j)x} - Be^{k(1+j)x}].\end{aligned}$$

Для первого слоя имеем

$$\dot{H}_{m1} = A_1 e^{-k_1(1+j)x} + B_1 e^{k_1(1+j)x} = \dot{H}'_{m1} + \dot{H}''_{m1}, \quad (4-1)$$

$$\dot{E}_{m1} = \frac{k_1(1+j)}{\gamma_1} [A_1 e^{-k_1(1+j)x} - B_1 e^{k_1(1+j)x}] = \dot{E}'_{m1} + \dot{E}''_{m1}. \quad (4-2)$$

Для второго слоя:

$$\dot{H}_{m2} = A_2 e^{-k_2(1+j)x} + B_2 e^{k_2(1+j)x} = \dot{H}'_{m2} + \dot{H}''_{m2}, \quad (4-3)$$

$$\dot{E}_{m2} = \frac{k_2(1+j)}{\gamma_2} [A_2 e^{-k_2(1+j)x} - B_2 e^{k_2(1+j)x}] = \dot{E}'_{m2} + \dot{E}''_{m2}, \quad (4-4)$$

где

$$k_1 = \frac{1}{\Delta_1} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_1\gamma_1}{2}}$$

и

$$k_2 = \frac{1}{\Delta_2} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_2\gamma_2}{2}}.$$

Здесь величины с одним и двумя штрихами относятся к прямым и отраженным волнам.

Так как вторая среда в направлении OX простирается до бесконечности, то $\dot{H}''_{m2} = 0$, $\dot{E}''_{m2} = 0$, а следовательно, $B_2 = 0$.

Постоянные A_1 и B_1 выразим через A_2 , воспользовавшись тем, что тангенциальные составляющие H и E (в рассматриваемом случае векторы H и E лежат в плоскости, параллельной поверхности раздела) не теряют разрыва непрерывности при переходе из одной среды в другую.

Поэтому при $x = x_k$ из уравнений (4-1) — (4-4) получим:

$$\begin{aligned}A_1 e^{-k_1(1+j)x_k} + B_1 e^{k_1(1+j)x_k} &= A_2 e^{-k_2(1+j)x_k}, \\ A_1 e^{-k_1(1+j)x_k} - B_1 e^{k_1(1+j)x_k} &= \frac{\gamma_1 k_2}{\gamma_2 k_1} A_2 e^{-k_2(1+j)x_k},\end{aligned}$$

откуда находим:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{A_2}{2} \left(1 + \frac{\gamma_1 k_2}{\gamma_2 k_1} \right) e^{-(k_2 - k_1)(1+j)x_\kappa} \\ B_1 &= \frac{A_2}{2} \left(1 - \frac{\gamma_1 k_2}{\gamma_2 k_1} \right) e^{-(k_2 + k_1)(1+j)x_\kappa} \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

В интересующем нас случае $\mu_1 = 1$ и $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_\kappa$ и

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{A_2}{2} (1 + \sqrt{\mu_2}) e^{-(k_2 - k_1)(1+j)x_\kappa}, \\ B_1 &= \frac{A_2}{2} (1 - \sqrt{\mu_2}) e^{-(k_2 + k_1)(1+j)x_\kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

Зависимость напряженности электрического поля, а следовательно, и плотности тока от координаты найдем, рассмотрев отношение напряженности E в точке x к ее значению на поверхности раздела.

Тогда, поделив уравнение (4-2) на уравнение (4-4), а также приняв во внимание выражения (4-6), после сокращений будем иметь:

$$\frac{\dot{E}_{m1}}{\dot{E}_{mk}} = \dot{F} = \frac{1}{2\sqrt{\mu_2}} \left[(1 + \sqrt{\mu_2}) e^{k_1(1+j)x_\kappa} e^{-k_1(1+j)x} - (1 - \sqrt{\mu_2}) e^{-k_1(1+j)x_\kappa} e^{k_1(1+j)x} \right].$$

Обозначим:

$$m = \frac{1 - \gamma_1 k_2 / (\gamma_2 k_1)}{1 + \gamma_1 k_2 / (\gamma_2 k_1)}. \quad (4-7)$$

В нашем случае

$$m = \frac{1 - \sqrt{\mu_2}}{1 + \sqrt{\mu_2}}. \quad (4-8)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \dot{F} &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\mu_2}} \right) \left[e^{k_1(x_\kappa - x)} e^{jk_1(x_\kappa - x)} - m e^{-k_1(x_\kappa - x)} e^{-jk_1(x_\kappa - x)} \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\mu_2}} \right) \left\{ \left[e^{k_1(x_\kappa - x)} - m e^{-k_1(x_\kappa - x)} \right] \cos k_1(x_\kappa - x) + \right. \\ &\quad \left. + j [e^{k_1(x_\kappa - x)} + m e^{-k_1(x_\kappa - x)}] \sin k_1(x_\kappa - x) \right\}. \end{aligned}$$

Модуль этого выражения

$$\begin{aligned} F &= \frac{E_{m1}}{E_{mk}} = \frac{\delta_{m1}}{\delta_{mk}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\mu_2}} \right) \times \\ &\quad \times \sqrt{e^{2k_1(x_\kappa - x)} + m^2 e^{-2k_1(x_\kappa - x)} - 2m \cos 2k_1(x_\kappa - x)}. \quad (4-9) \end{aligned}$$

В частном случае, когда $\mu_2 = \infty$ и $m = -1$, имеем:

$$\frac{\delta_{m1}}{\delta_{mk}} = \sqrt{\frac{\cosh 2k_1(x_\kappa - x) + \cos 2k_1(x_\kappa - x)}{2}}. \quad (4-10)$$

Выражение (4-10) соответствует также хорошо известному случаю одностороннего поверхностного эффекта в пластине толщиной x_k , ограниченной с двух сторон непроводящей средой, например воздухом (при $\gamma_2 = 0, m = -1$).

В некоторых случаях удобнее пользоваться отношением δ_{m1}/δ_{me} . Это отношение найдем, составив предварительно отношение δ_{me}/δ_{mk} , положив $x = 0$. Тогда получим:

$$\frac{\delta_{m1}}{\delta_{me}} = \sqrt{\frac{e^{2k_1(x_k-x)} + m^2 e^{-2k_1(x_k-x)} - 2m \cos 2k_1(x_k-x)}{e^{2k_1x_k} + m^2 e^{-2k_1x_k} - 2m \cos 2k_1x_k}}. \quad (4-11)$$

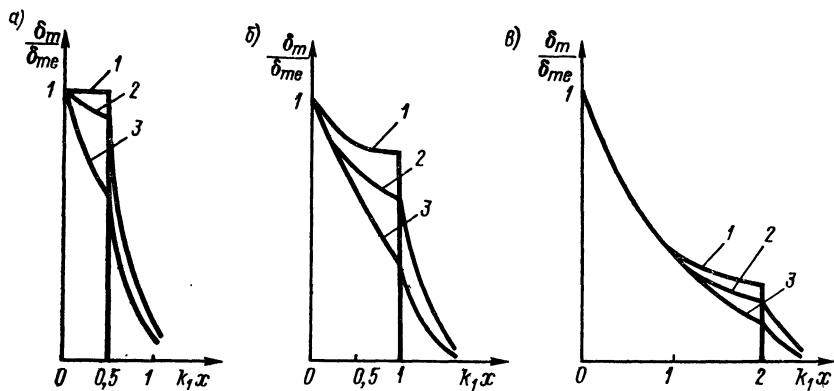


Рис. 4-3. Распределение плотности тока по сечению нагреваемого предмета:
 $a - x_k/\Delta_k = 0,5; b - x_k/\Delta_k = 1; c - x_k/\Delta_k = 2$
 1 — $\mu = \infty$; 2 — $\mu = 16$; 3 — не учтено влияние второй среды, обладающей магнитными свойствами

При $m = -1$

$$\frac{\delta_{m1}}{\delta_{me}} = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2k_1(x_k-x) + \cos 2k_1(x_k-x)}{\operatorname{ch} 2k_1x_k + \cos 2k_1x_k}}. \quad (4-12)$$

Практически удобнее при вычислениях пользоваться выражением (4-9) и лишь потом получать величины δ_{m1}/δ_{me} . Легко видеть, что если $x_k = 0$, т. е. первый слой отсутствует, то получаем хорошо известные выражения (1-11) и (1-12).

На рис. 4-3, а, б и в приведены распределения плотности тока по сечению для трех различных глубин нагрева. Кривые 1 и 2 для первой среды рассчитаны по формулам (4-11) и (4-12). Кривая 3 — по формуле (1-14). Распределение плотности тока во второй среде построено по формуле (1-14) в предположении, что $\mu_2 = \text{const}$ и $\rho_2 = \rho_k = \text{const}$, причем для простоты построения плотность тока на поверхности раздела принята за максимальную и начало координат перенесено в точку $x = x_k$. Чтобы кривые были действительны для любой частоты, по оси абсцисс отложены относительные расстояния $\frac{x_k}{\Delta_k} = k_1 x_k$.

Рис. 4-3, *a*, *b* и *v* показывает, что наличие второй среды с $\mu_2 > 1$ оказывает значительное влияние на распределение плотности тока в нагреваемом слое (ср. кривые 1, 2, 3). Чем больше μ_2 , тем равномернее это распределение, а следовательно, и распределение плотности мощности по сечению нагреваемого слоя.

С уменьшением глубины прогрева кривая зависимости плотности тока от глубины становится все более пологой и равномерность нагрева повышается. При глубинах прогрева, превышающих горячую глубину проникновения тока ($\frac{x_k}{\Delta_k} = k_1 x_k > 1$), влияние второй среды ослабляется и зависимость плотности тока от глубины приближается к экспоненте. При этом основная часть тепловой энергии выделяется в слое Δ_k , остальная же часть металла прогревается за счет теплопроводности. Происходит переход от нагрева глубинного типа к чисто поверхностному (рис. 4-3, *v*).

Сравнение кривых 1, 2 и 3 (рис. 4-3) показывает, что распределение плотности тока, приведенное на рис. 1-5 и составленное из отрезков двух экспонент, является грубо приближенным. В действительности оно значительно более равномерно.

Изложенное является дополнительным подтверждением основных положений, приведенных в гл. 1.

4-3. Электрическое и магнитное сопротивления нагреваемого металла

Электрическое и магнитное сопротивления участка двухслойной среды определим, используя общие формулы (1-20) и (1-23):

$$H_{me} = A_1 + B_1; \quad \dot{E}_{me} = \frac{k_1(1+j)}{\gamma_1} (A_1 - B_1);$$

$$\dot{z}_0 = \frac{k_1(1+j)}{\gamma_1} \frac{A_1 - B_1}{A_1 + B_1} = V \sqrt{2} \frac{k_1}{\gamma_1} e^{j \frac{\pi}{4}} \frac{A_1 - B_1}{A_1 + B_1}.$$

На основании формулы (1-21):

$$\dot{z}_0 = \dot{z}_{01} \dot{K} = z_{01} e^{j \frac{\pi}{4}} \dot{K}. \quad (4-13)$$

Здесь z_{01} — электрическое сопротивление единичного квадрата первой среды в предположении, что она занимает все пространство и вторая среда отсутствует ($x_k = \infty$). Комплекс \dot{K} учитывает влияние второй среды.

Если $x_k = \infty$, то $\dot{K} = 1$, так как в этом случае $B_1 = 0$. Заменив A_1 и B_1 их значениями, получим:

$$\dot{K} = \frac{\left(1 + \frac{\gamma_1 k_2}{\gamma_2 k_1}\right) e^{-(k_2 - k_1)(1+j)x_k} - \left(1 - \frac{\gamma_1 k_2}{\gamma_2 k_1}\right) e^{-(k_2 + k_1)(1+j)x_k}}{\left(1 + \frac{\gamma_1 k_2}{\gamma_2 k_1}\right) e^{-(k_2 - k_1)(1+j)x_k} + \left(1 - \frac{\gamma_1 k_2}{\gamma_2 k_1}\right) e^{-(k_2 + k_1)(1+j)x_k}}.$$

После освобождения от мнимости в знаменателе и соответствующих преобразований получим:

$$K = \frac{1 - m^2 e^{-4k_1 x_k} + j 2m e^{-2k_1 x_k} \sin 2k_1 x_k}{1 + m^2 e^{-4k_1 x_k} + 2m e^{-2k_1 x_k} \cos 2k_1 x_k} = K e^{j\theta}.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2m e^{-2k_1 x_k} \sin 2k_1 x_k}{1 - m^2 e^{-4k_1 x_k}}, \quad (4-14)$$

$$K = \frac{\sqrt{(1 - m^2 e^{-4k_1 x_k})^2 + 4m^2 e^{-4k_1 x_k} \sin^2 2k_1 x_k}}{1 + m^2 e^{-4k_1 x_k} + 2m e^{-2k_1 x_k} \cos 2k_1 x_k}. \quad (4-15)$$

Тогда

$$z_0 = z_{01} e^{j \frac{\pi}{4}} K e^{j\theta} = z_{01} K e^{j\Phi}, \quad (4-16)$$

где

$$\Phi = \frac{\pi}{4} + \theta \quad (4-17)$$

есть угол, на который напряженность магнитного поля отстает от напряженности электрического поля.

Заменив k_1 и k_2 их значениями в выражении для m [формула (4-7)], получим:

$$m = \frac{1 - \sqrt{\frac{\gamma_1 \mu_2}{\gamma_2 \mu_1}}}{1 + \sqrt{\frac{\gamma_1 \mu_2}{\gamma_2 \mu_1}}},$$

откуда видно, что m может иметь разный знак и $|m| < 1$.

Возможны три случая

1) $\gamma_1 \mu_2 > \gamma_2 \mu_1$. Тогда $m < 0$, $\operatorname{tg} \theta < 0$, $\theta < 0$ и $\Phi < \pi/4$. Если $\gamma_1 = \gamma_2$, $\mu_1 = 1$ и $\mu_2 > 1$, мы имеем интересующий нас случай индукционного нагрева стали, когда у поверхности появляется слой глубиной x_k с температурой, превышающей точку магнитных превращений. Это также отчасти соответствует картине насыщенной стали, особенно если разбить сечение тела на много слоев с постепенно увеличивающейся магнитной проницаемостью.

2) $\gamma_1 \mu_2 < \gamma_2 \mu_1$. Тогда $m > 0$, $\operatorname{tg} \theta > 0$, $\theta > 0$ и $\Phi > \pi/4$. При $\gamma_1 = \gamma_2$ имеем $\mu_2 < \mu_1$, что отчасти соответствует стали, находящейся в слабом поле (напряженность меньше критического значения). Для нас этот случай интереса не представляет.

3) $\gamma_1 \mu_2 = \gamma_2 \mu_1$ или $\rho_1 \mu_1 = \rho_2 \mu_2$. В этом случае $m = 0$, $\operatorname{tg} \theta = 0$, $\theta = 0$, $\Phi = \pi/4$ и $K = 1$.

Все отраженные волны пропадают и с внешней стороны явления протекают так, как будто имеется только одна среда с постоянными ρ_1 и μ_1 . Этот случай соответствует такому изменению ρ и μ по сечению, при котором для всех точек сохраняется равенство $\rho \mu = \text{const}$, и служит некоторым дополнительным основанием для

допущения о постоянстве ρ и μ основной массы металла. Все сказанное справедливо до тех пор, пока

$$0 < 2k_1x_k < \pi.$$

При $2k_1x_k > \pi$ знак θ меняется с периодом 2π , причем амплитуда изменения θ мала и все время уменьшается. Влияние второй среды ослабляется настолько, что ее можно не принимать во внимание (электромагнитная волна почти полностью затухает в первом слое) [22].

Рассмотрим интересующий нас частный случай:

$$\mu_1 = 1, \quad \rho_1 = \rho_2 = \rho_k, \quad \mu_2 > 1.$$

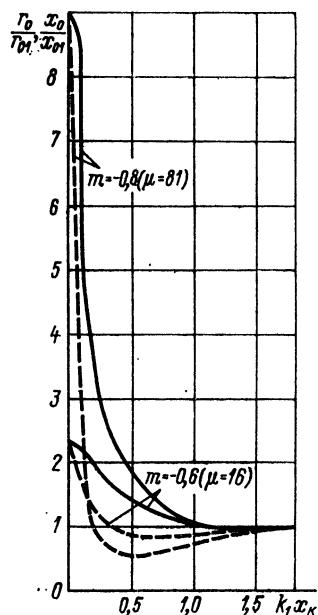


Рис. 4-4. Зависимость активного $\left(\frac{r_0}{r_{01}} = V\bar{2}K \cos \varphi\right)$ и внутреннего реактивного $\left(\frac{x_0}{x_{01}} = V\bar{2}K \sin \varphi\right)$ сопротивлений от глубины первой среды при различных значениях магнитной проницаемости второй

— активное сопротивление;
— — — внутреннее реактивное сопротивление

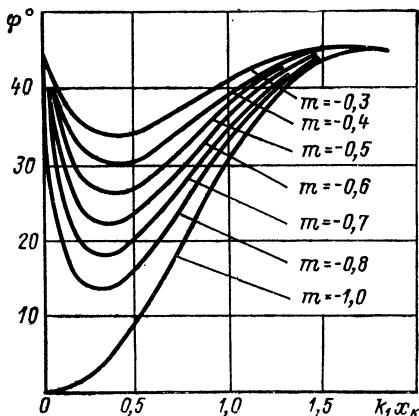


Рис. 4-5. Зависимость угла φ от глубины первой среды при различных значениях магнитной проницаемости второй

Выясним пределы изменения K в зависимости от x_k и m . Из формулы (4-15) видно, что $\lim_{x_k \rightarrow \infty} K = 1$, так как все члены, содержащие x_k , обращаются в нуль. Устремив x_k к нулю, получим $\lim_{x_k \rightarrow 0} K = \sqrt{\mu_2}$.

Если $\mu_2 \rightarrow \infty$, то при $x_k = 0$ $K \rightarrow \infty$, так как в среду с $\mu = \infty$ электромагнитная энергия не проникает. Электрическое сопротивление такой среды равно бесконечности.

Расчетные выражения для электрического сопротивления имеют вид:

$$z_0 = z_{01}K = V\bar{2}\frac{\rho_1}{\Delta_1}K = V\omega\mu_0\rho_1K, \text{ ом}$$

или, так как $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$,

$$z_0 = 2,81 \cdot 10^{-3} K \sqrt{\rho_1 f}, \text{ ом.} \quad (4-18)$$

Если принять $\rho_1 = \rho_\kappa \approx 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{м}$, то

$$z_0 = 2,81 \cdot 10^{-6} K \sqrt{f}, \text{ ом.} \quad (4-19)$$

Активное и внутреннее реактивное сопротивления равны:

$$r_0 = z_0 \cos \varphi, \quad x_0 = z_0 \sin \varphi. \quad (4-20)$$

Для магнитного сопротивления будем иметь:

$$\dot{Z}_{m0} = j \frac{\omega}{z_0} = \frac{\omega}{z_0} e^{j \frac{\pi}{2}} e^{-j\varphi} = \frac{\omega}{K z_{01}} e^{j\vartheta} = Z_{m0} e^{j\vartheta}, \quad (4-21)$$

где $\vartheta = \frac{\pi}{2} - \varphi$ — угол, на который магнитный поток в металле отстает от напряженности магнитного поля на его поверхности.

Составляющие магнитного сопротивления равны:

$$R_{m0} = Z_{m0} \cos \vartheta = Z_{m0} \sin \varphi, \quad X = Z_{m0} \cos \varphi. \quad (4-22)$$

Из приведенных на рис. 4-4 зависимостей $r_0/r_{01}, x_0/x_{01}$ и на рис. 4-5 зависимости φ от $k_1 x_\kappa$ при различных значениях m видно, что изменение всех электрических параметров выражено тем сильнее, чем больше абсолютное значение m или, что то же самое, чем больше μ_2 . Магнитная проницаемость уменьшается с ростом напряженности магнитного поля на границе раздела (при $x = x_\kappa$). Отсюда следует, что изменение параметров с ростом глубины тем больше, чем меньше удельная мощность. Например, при нагреве кузнецких заготовок изменение параметров выражено сильнее, чем при нагреве под поверхностную закалку, так как в первом случае удельная мощность в 5—10 раз меньше, чем во втором.

Приведенные кривые не дают непосредственно изменения параметров нагреваемой детали в процессе нагрева. С ростом глубины нагретого слоя x_κ при постоянной удельной мощности увеличивается μ_2 и абсолютное значение параметра m . Поэтому кривые, характеризующие реальный процесс, пойдут несколько более полого.

Из кривых на рис. 4-5 видно, что наименьшее значение φ , а следовательно, наибольший коэффициент мощности индуктора соответствует $k_1 x_\kappa \approx 0,3 \div 0,5$, что вполне подтверждается опытными данными.

4-4. Определение магнитной проницаемости по заданному режиму нагрева

При электрическом расчете заданными величинами обычно являются частота f , глубина закалки x_κ и средняя удельная мощность p_0 . Последняя в процессе нагрева не остается постоянной. При поверхностной закалке и других видах поверхностного нагрева

ее изменение обычно не превосходит 30% (см. § 2-1). Поэтому для приближенного расчета можно считать мощность постоянной и равной средней величине. В тех случаях, когда представляет особый интерес поведение электрической системы, изменение мощности может быть учтено (см. гл. 13).

Глубина закаленного слоя x_k принимается в расчете равной глубине прогрева до точки магнитных превращений. Без большой ошибки можно считать, что последняя приблизительно равна глубине, на которой в структуре стали содержится не меньше 50% мартенсита, что примерно соответствует твердости HRC 45—50 (см. § 2-3). Обычно при правильном выборе режима нагрева толщина этого слоя составляет около 70% полной толщины, определенной по макроструктуре.

Если за исходную величину для расчета принимается удельная мощность p_0 , то необходимо связать ее со значениями напряженности магнитных полей как на поверхности металла, так и на глубине x_k .

Выражение для удельной мощности получим, воспользовавшись формулой (3-34), подставив в нее значение r_0 , в соответствии с формулами (4-18) — (4-20). Тогда получим:

$$p_0 = 1,405 \cdot 10^{-3} H_{me}^2 K \sqrt{\rho_1 f} \cos \varphi, \text{ вт/м}^2. \quad (4-23)$$

Подставляя значение $\rho_1 = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$, получим:

$$p_0 = 1,405 \cdot 10^{-6} H_{me}^2 K \sqrt{f} \cos \varphi, \text{ вт/м}^2. \quad (4-24)$$

Обычно удельную мощность выражают в kвт/см^2 . Тогда

$$p_0 = 1,405 \cdot 10^{-13} H_{me}^2 K \sqrt{f} \cos \varphi, \text{ квт/см}^2. \quad (4-25)$$

Здесь H_{me} — напряженность магнитного поля на поверхности, а/м .

Если среда однородная, то $K = \sqrt{\mu}$ и $\cos \varphi = 0,707$. Тогда формула (4-23) превращается в формулу (2-1).

Найдем теперь соотношение между напряженностями магнитного поля на поверхности и на границе сред. Из формул (4-1) и (4-3) получим:

$$\dot{N} = \frac{H_{me}}{H_{mk}} = \frac{A_1 + B_1}{A_2 e^{-k_2(1+j)x_k}}.$$

Заменяя A_1 и B_1 их значениями из формулы (4-6), найдем:

$$\begin{aligned} \dot{N} &= \frac{1}{2} \left[(1 + \sqrt{\mu_2}) e^{k_1(1+j)x_k} + (1 - \sqrt{\mu_2}) e^{-k_1(1+j)x_k} \right] = \\ &= \frac{1}{2} (1 + \sqrt{\mu_2}) \left[e^{k_1(1+j)x_k} + m e^{-k_1(1+j)x_k} \right]. \end{aligned}$$

Представив комплексы в тригонометрической форме, найдем после соответствующих преобразований модуль этого выражения:

$$N = \frac{H_{me}}{H_{mk}} = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{\mu_2}) \sqrt{e^{2k_1 x_k} + m^2 e^{-2k_1 x_k} + 2m \cos 2k_1 x_k} \quad (4-26)$$

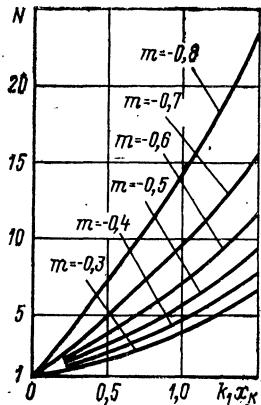


Рис. 4-6. Зависимость отношения напряженностей магнитных полей на поверхности и на границе раздела от глубины первой среды при различных значениях магнитной проницаемости второй

Если $m = -1$, то $N = \infty$, так как при $\mu_2 = \infty$ $H_{mk} = 0$. На рис. 4-6 приведены зависимости $N = f(k_1 x_k)$ для различных m .

Значения наиболее важных для расчетов величин K , N , $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ приведены в табл. 4-1 — 4-4.

Магнитная проницаемость μ_2 определяется методом последовательных приближений. Поясним это на конкретном примере.

Пусть задано: $\rho_0 = 1 \text{ квт}/\text{см}^2 = 10^7 \text{ вт}/\text{м}^2$, $x_k = 4 \text{ мм}$, $f = 2500 \text{ Гц}$.

1. Находим горячую глубину проникновения тока по формуле (1-29):

$$\Delta_k = \frac{0,5}{\sqrt{f}} = 0,01 \text{ м. Тогда } k_1 x_k = \frac{0,004}{0,01} = 0,4.$$

2. Определяем напряженность поля на поверхности.

На основании формулы (4-24) найдем:

$$H_{me} = \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot 10^6}{1,405 K \sqrt{f} \cos \varphi}}, \text{ а/м.}$$

Таблица 4-1

Зависимость полного электрического сопротивления $K = z_0/z_{01}$ от относительной глубины наружного слоя

$k_1 x_k$	m						
	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0
0,0	1,856	2,334	3,000	4,000	5,600	9,000	∞
0,1	1,636	1,939	2,320	2,810	3,661	4,660	7,080
0,2	1,446	1,644	1,858	2,123	2,418	2,750	3,540
0,3	1,312	1,433	1,575	1,709	1,855	2,025	2,360
0,4	1,204	1,281	1,361	1,441	1,525	1,611	1,778
0,5	1,121	1,168	1,215	1,258	1,304	1,345	1,405
0,6	1,061	1,086	1,111	1,132	1,172	1,182	1,227
0,7	1,022	1,031	1,041	1,050	1,057	1,067	1,082
0,8	0,994	0,993	0,992	0,992	0,991	0,991	0,992
0,9	0,976	0,970	0,963	0,957	0,952	0,944	0,930
1,0	0,967	0,955	0,946	0,936	0,925	0,916	0,892
1,1	0,962	0,948	0,937	0,925	0,915	0,902	0,877
1,2	0,961	0,946	0,935	0,922	0,911	0,901	0,877
1,3	0,962	0,950	0,939	0,928	0,916	0,908	0,882
1,4	0,968	0,956	0,945	0,934	0,924	0,915	0,892
1,5	0,972	0,962	0,953	0,943	0,934	0,926	0,908
1,57	0,975	0,967	0,958	0,949	0,942	0,934	0,919

Таблица 4-2

Зависимость отношения напряженностей магнитных полей на поверхности и на границе сред ($N = H_{me}/H_{mk}$) от относительной глубины наружного слоя $k_1 x_k$

$k_1 x_k$	m						
	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	—
0,1	1,204	1,262	1,336	1,486	1,683	2,090	∞
0,2	1,426	1,546	1,715	1,983	2,414	3,340	∞
0,3	1,676	1,866	2,130	2,540	3,230	4,620	∞
0,4	1,943	2,134	2,565	3,110	4,040	5,930	∞
0,5	2,230	2,555	3,020	3,720	4,900	7,230	∞
0,6	2,530	2,920	3,480	4,320	5,720	8,580	∞
0,7	2,845	3,320	3,975	4,960	6,620	9,920	∞
0,8	3,190	3,730	4,480	5,620	7,520	11,320	∞
0,9	3,545	4,170	5,030	6,320	8,470	12,800	∞
1,0	3,960	4,650	5,600	7,040	9,460	14,260	∞
1,1	4,370	5,130	6,190	7,800	10,460	15,770	∞
1,2	4,840	5,690	6,860	8,630	11,600	17,500	∞
1,3	5,320	6,260	7,550	9,510	12,750	19,300	∞
1,4	5,880	6,900	8,320	10,460	14,050	21,200	∞
1,5	6,500	7,620	9,170	11,500	15,440	23,300	∞
1,57	7,070	8,260	9,970	12,500	16,760	25,200	∞

Таблица 4-3

Зависимость $\cos \varphi$ от $k_1 x_k$

$k_1 x_k$	m						
	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0
0,0	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	1,000
0,1	0,776	0,800	0,830	0,861	0,897	0,937	1,000
0,2	0,812	0,845	0,877	0,909	0,941	0,967	1,000
0,3	0,827	0,860	0,895	0,925	0,951	0,973	0,998
0,4	0,831	0,865	0,897	0,925	0,949	0,969	0,994
0,5	0,825	0,859	0,889	0,916	0,938	0,959	0,988
0,6	0,816	0,847	0,875	0,900	0,923	0,943	0,974
0,7	0,802	0,831	0,857	0,880	0,901	0,921	0,954
0,8	0,787	0,812	0,834	0,856	0,876	0,894	0,927
0,9	0,772	0,792	0,811	0,829	0,847	0,863	0,893
1,0	0,758	0,773	0,788	0,804	0,817	0,832	0,858
1,1	0,744	0,756	0,768	0,779	0,790	0,803	0,822
1,2	0,732	0,741	0,749	0,758	0,765	0,773	0,788
1,3	0,724	0,728	0,733	0,739	0,744	0,749	0,760
1,4	0,715	0,718	0,721	0,724	0,727	0,730	0,755
1,5	0,710	0,711	0,712	0,713	0,714	0,715	0,717
1,57	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707

Задаемся тремя значениями m , например, $-0,4; -0,5; -0,7$ и, найдя по табл. 4-1 — 4-3 величины K , N и $\cos \varphi$, вычислим три значения H_{me} и $H_{mk} = H_{me}/N$.

А. $m = -0,4$ ($\mu_2 = 5,45$); $K = 1,281$; $N = 2,134$; $\cos \varphi = 0,865$;

$$H_{me} = \sqrt{\frac{10^7 \cdot 10^6}{1,405 \cdot 1,281 \cdot 50 \cdot 0,865}} = 3,58 \cdot 10^5 \text{ а/м};$$

$$H_{mk} = 3,58 \cdot 10^5 / 2,134 = 1,68 \cdot 10^5 \text{ а/м.}$$

Из рис. 3-5 находим: $\mu'_2 = 10,62$.

Следовательно,

$$m' = \frac{1 - \sqrt{10,62}}{1 + \sqrt{10,62}} = -0,53.$$

Здесь μ'_2 и m' — величины, определенные из кривой намагничивания по вычисленному значению H_{mk} .

Б. $m = -0,5$ ($\mu_2 = 9$); $K = 1,361$; $N = 2,565$; $\cos \varphi = 0,897$;

$$H_{me} = \sqrt{\frac{10^7 \cdot 10^6}{1,405 \cdot 1,361 \cdot 50 \cdot 0,897}} = 3,42 \cdot 10^5 \text{ а/м};$$

$$H_{mk} = 1,332 \cdot 10^5 \text{ а/м}; \mu'_2 = 13,1; m = -0,567$$

В. $m = -0,7$ ($\mu_2 = 32$); $K = 1,525$; $N = 4,04$; $\cos \varphi = 0,949$;

$$H_{me} = \sqrt{\frac{10^7 \cdot 10^6}{1,405 \cdot 1,525 \cdot 50 \cdot 0,949}} = 3,13 \cdot 10^5 \text{ а/м};$$

$$H_{mk} = 0,774 \cdot 10^5 \text{ а/м}; \mu'_2 = 21,5; m' = -0,644.$$

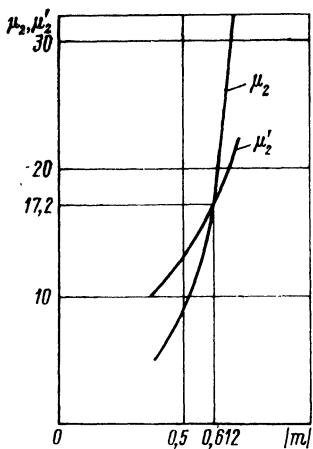


Рис. 4-7. Пример определения магнитной проницаемости второй среды

Таблица 4-4

Зависимость $\sin \varphi$ от $k_1 x_K$

$k_1 x_K$	m						
	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0
0,0	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,000
0,1	0,630	0,597	0,558	0,509	0,442	0,350	0,006
0,2	0,584	0,535	0,480	0,416	0,341	0,255	0,029
0,3	0,562	0,511	0,446	0,381	0,309	0,231	0,059
0,4	0,556	0,502	0,443	0,381	0,315	0,248	0,107
0,5	0,565	0,512	0,458	0,401	0,347	0,285	0,155
0,6	0,578	0,532	0,485	0,436	0,384	0,334	0,227
0,7	0,597	0,557	0,516	0,475	0,433	0,390	0,302
0,8	0,617	0,584	0,552	0,518	0,484	0,448	0,374
0,9	0,636	0,611	0,585	0,559	0,532	0,505	0,450
1,0	0,653	0,635	0,615	0,596	0,576	0,556	0,514
1,1	0,667	0,655	0,641	0,627	0,613	0,596	0,569
1,2	0,681	0,671	0,661	0,653	0,644	0,634	0,615
1,3	0,689	0,685	0,680	0,674	0,668	0,663	0,651
1,4	0,699	0,696	0,693	0,689	0,686	0,683	0,678
1,5	0,704	0,703	0,702	0,701	0,700	0,699	0,697
1,57	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707

На основании полученных данных строим две кривые (рис. 4-7): $\mu_2 = f(m)$ и $\mu'_2 = f'(m)$. Точка их пересечения дает искомое значение μ_2 , а следовательно, и m . По оси абсцисс отложены абсолютные значения m .

Каждая пара значений μ_2 и μ'_2 относится к одному из трех заданных значений m .

Находим: $\mu_2 = 17,2$; $m = -0,612$.

4-5. Эффективная глубина проникновения тока в двухслойную среду

Активное сопротивление при поверхностном эффекте независимо от характера изменения ρ и μ по сечению всегда может быть представлено в виде:

$$r = \frac{l}{a} \frac{\rho}{\xi},$$

где ξ — эффективная глубина проникновения тока, в пределах которой плотность тока условно постоянна.

Из формул (4-16) и (4-20) имеем для активного сопротивления единичного квадрата двухслойной среды:

$$r_0 = Kz_{01} \cos \varphi = \sqrt{2} Kr_{01} \cos \varphi,$$

где r_{01} — активное сопротивление единичного квадрата однородной стали при температуре выше точки магнитных превращений.

Так как $r_{01} = \rho_\kappa / \Delta_\kappa$, имеем:

$$M = \frac{r_{01}}{r_0} = \frac{\xi}{\Delta_\kappa} = \frac{1}{\sqrt{2} K \cos \varphi}.$$

Таким образом, получаем формулу (2-20), приведенную ранее. Значения M в зависимости от $k_1 x_\kappa$ и m приведены в табл. 4-5.

Таблица 4-5
Зависимость M от $k_1 x_\kappa$

$k_1 x_\kappa$	m						
	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0
0,0	0,539	0,429	0,333	0,250	0,177	0,111	0,0
0,1	0,559	0,452	0,368	0,293	0,215	0,147	0,100
0,2	0,603	0,508	0,433	0,369	0,313	0,266	0,200
0,3	0,658	0,572	0,503	0,447	0,402	0,390	0,300
0,4	0,707	0,642	0,578	0,532	0,487	0,474	0,400
0,5	0,764	0,705	0,646	0,614	0,578	0,550	0,497
0,6	0,813	0,770	0,730	0,690	0,658	0,637	0,592
0,7	0,862	0,820	0,794	0,770	0,742	0,720	0,685
0,8	0,902	0,878	0,848	0,834	0,820	0,800	0,769
0,9	0,935	0,918	0,902	0,902	0,894	0,870	0,852
1,0	0,970	0,962	0,953	0,953	0,944	0,944	0,925

Эффективная глубина проникновения тока ξ используется в тепловых расчетах режимов поверхностной закалки в качестве глубины активного слоя (гл. 2) и для определения расчетного диаметра нагреваемой детали (гл. 5 и 7).

В приближенных расчетах в качестве магнитной проницаемости второй среды можно подставлять значение $\mu_2 = 16$, которое является средним в диапазоне применяемых мощностей. Это значение может быть уточнено, если применить метод последовательных приближений. Для этого необходимо после нахождения удельной мощности проверить, как указано в § 4-4, значение магнитной проницаемости и в случае большого расхождения принять новое. Если совпадение принятой и полученной в результате проверки величин будет в пределах 30—40%, то дальнейшее уточнение практически не сказывается на результате.

При $x_k \gg \Delta_k$ $\xi \approx \Delta_k$, поэтому в табл. 4-5 значения приведены лишь для $k_1 x_k \leq 1$.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РАСЧЕТ ИНДУКТОРА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

5-1. Определение ширины нагреваемой полосы

Как для определения ширины индуктора при закалке методом одновременного нагрева, так и для электрического расчета необходимо знать соотношение между шириной нагретой полосы и шириной индуктора.

Ширина нагретой полосы определяется двумя факторами: 1) распределением индуцированного тока на поверхности нагреваемого изделия; 2) утечкой тепла в ненагретую массу металла. Первый фактор является весьма существенным для построения электрического расчета.

Примерное распределение плотности тока под индуцирующим проводом при разных значениях зазора h приведено на рис. 5-1, а.

По оси ординат отложена так называемая поверхностная плотность тока, или, как часто говорят, «настил» тока, это название подчеркивает поверхностный характер явления. В практической системе единиц, принятой в настоящей книге, поверхностная плотность тока, так же как напряженность магнитного поля, выражается в амперах на метр и имеет то же численное значение. Поэтому в дальнейшем мы будем говорить о распределении напряженности магнитного поля под индуктором:

$$H_{me} = f(z),$$

где z — расстояние от середины индуцирующего провода.

Кривая 2 показывает, что при узком индукторе зависимость $H_{me} = f(z)$ становится расплывчатой.

На рис. 5-1, б представлена кривая распределения удельной мощности

$$\frac{p_z}{p_0} = \left(\frac{H_{me_z}}{H_{me_0}} \right)^2 = f(z),$$

где p_z и p_0 — значения удельной мощности в точке z и под серединой индуктора ($z = 0$) соответственно.

Заменим такое распределение равномерным в пределах слоя шириной a_2 таким образом, чтобы $p_z = p_0$ при $|z| \leq a_2/2$ и $p_z = 0$ при $|z| > a_2/2$. При этом a_2 будем называть эквивалентной шириной активного слоя. Тогда, как показывают измерения, $a_1 \approx a_2$, если

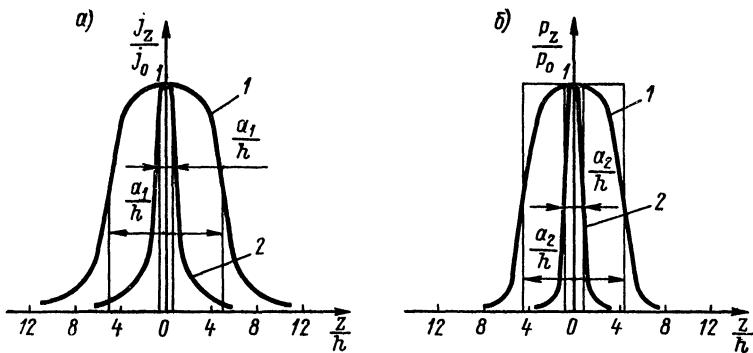


Рис. 5-1. Распределение под индуктором: а — поверхностной плотности тока; б — удельной мощности
1 — $a_1/h = 10$; 2 — $a_1/h = 1$

$a_1/n > 1,6$. При $a_1/h > 5$ картина действительного распределения удельной мощности вообще близка к идеализированной. Эквивалентная ширина активного слоя в этом случае почти совпадает с его действительной шириной, так как при $|z| > a_1/2$ p_z быстро спадает практически до нуля.

Если $a_1/h < 1,6$, то распределение поверхностной плотности тока перестает изменяться при дальнейшем уменьшении ширины индуктора и становится примерно таким же, как и при идеализированном бесконечно тонком проводе.

На основании сказанного мы будем в электрических расчетах принимать $a_1 = a_2 = a$. Однако действительная ширина слоя, нагретого до заданной температуры, и, следовательно, ширина закаленной полосы не будут равны ширине индуктора. Если закалке подвергается только часть поверхности, то ширина закаленного слоя оказывается всегда меньше ширины индуктора за счет теплоотвода в ненагретую часть металла. На рис. 5-2 показана примерная картина растекания тепла и форма нагретого слоя в продольном сечении. На основании опытных данных можно считать, что, если ширина индуктирующего провода a_1 меньше его диаметра D_1 , то

$$a_3/a_1 \approx 0,8, \quad (5-1)$$

где a_3 — ширина закаленного слоя.

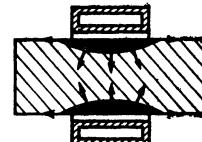


Рис. 5-2. Форма нагретого слоя в продольном сечении.
斯特реки указывают направление утечки тепла

При $a_1/D_1 \gg 1$ имеем:

$$1 > a_3/a_1 > 0,8. \quad (5-2)$$

Если закалка производится по всей поверхности, то заметный теплоотвод в боковых направлениях отсутствует. Ширина индуктора берется несколько меньше длины детали l .

В среднем можно считать, что при радиочастотах

$$a_1 \approx l - h \quad (5-3)$$

и при звуковых частотах ($f \leq 10^4$ Гц)

$$a_1 \approx l. \quad (5-4)$$

5-2. Напряжение на зажимах длинного индуктора

Напряжение на участке a бесконечно длинного индуктора определяется по формуле (1-40).

При поверхностном нагреве поверхностный эффект, как правило, выражен резко, что делает возможным использование формул, полученных для плоской электромагнитной волны.

Активное и внутреннее реактивное сопротивления цилиндра определяются из соотношений:

$$r_2 = \frac{\pi D'_2}{a} r_0, \quad (5-5)$$

$$x_{2M} = \frac{\pi D'_2}{a} x_0, \quad (5-6)$$

$$r'_2 = w^2 r_2, \quad (5-7)$$

$$x'_{2M} = w^2 x_{2M}, \quad (5-8)$$

где D'_2 — расчетный диаметр цилиндра в метрах, определяемый по формуле (1-45) в холодном и промежуточном режимах

Так как обычно в холодном и промежуточных режимах $\Delta_2 \ll D_2$, то $D'_2 \approx D_2$.

В горячем режиме r_0 и x_0 определяются по формулам (4-19) и (4-20). В этом случае расчетный диаметр равен:

$$D'_2 = D_2 - \xi, \quad (5-9)$$

где $\xi = M\Delta_k$ — глубина активного слоя.

При вычислении глубины активного слоя ξ принимается среднее значение магнитной проницаемости второй среды $\mu = 16$.

Если $x_k > 1,5\Delta_k$, то r_2 и x_{2M} вычисляются по формуле (1-38), а $\xi = \Delta_k = 0,5/\sqrt{f}$, м, так как $\rho_2 = \rho_k \approx 10^{-6}$ ом·м.

Замена диаметра цилиндра D_2 расчетным диаметром D'_2 [формула (5-9)] позволяет вычислить активное сопротивление r_2 с точностью около 1% и внутреннее реактивное сопротивление цилиндра

x_{2m} с точностью до 10%, если $\frac{D_2}{\xi} > 6$. При этом в качестве базовых мы принимаем соответствующие значения, полученные из решения уравнений электромагнитного поля для цилиндрического проводника.

Еще лучшее приближение можно получить, если вычислить D'_2 как диаметр окружности, разделяющей сечение активного слоя на два кольца равной площади.

На рис. 5-3 показано поперечное сечение нагреваемого цилиндра. Для колец равной площади имеем:

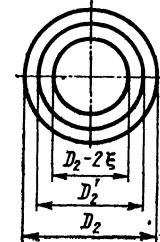
$$D'_2 = \sqrt{D_2^2 - 2\xi(D_2 - \xi)} \quad (5-10)$$

или

$$\frac{D'_2}{\xi} = \sqrt{\left(\frac{D_2}{\xi}\right)^2 - 2\left(\frac{D_2}{\xi} - 1\right)} = f\left(\frac{D_2}{\xi}\right). \quad (5-11)$$

Пользуясь выражением (5-10) или (5-11) для расчетного диаметра, можно при $D_2/\xi \geq 5$ с достаточной для практики точностью применить в электрических расчетах ранее выведенные формулы. Последнее в сущности обозначает почти неограниченное их применение для всех случаев поверхностной закалки цилиндрических изделий.

Рис. 5-3. Пояснение к определению расчетного диаметра нагреваемого цилиндра



5-3. Схемы замещения короткого индуктора

Короткий индуктор в известной мере может быть уподоблен трансформатору с большим рассеянием и, что особенно важно, с относительно большим током холостого хода. Нагреваемый объект является одновременно и нагрузкой «трансформатора» и частью его магнитной системы.

Полная схема замещения индуктора, подобная схеме замещения трансформатора, приведена на рис. 5-4, а [24]. На схеме x_{s1} и x_{s2} — первичная и вторичная реактивности рассеяния, $x_0 = \omega/R_{m0}$, причем R_{m0} — магнитное сопротивление участка пути магнитного потока вне индуктора и загрузки, которое в дальнейшем называется магнитным сопротивлением обратного замыкания магнитного потока, r_2 и x_{2m} — активное и внутреннее реактивное сопротивления загрузки, приведенные к току участка индуктора бесконечной длины. Сопротивления r_2 и x_{2m} определяются в зависимости от формы тела и режима нагрева так, как было описано раньше. Реактивное сопротивление x_0 определяет составляющую магнитодвижущей силы, необходимой для преодоления магнитным потоком пространства вне индуктора.

Схема на рис. 5-4, а легко приводится к схеме на рис. 5-4, б.
На схеме

$$r_3 = r_1 + r'_2, \quad (5-12)$$

$$x_3 = x_{s1} + x'_2, \quad (5-13)$$

где r_3 и x_3 — эквивалентные активное и реактивное сопротивления индуктора; r_1 — активное сопротивление провода индуктора; x_{s1} — первичная реактивность рассеяния; r'_2 и x'_2 — активное и реактивное сопротивления вторичной цепи, приведенные к току индуктора.

Полное приведенное сопротивление нагреваемого тела

$$z'_2 = \frac{\dot{E}_2}{I_u} = \frac{jx_0 [r_2 + j(x_{s2} + x_{2M})]}{r_2 + j(x_{s2} + x_{2M} + x_0)} = r'_2 + jx'_2. \quad (5-14)$$

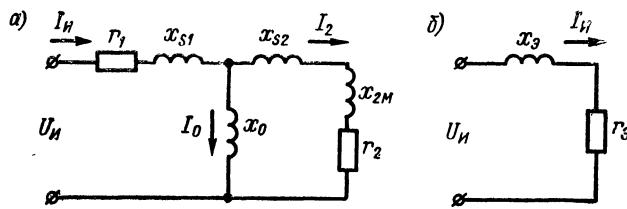


Рис. 5-4. Схемы замещения индуктора: а — полная схема замещения; б — упрощенная схема замещения

Разделяя действительную и мнимую части, имеем:

$$r'_2 = cr_2, \quad (5-15)$$

$$x'_2 = c \left[x_{s2} + x_{2M} + \frac{(x_{s2} + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \right], \quad (5-16)$$

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_{s2} + x_{2M}}{x_0}\right)^2}. \quad (5-17)$$

Содержащийся в формулах (5-15) — (5-17) коэффициент c будем в дальнейшем называть коэффициентом приведения активного сопротивления.

Так как мощность в нагреваемом объекте $P_2 = I_u^2 r'_2 = I_2^2 r_2$, то при $w = 1$ имеем:

$$c = r'_2/r_2 = I_2^2/I_u^2.$$

Для определения составляющих схемы замещения на рис. 5-4, а рассмотрим магнитное поле индуктора, предположив вначале, что его внутреннее реактивное сопротивление $x_{1M} = 0$.

На рис. 5-5, а приведена примерная картина магнитного поля индуктора длиной a_1 , внутри которого находится нагреваемый

объект длиной $a_2 \leq a_1$, а также магнитная схема замещения системы [24].

Будем считать, что все витки индуктора охватывает один и тот же магнитный поток Φ_H . На длине a_2 магнитный поток проходит по нагреваемому объекту и индуктору в виде двух составляющих: Φ_s (поток рассеяния) и Φ_m (поток в нагреваемом объекте), а на остальном пути — одним общим потоком Φ_H .

Примем идеализированную картину магнитного поля, в которой внутри индуктора все силовые линии параллельны оси, а внешнее поле такое же, как у пустого индуктора. В соответствии с маг-

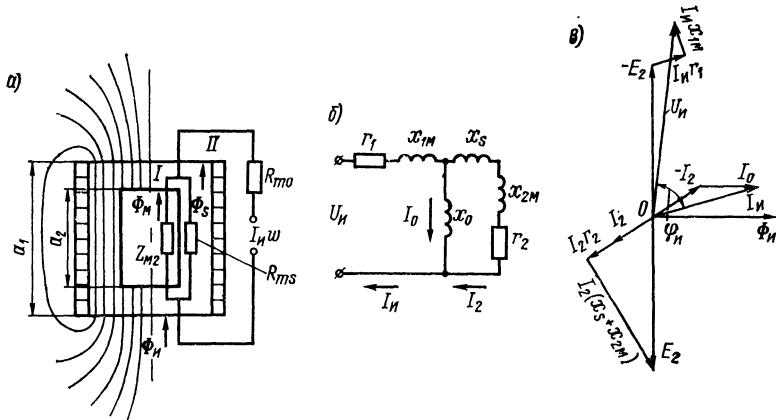


Рис. 5-5. Схемы замещения индуктора и векторная диаграмма:
а — магнитная схема замещения; б — электрическая схема замещения; в — векторная диаграмма

нитной схемой замещения на рис. 5-5, а полный ток индуктора ωI_H расходуется на проведение общего магнитного потока внутри индуктора на участке a_2 и на всем пути его обратного замыкания.

Магнитной схеме замещения соответствуют приведенная на рис. 5-5, б электрическая схема замещения и векторная диаграмма на рис. 5-5, в. Электрическая схема замещения дополнена внутренним реактивным сопротивлением индуктора x_{1m} , играющим роль x_{s1} , и активным сопротивлением — r_1 , что делает ее похожей на общую схему замещения на рис. 5-4, а.

Реактивность рассеяния x_s [в формулах (5-14) — (5-17) сопротивление x_{s2}] рассчитывается для картины равномерного поля по формуле:

$$x_s = \omega \mu_0 \frac{S_h}{a_2} w^2, \quad (5-18)$$

где S_h — площадь поперечного сечения воздушного зазора, m^2 ; a_2 — длина нагреваемого объекта, m ; w — число витков.

В дальнейшем для простоты примем, что число витков индуктора $w = 1$. Если $w > 1$, то в схеме замещения и во всех формулах следует заменить r_2, x_{2m}, x_s, I, U_i на $w^2 r_2, w^2 x_{2m}, w^2 x_s, I/w, wU_i$.

Сопротивления r_2 и x_{2m} рассчитываются для отрезка a_2 системы бесконечной длины, как уже указывалось выше, в зависимости от режима нагрева.

Для определения x_0 необходимо найти магнитное сопротивление обратного замыкания R_{m0} , обусловленное участками I и II (см. рис. 5-5, а) соответственно внутри и вне индуктора:

$$R_{m0} = R_{mI} + R_{mII}, \quad (5-19)$$

где R_{mI} — магнитное сопротивление участка ($a_1 — a_2$) внутри индуктора, но за пределами нагреваемого объекта; R_{mII} — магнитное сопротивление участка пути обратного замыкания магнитного потока вне индуктора.

Составляющую полного магнитного сопротивления R_{mI} можно определить из соотношений:

$$R_{mI} = \frac{\omega}{\Delta x_{10}}, \quad (5-20)$$

$$\Delta x_{10} = \omega \mu_0 \frac{S_1}{a_1 - a_2} = \omega \mu_0 \frac{S_1}{a_1} \frac{a_1}{a_1 - a_2} = x_{10} \frac{a_1}{a_1 - a_2}, \quad (5-21)$$

где Δx_{10} — реактивное сопротивление условного соленоида длиной $a_1 — a_2$; $x_{10} = \omega \mu_0 S_1 / a_1$ — реактивное сопротивление отрезка a_1 пустого индуктора бесконечной длины; S_1 — площадь окна индуктора (для цилиндрического индуктора $S_1 = \pi D_1^2 / 4$).

Таким образом, имеем:

$$R_{mI} = \frac{\omega}{x_{10}} \frac{a_1 - a_2}{a_1}. \quad (5-22)$$

Вычисленное по формуле (5-22) магнитное сопротивление участка I несколько меньше действительного, так как вследствие поверхностного эффекта магнитный поток Φ_m концентрируется вблизи поверхности нагреваемого объекта. Однако неравномерность в распределении магнитного потока наблюдается лишь на сравнительно коротком участке вблизи торца объекта и, как показывают эксперименты, мало сказываются на окончательном результате.

При вычислении магнитного сопротивления R_{mII} участка II , расположенного вне индуктора, будем исходить из аналогии магнитных полей пустого и загруженного индукторов.

Полное магнитное сопротивление пустого индуктора с любой формой поперечного сечения легко определяется из выражения для его реактивного сопротивления

$$R_m = \frac{\omega}{x_1} = \frac{\omega}{x_{10} k_1}, \quad (5-23)$$

где $k_1 < 1$ — поправочный коэффициент, учитывающий магнитное сопротивление обратного замыкания; это известный коэффициент Нагаока [12] для цилиндрического индуктора или подобный ему

при другой форме поперечного сечения; x_{10} — реактивное сопротивление отрезка a_1 индуктора бесконечной длины.

Для получения R_{mII} из полного магнитного сопротивления R_m необходимо вычесть магнитное сопротивление участка внутри пустого индуктора R_{ma_1} .

Основываясь на высказанном ранее допущении о равномерности поля внутри индуктора, найдем:

$$R_{ma_1} = \frac{\omega}{x_{10}}, \quad R_{mII} = \frac{\omega}{k_1 x_{10}} - \frac{\omega}{x_{10}} = \frac{\omega}{x_{10}} \frac{1 - k_1}{k_1}. \quad (5-24)$$

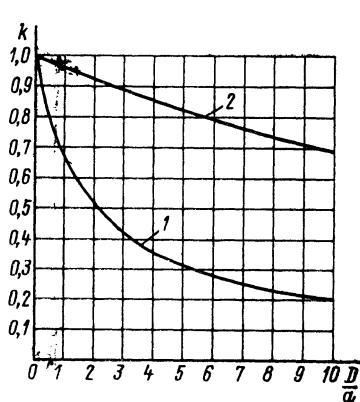


Рис. 5-6. Поправочный коэффициент для вычисления индуктивности соленоида с круглым поперечным сечением

Для кривой 2 числа на оси абсцисс множатся на 10^{-1}

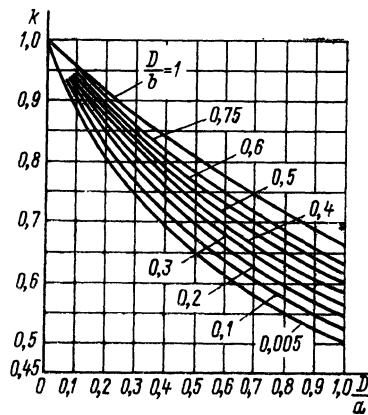


Рис. 5-7. Поправочный коэффициент для вычисления индуктивности соленоида с прямоугольным поперечным сечением

Отсюда получим:

$$R_{m0} = R_{mI} + R_{mII} = \frac{\omega}{x_{10}} \frac{a_1 - k_1 a_2}{k_1 a_1}$$

и

$$x_0 = \frac{\omega}{R_{m0}} = x_{10} \frac{k_1 a_1}{a_1 - k_1 a_2}. \quad (5-25)$$

В важном частном случае равенства длины индуктора и нагреваемого объекта ($a_1 = a_2$) имеем:

$$x_0 = x_{10} \frac{k_1}{1 - k_1}. \quad (5-26)$$

Допущение о равномерности поля внутри короткого индуктора приводит к преуменьшению R_{ma_1} и, следовательно, к преувеличению R_{mI} , что в окончательном результате для R_{m0} в известной мере компенсирует ошибку в вычислении R_{mI} , о которой упоминалось раньше.

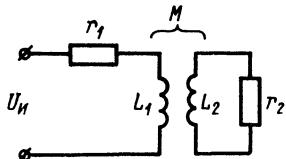
Часто необходимо нагреть участок поверхности (длина нагреваемого цилиндра или пластины больше длины индуктора). В этом

случае можно считать, что $a_1 \approx a_2$, так как индуцированный ток концентрируется под индуктором (см. § 5-1). При этом, однако, в определение x_0 вносится некоторая условность.

На рис. 5-6 и 5-7 представлены графики поправочных коэффициентов $k = f(D/a)$ и $k = f(D/a, D/b)$ для вычисления индуктивности соленоидов с круглым и прямоугольным поперечным сечениями, графики необходимы для вычисления x_0 .

Метод приведения параметров нагреваемого объекта по общему магнитному потоку позволяет получить все предельные случаи. Если D_2 и $a_2 \rightarrow 0$, то $r_s \rightarrow r_1$ и $x_s \rightarrow x_{1M} + k_1 x_{10}$, т. е. получается пустой индуктор.

С повышением частоты коэффициент приведения активного сопротивления c увеличивается, так как $r_2 \equiv \sqrt{f}$ и $x_{2M} \equiv \sqrt{f}$, а $x_s \equiv f$ и $x_0 \equiv f$. В пределе, при $f \rightarrow \infty$, получим



$$c \rightarrow \frac{k_1^2}{\left[\frac{a_1}{a_2} - \frac{D_2^2}{D_1^2} \left(\frac{a_1}{a_2} - k_1 \right) \right]^2}.$$

При этом $c < 1$, если $D_2/D_1 < 1$.

Экспериментальная проверка, проведенная при различных отношениях D_2/Δ_2 , свидетельствует о незначительных ошибках расчета, обычно составляющих единицы процентов.¹

Отметим, что при ярко выраженном поверхностном эффекте $\left(\frac{D_2}{\Delta_2} > 10\right)$ и немагнитных загрузках, практически те же результаты получаются, если представить систему индуктор — нагреваемый объект в виде воздушного трансформатора (рис. 5-8) и произвести расчет, пользуясь теорией связанных контуров. На рис. 5-8 r_1 — активное сопротивление индуктора; L_1 — индуктивность пустого индуктора; L_2 — индуктивность одновиткового соленоида с размерами загрузки, причем $D_2 = D_2$, M — взаимоиндуктивность и r_2 — активное сопротивление загрузки, вычисленное по формуле (1-38).

Этот метод довольно широко представлен в литературе (см., например [2, 5, 6, 7, 37, 43]), однако следует иметь в виду, что применение его при полностью или частично ферромагнитной загрузке, а также при относительно низких частотах приводит к совершенно неудовлетворительным результатам, прежде всего вследствие неопределенности в этих случаях значения взаимоиндуктивности M .

¹ Для весьма длинного цилиндра из металла с постоянными ρ и μ , помещенного в короткий индуктор, получено строгое аналитическое решение [20, 21]. Расхождения в значениях приведенных сопротивлений, полученные при вычислении по точным и приближенным формулам, составляют обычно единицы процентов.

5-4. Активное и внутреннее реактивное сопротивления провода индуктора

Вследствие кольцевого эффекта и эффекта близости ток концентрируется в основном у стороны индуктирующего провода, обращенной к нагреваемой поверхности.

Если толщина d_1 индуктирующего провода достаточно велика, то на противоположной стороне его ток практически отсутствует.

Применив к вычислению сопротивлений формулы (4-19) и (4-20), положив в них $m = -1$ и $x_k = d_1$, будем иметь:

$$r_1 = 2,81 \cdot 10^{-3} \frac{\pi D_1'}{b} \omega K \sqrt{\rho_1 f} \cos \varphi, \text{ ом}$$

или

$$r_1 = \frac{\pi D_1' \omega}{b} r_{01} \sqrt{2} K \cos \varphi, \text{ ом},$$

где D_1' — расчетный диаметр индуктора, м; b — ширина витка, м; $D_1' \approx D_1 + \Delta_1$ при $d_1 \geq \Delta_1$; $D_1' \approx D_1 + d_1$ при $d_1 \leq \Delta_1$; D_1 — внутренний диаметр индуктора, м; Δ_1 — глубина проникновения тока в медь, м.

Считая, что средняя температура меди составляет около 60° С ($\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$), получим:

$$r_1 \approx 3,98 \cdot 10^{-7} \frac{\pi D_1' \omega}{b} K \sqrt{f} \cos \varphi, \text{ ом}; \quad x_{1m} = r_1 \operatorname{tg} \varphi. \quad (5-27)$$

Если $d_1 > 1,6\Delta_1$, то $K \approx 1$ и $\cos \varphi \approx \sin \varphi \approx 0,707$.

Тогда

$$r_1 = x_{1m} = 2,81 \cdot 10^{-7} \frac{\pi D_1'}{b} \omega \sqrt{f}, \text{ ом} \quad (5-28)$$

Дальнейшее утолщение провода ведет лишь к излишним затратам меди. Поэтому в тех случаях, когда провод выполняется из трубы (индукторы для непрерывно-последовательного нагрева под закалку или многовитковые для одновременного нагрева), следует толщину d_1 выбирать близкой к 1,6 Δ_1 . Это, впрочем, возможно лишь при звуковых частотах. При радиочастотах Δ_1 составляет доли миллиметра и толщина трубы выбирается из соображений механической прочности. В одновитковых индукторах для одновременного нагрева толщина стенки значительно больше глубины проникновения тока.

Сопротивления r_1 и x_{1m} удобно выразить через активное сопротивление провода постоянному току. Учитывая, что $r_{01} = x_{01}$, имеем:

$$r_1 = \rho_1 \frac{\pi D_1'}{b \Delta_1} \omega \sqrt{2} K \cos \varphi, \quad x_{1m} = \rho_1 \frac{\pi D_1'}{b \Delta_1} \omega \sqrt{2} K \sin \varphi. \quad (5-29)$$

Умножив числитель и знаменатель на d_1 , получим расчетные формулы:

$$r_1 = r_{1n} k_r, \quad x_{1m} = r_{1n} k_x, \quad (5-30)$$

где

$$\left. \begin{aligned} r_{1n} &= \rho_1 \frac{\pi D_1'}{bd_1} w, \\ k_r &= \frac{d_1}{\Delta_1} \sqrt{2} K \cos \varphi, \quad k_x = \frac{d_1}{\Delta_1} \sqrt{2} K \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5-31)$$

Заметим, что r_{1n} представляет собой сопротивление проводника толщиной d_1 постоянному току. Коэффициент k_r называется коэффициентом увеличения активного сопротивления и k_x — коэффициентом изменения внутреннего реактивного сопротивления.¹

Значения k_r и k_x приведены на рис. 5-9.

Представляют интерес два частных случая.

При $0 < \frac{d_1}{\Delta_1} < 1$, $k_r \approx 1$, $k_x \approx \frac{2}{3} \left(\frac{d_1}{\Delta_1} \right)^2$;

при $\frac{d_1}{\Delta_1} > 2$, $k_r \approx k_x \approx \frac{d_1}{\Delta_1}$.

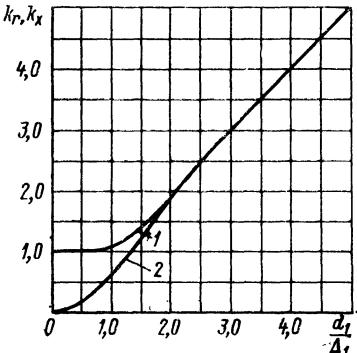


Рис. 5-9. Зависимость поправочных коэффициентов для вычисления активного и внутреннего реактивного сопротивлений от относительной толщины проводника

1 — $k_r = f(d_1/\Delta_1)$; 2 — $k_x = f(d_1/\Delta_1)$

В последнем случае $r_1 \approx x_{1m}$ и формулы (5-27) при $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$ переходят в формулу (5-28).

Обычно можно принимать $D_1' = D_1$, так как $D_1 \gg \Delta_1$.

5-5. Расчет подводящих шин

Чаще всего закалочные индукторы выполняются одновитковыми. Индуктор представляет более или менее узкое кольцо, подсоединенное с помощью подводящих шин и колодок к вторичной обмотке закалочного понижающего трансформатора, имеющей значительно большую ширину. Поэтому шины, как это видно на рис. 5-10, де-

¹ В литературе [8, 23], обычно приводят формулы:

$$k_r = \frac{d_1}{\Delta_1} \frac{\operatorname{sh}(2d_1/\Delta_1) + \sin(2d_1/\Delta_1)}{\operatorname{ch}(2d_1/\Delta_1) - \cos(2d_1/\Delta_1)},$$

$$k_x = \frac{d_1}{\Delta_1} \frac{\operatorname{sh}(2d_1/\Delta_1) - \sin(2d_1/\Delta_1)}{\operatorname{ch}(2d_1/\Delta_1) - \cos(2d_1/\Delta_1)}.$$

Формулы (5-31) легко приводятся к этому виду.

лаются расширяющимися от индуктора к обмотке. При такой их форме понижается как активное, так и реактивное сопротивление и улучшается распределение тока в самой вторичной обмотке трансформатора.

На рис. 5-10 приведен эскиз индуктора, конструкция подводящих шин которого может считаться характерной. Любые другие шины могут быть разбиты на участки, имеющие прямоугольную и трапециoidalную форму. Расстояние между шинами (для снижения их индуктивности) делается малым, обычно 2—3 мм.

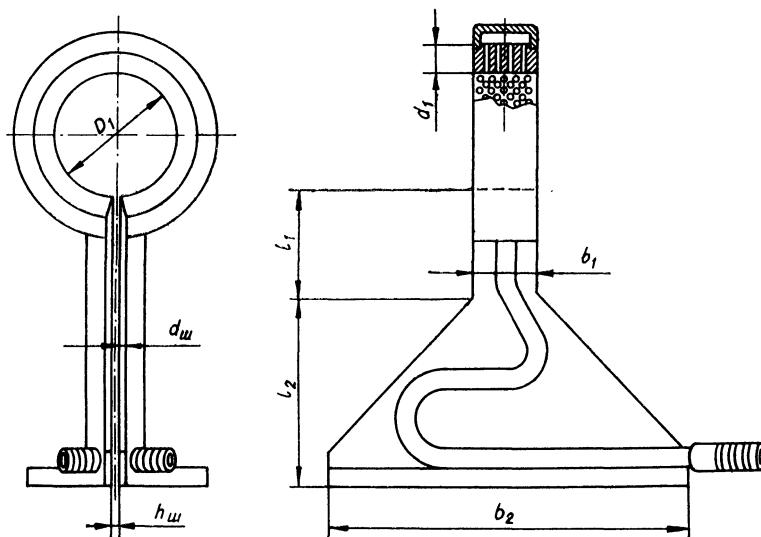


Рис. 5-10. Эскиз цилиндрического индуктора для одновременного нагрева

Вследствие малого зазора между шинами и потому резкого проявления эффекта близости ток при достаточной толщине шин концентрируется на их поверхностях, обращенных друг к другу. Поэтому при вычислении активного и внутреннего реактивного сопротивлений шин пригодны формулы (5-27) — (5-31).

Все участки шин, имеющие неправильную форму, заменяются при вычислении эквивалентными прямоугольниками. Тогда имеем:

$$r_{wk} = 2\rho_1 \frac{l_k}{d_w b'_k} k_r, \quad (5-32)$$

где d_w — толщина шины; l_k — длина k -го участка; b'_k — средняя ширина k -го участка; k_r — коэффициент увеличения сопротивления.

Полное сопротивление шин:

$$r_w = \sum_{k=1}^n r_{wk}.$$

Для шин, изображенных на рис. 5-10, имеем:

$$r_{\text{ш}1} = 2\rho_1 \frac{l_1}{d_{\text{ш}} b_1} k_r, \quad r_{\text{ш}2} = 2\rho_1 \frac{l_2}{d_{\text{ш}} b_2} k_r,$$

где $b'_2 = (b_1 + b_2)/2$; $r_{\text{ш}} = r_{\text{ш}1} + r_{\text{ш}2}$.

Вследствие кольцевого эффекта и эффекта близости ток концентрируется на внутренней поверхности индуктирующего провода, поэтому длина первого участка шин считается также от нее. Это показано на рис. 5-10.

При выборе толщины шин следует иметь в виду, что последние имеют минимальное сопротивление при $d_{\text{ш}} = 1,57 \Delta_1$. Однако от указанного соотношения весьма часто отступают из соображений конструктивного удобства, в особенности при частотах выше 2500 Гц ($\Delta_1 < 1,5 \text{ мм}$). Что касается длины шин, то она определяется на основании конструктивных соображений.

Реактивное сопротивление расположенных близко друг к другу относительно коротких шин может быть вычислено по формуле:

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{ш}k} &= 2\rho_1 \frac{l_k}{d_{\text{ш}} b_k} k_x + 7,9 \cdot 10^{-6} f \frac{h_{\text{ш}} l_k}{b'_k} \text{ Ом,} \\ x_{\text{ш}} &= \sum_{k=1}^n x_{\text{ш}k}, \end{aligned} \right\} \quad (5-33)$$

где $h_{\text{ш}}$ — зазор между шинами.

5-6. Расчет индуктора

Порядок расчета здесь и дальше приводится совместно с численным примером. Численный расчет дан для конца нагрева.

Для расчета заданы: глубина закаленного слоя $x_k = 0,45 \text{ см}$; диаметр изделия $D_2 = 5,7 \text{ см}$; ширина закаленной полосы $a_3 \approx 2,7 \text{ см}$ при одновременном нагреве или время нагрева элемента поверхности t_k , при непрерывно-последовательном нагреве; частота $f = 2000 \text{ Гц}$; удельная мощность $p_0 = 0,814 \text{ кВт/см}^2$, передаваемая в нагреваемое изделие; размеры шин: $b_1 = 3,3 \text{ см}$, $b_2 = 18,5 \text{ см}$, $l_1 = 10 \text{ см}$, $l_2 = 5 \text{ см}$, $h_{\text{ш}} = 0,2 \text{ см}$, $d_{\text{ш}} = 0,2 \text{ см}$.

В формулы все размеры подставляются в метрах, удельная мощность в кВт/м^2 .

Требуется определить диаметр индуктора D_1 ; ширину индуктора a , толщину индуктирующего провода d_1 ; напряжение на индукторе U_i ; ток в индукторе I_i ; коэффициент мощности индуктора $\cos \Phi_i$; коэффициент полезного действия индуктора η_i ; мощность, подводимую к индуктору, P_i .

Обычно рассчитывают условный одновитковый индуктор и, если задано напряжение на индукторе U_i , определяют в конце расчета число витков w . Чаще предпочитают применять одновитковые индукторы и для получения нужного напряжения подбирают подходящий понижающий трансформатор.

В приведенном примере рассчитываем одновитковый индуктор ($w = 1$) для одновременного нагрева.

1. Внутренний диаметр индуктора

$$D_1 = D_2 + 2h = 0,057 + 2 \cdot 0,002 = 0,061 \text{ м,}$$

где h — воздушный зазор между индуктором и нагреваемой деталью. Зазор обычно выбирается в пределах 2—5 мм, если $D_2 < 50 \text{ мм}$, и 5—10 мм, если $D_2 > 100 \text{ мм}$.

2. Толщина токонесущей стенки индуктирующего провода. При одновременном нагреве, в случае когда провод не имеет постоянного охлаждения (см., например, рис. 5-10), его токонесущая стенка выполняется массивной, (чтобы обеспечить теплоотвод от токонесущего слоя в массу металла. Тогда

$$d_1 = (2,5 \div 4,0) x_k = 2,7 \cdot 0,0045 \approx 0,012 \text{ м.} \quad (5-34)$$

Обычно нижний предел выбирается при $x_k > 5 \text{ мм}$.

При непрерывно-последовательном нагреве, а также при одновременном, в случае когда провод имеет постоянное охлаждение, он выполняется из цельнотянутой трубы.

При $f < 10^4 \text{ Гц}$ толщина трубы по возможности выбирается близкой к оптимальной: $d_1 \approx 1,6 \Delta_1$. При радиочастотах $d_1 > 0,5 \text{ мм}$.

3. Ширина индуктора. При одновременном нагреве $a \approx 1,2$ $a_3 = 1,2 \cdot 0,027 \approx 0,033 \text{ м}$ или $a \approx l$, где l — длина детали. Первая формула применяется при закалке участка поверхности (рассматриваемой в примере случай), вторая — при закалке всей поверхности.

При непрерывно-последовательном нагреве, если задана мощность генератора, то

$$a = \eta_{tr} \eta_i P_g / (p_0 \pi D_2) \approx 0,64 P_g / (p_0 \pi D_2), \text{ м,}$$

где P_g — мощность генератора, вт; η_{tr} — к. п. д. понижающего закалочного трансформатора, в среднем равный 0,85; η_i — к. п. д. индуктора, в среднем равный 0,75.

Если задана производительность, то $a = vt_k$, где v — скорость подачи индуктора или детали.

4. Расчетный диаметр детали: $\Delta_k = 0,5/V\bar{f} = 0,5/V\sqrt{2000} = 0,0112 \text{ м}$; $k_1 x_k = x_k/\Delta_k = 0,402$ при $\mu_2 = 16$, ($m = -0,6$). Из табл. 4-5 находим, что $M = 0,534$, тогда $\xi = M\Delta_k = 0,006 \text{ м}$. Для холодного и промежуточного режимов принимаем $D'_2 = D_2$.

$$D'_2 = D_2 - \xi = 0,057 - 0,006 = 0,51 \text{ м.}$$

5. Приведенное значение удельной мощности

$$p'_0 = p_0 D_2 / D'_2 = 8,14 \cdot 10^6 \cdot 0,057 / 0,051 = 9,11 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2. \quad (5-35)$$

Удельную мощность p_0 рассчитываем для внешней поверхности детали. Так как мы используем в расчете формулы для плоской волны, разворачивая нагреваемый слой по расчетному диаметру, то и удельную мощность следует пересчитать на расчетную поверхность слоя.

6. Относительная магнитная проницаемость. Для холодного и промежуточного режимов рассчитываем ее по формуле (3-38) и (3-39) с помощью усредненной кривой намагничивания на рис. 3-5. Для холодного режима принимаем удельное сопротивление $\rho_2 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$, для промежуточного $\rho_2 = \rho_e = 6 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Для горячего режима определяем магнитную проницаемость μ_2 . Задаваясь несколькими значениями m , находим, по табл. 4-1, 4-2 и 4-3 соответствующие значения K , N , $\cos \varphi_2$ и определяем H_{me} , H_{mk} :

$$H_{me} = \sqrt{\frac{p'_0 \cdot 10^6}{1,405 K V\bar{f} \cos \varphi_2}}, \text{ а/м; } H_{mk} = H_{me}/N.$$

По усредненной кривой намагничивания на рис. 3-5 находим μ'_2 , как показано в примере § 4-4, и составляем таблицу полученных величин (табл. 5-1).

Построив графики $\mu_2 = f(m)$ и $\mu'_2 = f(m)$, подобные приведенным на рис. 4-7, получаем $\mu_2 = 15,4$; $m = -0,594$; $K = 1,433$; $\cos \varphi_2 = 0,923$; $\sin \varphi_2 = 0,386$.

Таблица 5-1

Данные для определения магнитной проницаемости и фазового угла

m	μ_2	K	N	$\cos \varphi_2$	H_{me}	H_{mk}	μ'_2
-0,4	5,45	1,279	2,142	0,865	$3,66 \cdot 10^5$	$1,71 \cdot 10^5$	10,45
-0,5	9,00	1,358	2,574	0,897	$3,51 \cdot 10^5$	$1,365 \cdot 10^5$	12,80
-0,7	32,00	1,521	4,057	0,949	$3,2 \cdot 10^5$	$0,789 \cdot 10^5$	21,00

7. Активное и внутреннее реактивное сопротивление нагреваемого слоя.

$$\text{В холодном и промежуточном режимах } r_2 = \frac{\pi D_2}{a} \cdot 1,37 \frac{\rho_2}{\Delta_2}, \quad x_{2M} \approx \frac{r_2}{1,37}, \quad \Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_e f}}, \quad m.$$

$$\text{В горячем режиме } r_2 = \pi D_2' / a \cdot 2,81 \cdot 10^{-6} K \sqrt{f} \cos \varphi_2 = 8,08 \cdot 10^{-4} \text{ ом},$$

$$x_{2M} = r_2 \sin \varphi_2 / \cos \varphi_2 = 3,37 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

8. Реактивное сопротивление

$$x_0 = x_{10} a_1 k_1 / (a_1 - k_1 a_2) \text{ при } a_1 > a_2,$$

$$x_{10} = \omega \mu_0 S_1 / a_1.$$

Коэффициент k_1 находится из графиков на рис. 5-6 или 5-7.
 $x_{10} = 2\pi \cdot 2000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \pi (0,061^2 / (4 \cdot 0,033)) = 13,96 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; k_1 = f(D_1/a_1) =$
 $= f(0,061/0,033) = 0,544$ (по рис. 5-6); при $a_1 = a_2$ $x_0 = x_{10} k_1 / (1 - k_1) =$
 $= 13,96 \cdot 10^{-4} \cdot 0,544 / 0,456 = 16,7 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$

9. Реактивность рассеяния:

$$x_s = \omega \mu_0 (S_1 - S_2) / a_2;$$

$$x_s = 2\pi \cdot 2000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \pi (0,061^2 - 0,057^2) / (4 \cdot 0,033) = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

10. Коэффициент приведения активного сопротивления детали

$$C = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2M}}{x_0}\right)^2} = 0,52.$$

11. Приведенное активное сопротивление

$$r'_2 = cr_2 = 0,52 \cdot 8,08 \cdot 10^{-4} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

12. Приведенное реактивное сопротивление вторичной цепи

$$x'_2 = c \{ x_s + x_{2M} + [(x_s + x_{2M})^2 + r_2^2] / x_0 \} = 5,42 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

13. Активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктирующего провода: $r_{1P} = \rho_1 \pi D_1 / (ad_1 g) \approx 0,109 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$ (учитывая наличие в индуктирующем проводе отверстий для выпуска закалочной воды, уменьшающих его активную поверхность, принимаем $g = 0,9$).

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{f}} \approx \frac{0,0712}{Vf} = 0,0016 \text{ м};$$

$$d_1 / \Delta_1 = 7,5; \quad k_r \approx k_x \approx 7,5; \quad r_1 = r_{1P} k_r = 0,82 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$r_1 = r_{1P} k_r = 0,82 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; x_{1M} = r_{1P} k_x = 0,82 \cdot 10^{-4} \text{ ом}, k_r$ и k_x находятся из графиков на рис. 5-8.

14. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_3 = r_1 + r'_2 = 5,02 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; \quad x_3 = x_{1M} + x'_2 = 6,24 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; \\ z_3 = \sqrt{x_3^2 + r_3^2} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

15. Мощность, передаваемая в нагреваемую деталь,

$$P_T = \pi D_2 a p_0 = 4,8 \cdot 10^4 \text{ вт.}$$

16. Ток в одновитковом индукторе

$$I'_u = \sqrt{P_T / r_2} = I_u = \sqrt{4,8 \cdot 10^4 / (4,2 \cdot 10^{-4})} = 10700 \text{ а.}$$

17. Напряжение на индуктирующем проводе одновиткового индуктора

$$U'_u = I'_u z_3 = U_3 = 10700 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 8,56 \text{ в.}$$

18. Число витков индуктора $w = U_u / U'_u$. В примере $w = 1$.

19. Параметры индуктора, пересчитанные для w витков:

$$r_3 = w^2 (r_1 + r'_2); \quad x_3 = w^2 (x_{1M} + x'_2); \quad r''_2 = w^2 r'_2; \quad I_u = I'_u / w.$$

20. Активное сопротивление шин

$$r_{wk} = 2\rho_1 l_k k_r / (d_{wk} b'_k); \quad r_{\text{ш}} = \sum_{k=1}^n r_{wk},$$

где b'_k — средняя ширина участка.

$$d_1 / \Delta_1 = 0,002 / 0,0016 = 1,25; \quad k_r = 1,2;$$

$$b'_2 = (0,033 + 0,185) / 2 = 0,109 \text{ м.}$$

$$r_{\text{ш1}} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot 1,2 / (0,002 \cdot 0,033) = 0,73 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$r_{\text{ш2}} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot 1,2 / (0,002 \cdot 0,109) = 0,11 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$r_{\text{ш}} = 0,84 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

21. Реактивное сопротивление шин:

$$x_{wk} = 2\rho_1 l_k k_x / (d_{wk} b'_k) + 7,9 \cdot 10^{-6} f h_{wk} l_k / b'_k;$$

$$x_{\text{ш}} = \sum_{k=1}^n x_{wk}.$$

$$x_{\text{ш1}} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 / (0,002 \cdot 0,033) + 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 0,002 \cdot 0,1 / 0,033 =$$

$$= 1,564 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$k_x \approx 1,0; \quad x_{\text{ш2}} = 0,145 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$x_{\text{ш}} \approx 1,71 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

22. Активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_u = r_3 + r_{\text{ш}} = 5,86 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; \quad x_u = x_3 + x_{\text{ш}} = 7,95 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$z_u = \sqrt{x_u^2 + r_u^2} = 9,88 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

23. К. п. д. индуктора

$$\eta_i = r_2''/r_i = 4,2/5,86 = 0,718.$$

24. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_i = r_i/z_i = 5,86/9,88 = 0,592.$$

25. Мощность, подводимая к индуктору;

$$P_i = P_T \cdot 10^{-3}/\eta_i = 4,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3}/0,718 = 66,8 \text{ квт.}$$

26. Напряжение на индукторе

$$U_i = I_i z_i = 10700 \cdot 9,88 \cdot 10^{-4} = 10,57 \text{ в.}$$

27. Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$P_r = P_i \operatorname{tg} \varphi_i = 66,8 \cdot 1,364 = 91 \text{ квар.}$$

Из эксперимента получено: $U_i = 11,5 \text{ в.}$; $I_i = 10800 \text{ а.}$; $\eta_i = 0,74$;
 $\cos \varphi_i = 0,518$; $P_i = 65 \text{ квт.}$

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о хорошем их совпадении, что особенно показательно в данном примере, так как зазор выбран очень малым и все принятые при анализе процессов в нагреваемом изделии допущения должны здесь сказываться в наиболее сильной степени.

Расчет построен применительно к цилиндрическому индуктору для нагрева цилиндрической детали. Если индуктор и деталь имеют другую форму, то в соответствующих формулах, вместо πD_1 и $\pi D_2'$ подставляются эквивалентные периметры. Например, при расчете индуктора с прямоугольным полперечным сечением для нагрева пластины имеем:

$$F_{19} = 2(b_1 + D_1), \quad F_{29} = 2(b_2 + D_2) - 4\xi,$$

где b_2 и D_2 — длинная и короткая стороны прямоугольника, соответственно.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА

6-1. Конструирование основных элементов индукторов

Индуктор является основным элементом всякой установки для индукционного нагрева. В большинстве случаев достоинства и недостатки технологических устройств, в которых используется индукционный нагрев, могут быть поставлены в прямую связь с особенностями конструкции индуктора, который выбран для осуществления заданной технологической операции (закалки, сварки и др.). Поэтому каждый специалист, работающий в области промышленного использования индукционного нагрева, должен достаточно хорошо разбираться в основных принципах расчета и конструирования индукторов. Эти принципы не являются универсальным средством, позволяющим во всех случаях практики разработать оптимальный индуктор. Только практическая работа по конструированию индукторов и наладке нагревательных установок поможет

накопить опыт, необходимый для успешного использования общих правил.

Методика выбора размера и формы индуктирующего провода, а также методика расчета основных параметров индуктора рассмотрены в гл. 1-5.

Индукционный нагрев протекает, как правило, очень быстро. Например, в случае поверхностной закалки время нагрева обычно не превышает 10 сек. Даже небольшие неточности, неизбежные при проведении инженерных расчетов, могут при практическом осуществлении режимов, полученных расчетным путем, привести к значительному отклонению полученных результатов от заданных технических требований. Окончательная форма индуктирующего провода, режим нагрева и охлаждения обычно выбираются после изготовления и испытания опытного образца индуктора.

Всесторонние испытания опытного образца совершенно необходимы также потому, что вместе с индуктором для уточнения их эксплуатационных характеристик и определения надежности должны быть испытаны все основные и вспомогательные элементы технологической установки.

Как правило, на производстве индукторы изготавляются небольшими партиями, ибо обычно делаются два-три запасных индуктора даже в том случае, когда для обеспечения программы используется установка с одним индуктором. Это обстоятельство требует также тщательной опытной отработки конструкции и тщательной подготовки документации до передачи ее для изготовления индукторов.

Однако опытный индуктор, при разработке которого учитывались только технические требования к процессу нагрева, а также энергетические соображения — получение требуемого температурного поля при минимальном расходе энергии — часто не будет удовлетворять многим требованиям, которые могут быть к нему предъявлены при производственной эксплуатации на промышленном предприятии. Иногда для удовлетворения упомянутых требований опытный индуктор подвергается значительной переработке, так что приходится повторять всю экспериментальную работу, металлографические и технологические исследования и т. д., что приводит к излишним расходам и удлиняет время освоения разрабатываемого оборудования.

Ниже приводятся основные соображения производственно-эксплуатационного характера, которые необходимо учитывать при конструировании индукторов.

Приступая к разработке какого-либо конкретного индуктора, необходимо ознакомиться с образцами индукторов аналогичного технологического назначения, а также с особенностями конструирования закалочных устройств.

Даже при проектировании устройств для вновь строящегося предприятия нельзя выбирать для каждой детали оптимальную частоту. Большое число разнотипных установок сильно усложнит

и удорожит эксплуатацию. Для обеспечения бесперебойной работы производства придется иметь в резерве генераторы нескольких типов, несколько типов конденсаторов, измерительных приборов и т. д. При этом необходимо иметь в виду, что, например, снижение к. п. д. на 5 % вследствие выбора неоптимальной частоты даст для генератора на 100 квт увеличение расхода электроэнергии при 14-часовом рабочем дне на 70 квт·ч в день. При средней стоимости энергии 2 коп. это составит за год дополнительный расход 450 руб. В то же время стоимость одного резервного генератора на 100 квт составляет 6000 руб. Частота должна соответствовать деталям наиболее массовым для данного предприятия. Во всех остальных случаях следует использовать ту же частоту, хотя она и будет отличаться для этих деталей от оптимальной. Только в тех случаях, когда отступление от оптимальной частоты дает существенное снижение к. п. д., которое не может быть компенсировано сокращением эксплуатационных расходов, следует вводить вторую частоту.

Мощность источника тока высокой частоты (ТВЧ), устанавливаемого для термообработки одной определенной детали, должна также выбираться с учетом всего комплекса технико-экономических показателей и прежде всего с учетом весьма важной для упрощения эксплуатации унификации. Во многих случаях требования чертежа к глубине закаленного слоя могут быть по согласованию с конструкторами машины изменены. Это позволяет в весьма широких пределах изменять частоту, а также мощность источника ТВЧ. Таким образом, удается для закалки большой группы деталей использовать одинаковые генераторы ТВЧ.

Индукционный нагрев наиболее эффективно используется в условиях поточно-массового производства. Современное поточно-массовое производство, как правило, высокоавтоматизированное. Ручные операции сведены к минимуму. Поэтому при разработке конструкции индуктора необходимо анализировать также возможные схемы автоматизации установки детали в индуктор и передачи ее на последующие операции.

Если требуемая производительность может быть обеспечена при нагреве деталей по одной в круглом цилиндрическом индукторе, то автоматизация или механизация вспомогательных операций всегда может быть осуществлена, однако устройства для этой цели получаются обычно достаточно сложными.

В установках большой производительности, когда одновременно должны нагреваться несколько деталей, устройства для автоматизации подачи деталей из общего потока в несколько индукторов и сбора их снова в общий поток получаются весьма дорогостоящими и ненадежными. В этом случае встает вопрос об использовании щелевого индуктора, в котором одновременно может нагреваться несколько деталей во время перемещения их сравнительно простым транспортным устройством. В условиях серийного производства, даже при нагреве деталей по одной производительность установки для индукционного нагрева оказывается часто выше производи-

тельности смежных установок. Все же иногда и в этом случае целесообразно, если позволяет мощность установок, осуществлять нагрев деталей по нескольку штук в щелевом или овальном индукторе с еще более высокой производительностью. Тогда партия деталей быстро пропускается через установку индукционного нагрева, которую могут обслуживать рабочие, занятые на смежных операциях.

При поверхностной закалке и нагреве кузнецких заготовок используются два способа установки и закрепления нагреваемых деталей:

а) тяжелые детали массой более 10 кг, а также детали, которые необходимо в процессе нагрева вращать, устанавливают на отдельных от индуктора приспособлениях;

б) легкие детали базируют непосредственно на элементах, специально пристраиваемых к индуктору (см. рис. 10-14), так как в этом случае обеспечивается, как правило, большая точность взаимного расположения детали и индуктирующего провода.

Для повышения электрического К. П. Д., а также созза зазор между индуктирующим проводом и нагреваемой поверхностью должен быть минимальным. Однако чем меньше этот зазор, тем с большей точностью необходимо изготавливать детали индуктора, механизмы, служащие для установки детали в индуктор, а также более точно выдерживать допуск на припуск, который обычно оставляется для последующей механической обработки. При этом точность размеров всех перечисленных элементов должна непрерывно поддерживаться в условиях эксплуатации.

Таким образом, уменьшая зазор, мы всегда повышаем К. П. Д., но можем сильно усложнить и удорожить изготовление и эксплуатацию устройства. При малых зазорах повышается процент брака вследствие случайных прикосновений детали к индуктору и возникающего при этом пробоя между индуктором и деталью.

Величина зазора, которую можно допустить без существенного уменьшения К. П. Д., пропорциональна ширине индуктирующего провода, как это пояснено в гл. 1.

Практически для деталей среднего машиностроения (автомобили, тракторы, металорежущие станки) зазоры меньше 2—3 мм следует выбирать только в отдельных обоснованных случаях. При этом необходимо учитывать, что на нагреваемых поверхностях могут быть припуски на последующую механическую обработку. При выборе зазора необходимо учитывать также точность изготовления нагреваемой поверхности и поверхностей, на которых базируется деталь, а также допуски на взаимное расположение их. Зазор должен быть в 4—5 раз больше суммарной ошибки, которая может появиться из-за случайного совпадения отклонений размеров и расположения нагреваемой и базовых поверхностей.

При индукционном нагреве токами средней и высокой частоты в связи с малой глубиной проникновения тока, а также в связи со значительными мощностями, передаваемыми в нагреваемые объекты

удельные токовые нагрузки токоведущих элементов индуктора значительно выше, чем в токоведущих элементах электрических машин и аппаратов, работающих на промышленной частоте. Для уменьшения потерь в токоведущих элементах следует выбирать такую конструкцию индуктирующего провода (из всех возможных), чтобы работать при максимально высоком напряжении (и, следовательно, малом токе).

Все токоведущие элементы должны изготавляться из меди М1 — материала высокой электропроводности. Делались попытки в целях экономии меди изготавливать индукторы для поверхностной закалки из алюминия. Однако даже при интенсивном водяном охлаждении не удавалось снять выделяющееся тепло, и индукторы перегорали. Индукторы для нагрева кузнецких заготовок имеют меньшие удельные нагрузки, поэтому имеются конструкции (пока только опытные), в которых индуктирующий провод изготавливается из алюминия или его сплавов.

Как пояснено в гл. 1, ток в индукторе протекает только в поверхностном слое токоведущих частей, толщина которого равна глубине проникновения тока данной частоты в медь. Поэтому в принципе только эти элементы можно изготавливать из чистой электролитической меди. Остальные элементы могут быть изготовлены из любого немагнитного металла или диэлектрика. Можно было бы получить большую экономию меди, если полости для охлаждающей и закалочной жидкостей, а также элементы, обеспечивающие прочность конструкции, изготавливать из алюминиевых сплавов, текстолита и т. п.

Однако пока не разработаны дешевые способы прочного и плотного соединения меди с алюминием или текстолитом. Поэтому индукторы такого типа, изготовленные из различных материалов, используются редко (рис. 8-6). Как правило, индукторы используются для нагрева большого количества однотипных деталей. Поэтому они должны обладать достаточной прочностью и жесткостью, а также теплоемкостью, чтобы при случайных у daraх, перегрузках по току, затягивании нагрева или при случайных колебаниях расхода охлаждающей жидкости — неизбежных в производственных условиях нарушениях нормального режима работы — индуктор не выходил из строя.

Особое внимание должно быть обращено на конструирование разъемных болтовых соединений токоведущих частей индуктора. Поверхности разъема должны быть тщательно обработаны. Для обеспечения хорошего контакта под головку болта и гайку должны быть положены шайбы увеличенной толщины и диаметра или специальные прокладки из немагнитной стали, текстолита или другого изоляционного материала достаточной толщины, чтобы давление распределилось по всей поверхности контакта. Медные элементы индуктора, как правило, не обладают достаточной жесткостью и без упомянутых шайб или прокладок не обеспечивает постоянство и равномерность давления в контакте. Болты и шпильки разъемных

соединений изготавливаются из немагнитной стали или латуни. Для надежного контакта стальные болты и шпильки должны иметь диаметр не менее 12 мм, а латунные не менее 16 мм. Меньшие диаметры могут быть рекомендованы только для установок мощностью до 50 квт.

Индуктор является самым ответственным элементом индукционной нагревательной установки. Даже незначительное повреждение его может нарушить нормальный режим работы устройства, привести к массовому выпуску бракованной продукции. Вместе с тем, из всех токоведущих элементов индуктор обычно несет наибольшие удельные нагрузки, а также наибольшие механические нагрузки, так как он часто подвергается ударам со стороны нагреваемых деталей. Поэтому, несмотря на все меры, принимаемые для повышения его прочности и надежности, при конструировании индуктора необходимо заботиться об удобстве и простоте его смены.

Питание индукторов током высокой частоты осуществляется обычно одним из двух способов.

А. Многовитковые индукторы, как, например, индукторы для нагрева кузнецких заготовок или индукторы проходных секционированных печей (см. гл. 17), рассчитываются обычно на напряжение питающего генератора 400, 800 или 1600 в для частот от 1000 до 10 000 гц и присоединяются к шинам, идущим непосредственно от генератора, или соединяются с последним с помощью концентрического кабеля типа КВСП.

Б. Одновитковые индукторы, которые используются в устройствах для поверхностной закалки и сварки труб, обычно требуют более низкого напряжения. Они присоединяются к источнику т. в. ч. посредством понижающего трансформатора.

Первичная обмотка понижающего трансформатора присоединяется к источнику т. в. ч. Индуктор присоединяется к вторичной обмотке. Коэффициент трансформации подбирается таким образом, чтобы получить на индукторе необходимое напряжение. Промышленностью для частот 1000 — 10 000 гц выпускался трансформатор типа ВТО-500 мощностью 500 ква, первичная обмотка которого может иметь от 15 до 30 витков, вторичная — от 1 до 3 витков. Этот трансформатор нерегулируемый, коэффициент трансформации его устанавливается при изготовлении.

Кроме того, выпускаются регулируемые трансформаторы ТВД-3 и Т32-800 с переключением витков первичной и вторичной обмоток. Коэффициент трансформации этих трансформаторов может изменяться ступенями в широких пределах при настройке режима нагрева.

При прямом присоединении многовиткового индуктора к источнику тока каждый вывод индуктора следует присоединять по возможности одним болтом диаметром 16—20 мм или же при помощи поворотной планки, прижимаемой одним таким же болтом. При этом для отсоединения индуктора необходимо только слегка отпустить 2 болта и повернуть или отодвинуть прижимные планки.

Способ присоединения одновиткового индуктора в значительной степени определяется конструкцией выводов обмотки понижающего трансформатора. Однако, используя промежуточные колодки специальной формы (см. рис. 8-1), можно упростить и ускорить смену индуктора. Понижающие трансформаторы для установок с ламповыми генераторами отдельно не изготавливаются. Они входят в комплект поставки генераторов.

Коэффициент трансформации выбирается в зависимости от назначения генератора (поверхностная закалка, сварка) с учетом средних параметров индукторов, которые должны к трансформатору подключаться.

Если снимать и ставить индуктор рабочему удобно, упрощается зачистка контактных поверхностей между индуктором и понижающим трансформатором. Окисление этих поверхностей, неизбежное вследствие деформации меди и появления некоторого зазора, приводит к нарушению режима нагрева.

Для сохранения постоянства режима необходимо в плановом порядке производить профилактическую зачистку контактов. Удобство смены индуктора и легкая доступность болтовых соединений между индуктором и трансформатором приобретают особое значение в серийном производстве, если детали нескольких типов нагреваются партиями на одной установке. После обработки партии однотипных деталей производится смена индуктора для перехода к нагреву партии деталей другого типа. При этом существенно уменьшается число нагревательных установок, так как они по своей производительности обычно значительно превосходят смежные по технологическому циклу устройства.

Иногда для упрощения перехода от нагрева одной детали к нагреву другой устанавливают рядом несколько индукторов. Одним выводом они сразу подсоединяются к источнику тока (или понижающему трансформатору). Второй вывод того индуктора, на котором предполагается работать в данный момент, присоединяется к источнику тока переставной планкой.

Одновитковые индукторы (получающие питание через понижающий трансформатор) для нагрева деталей диаметром до 100 мм под поверхностную закалку, пайку и другие операции закрепляются обычно на вторичной обмотке этого трансформатора. Индукторы для нагрева деталей диаметром более 100 мм рекомендуется дополнительно снабжать одной или несколькими изолированными опорами, так как медный индуктирующий провод обычно не имеет достаточной жесткости (см. рис. 8-1). При присоединении к понижающему трансформатору индуктор должен свободно ложиться на эти опоры для обеспечения удобства его замены. Затем с помощью поворотных планок индуктор прижимается к опорам. Для выравнивания по высоте опоры могут иметь винтовые устройства для регулировки. Для этой цели могут также служить изоляционные прокладки.

Индукторы современных нагревательных установок часто весьма

дорогостоящие устройства. Кроме индуктирующего провода, имеющего довольно сложную форму, индуктор состоит из ряда вспомогательных элементов; устройств для подачи и распределения охлаждающей жидкости, магнитопроводов, электрической и тепловой изоляции, токоподводящих шин и др.

Несмотря на то, что индукторы в большинстве случаев изготавливаются небольшими партиями, особое внимание должно быть обращено на технологичность их элементов и на снижение трудоемкости изготовления. Специализированное производство индукторов у нас пока не организовано. Каждое предприятие изготавливает индукторы своими силами. Сложные, нетехнологические индукторы изготавливаются с большими отступлениями от чертежей и поэтому часто не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

Для облегчения изготовления элементы индуктора должны иметь по возможности простую форму. Для уменьшения отходов цветных металлов механическая обработка должна быть сведена к минимуму.

Самыми слабыми являются паяные места (в особенности на трубках). Паяные швы по возможности не должны нести механическую нагрузку. В процессе последующей обработки сварные и паяные швы не должны нарушаться. Детали и сварные группы, подлежащие обработке, должны быть достаточно жесткими, чтобы они не деформировались при резании и их было удобно закреплять на металорежущих станках.

При проектировании лабораторных индукторов, используемых при предварительных экспериментах (которые проводятся для определения режимов нагрева и наиболее выгодной формы индуктирующего провода), можно исходить из теоретических и конструктивных соображений, изложенных в гл. 1-5.

Индуктор, предназначенный для окончательных испытаний и отработки режима, должен быть изготовлен в том виде, в каком он будет использоваться на производстве, т. е. с учетом всех требований, изложенных в этом параграфе.

6-2. Охлаждение индуктора

Индуктирующий провод и другие токонесущие элементы индуктора нагреваются при прохождении по ним тока. Кроме того, нагреваемая деталь излучает тепло, некоторая часть которого поглощается индуктирующим проводом. Только в редких случаях выделяющееся тепло может быть рассеяно в окружающую атмосферу. В подавляющем большинстве случаев для предохранения от перегрева элементы индуктора приходится охлаждать.

Охлаждение осуществляется одним из следующих способов.

А. В индукторах для термообработки, в которых охлаждение обрабатываемой детали производится сразу после нагрева, закалочная жидкость пропускается сквозь трубы, припаянные к токоведущим шинам и присоединительным колодкам, и далее через от-

верстия в индуктирующем проводе поступает на закаливаемую поверхность. Таким образом, закалочная жидкость охлаждает не только обрабатываемую деталь, но и элементы индуктора.

Подачей закалочной жидкости управляет обычно электрогидравлический клапан, который включается и выключается по командам схемы автоматического управления.

Во время нагрева индуктор не охлаждается. Токоведущие элементы его должны быть достаточно массивными, чтобы температура их не поднималась выше 100—150° С. При многократном повторном нагревании до более высоких температур медь становится крупнозернистой и разрушается.

При конструировании индуктора необходимо заботиться, чтобы трубы и полости для подачи закалочной жидкости перекрывали все детали индуктора, в которых выделяется тепло, таким образом, чтобы за время охлаждения температура всех элементов понизилась до исходной.

Особое внимание должно быть обращено на охлаждение разъемных контактов и болтов или шпилек, соединяющих эти контакты. Если болты или шпильки имеют недостаточно большую поверхность контакта с охлаждаемыми водой элементами индуктора, отвод тепла, выделяющегося вследствие нагревания их вихревыми токами, оказывается недостаточным. Температура болтов растет, и вследствие расширения их контакт нарушается. Для повышения надежности разъемного контакта болты (или шпильки) изолируются от одного из соединяемых элементов индуктора и ввертываются в резьбу во втором водоохлаждаемом его элементе.

Резьбовое соединение обеспечивает интенсивный отвод тепла от болта (или шпильки). Если болты не изолированы, то при нарушении контакта ток идет по болтам, что приводит к их расплавлению.

Каналы в индуктирующем проводе для подачи охлаждающей жидкости не должны иметь полостей, в которых жидкость может задерживаться после закрытия электрогидравлического клапана. При нагревании следующей детали жидкость частично испаряется, а остатки ее выбрасываются парами на нагреваемую поверхность. На последней появляются области пониженной твердости. Иногда в индукторах предусматриваются небольшие отверстия специально для стекания остатков жидкости. Отверстия в индуктирующем проводе для выхода охлаждающей жидкости располагаются обычно рядами в шахматном порядке, шаг в ряду 8—10 мм, расстояние между рядами 4—5 мм. Диаметр отверстий 1,5—2,0 мм. Если толщина индуктирующего провода больше 5 мм, то при сверлении отверстий диаметром 2 мм сверла часто ломаются. Чтобы облегчить изготовление отверстий, последние делаются ступенчатыми. Так, при толщине индуктирующего провода 10 мм сверлом диаметром 4—5 мм сверлятся отверстия длиной 8 мм, далее в сторону закаливаемой детали они сверлятся сверлом диаметром 1,5—2,0 мм (см. рис. 8-3). Площадь поперечного сечения шлангов трубок и полостей, по которым

жидкость поступает к выходным отверстиям, должна быть в 2—3 раза больше суммарной площади этих отверстий.

Если поперечное сечение этих элементов достаточно велико, часто можно для охлаждения использовать воду от цехового водопровода, давление в котором обычно не превышает $2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. Чем меньше сечение водяных каналов, тем больше должно быть давление охлаждающей жидкости, чтобы создать требуемую технологическим процессом скорость охлаждения. Из-за неправильного выбора сечения этих каналов приходится монтировать специальные насосные станции на давление $6 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$, стоимость эксплуатации которых составляет значительную долю в расходах на термообработку.

Б. Если термообрабатываемая деталь после нагрева перемещается из индуктора в отдельное душевое устройство или если продолжительность нагрева велика и теплоемкость элементов индуктора оказывается недостаточной, то в индукторе предусматриваются специальные трубы и полости, по которым постоянно проходит вода. Такой способ охлаждения позволяет уменьшить сечение токоведущих элементов и таким образом уменьшить расход меди.

Как пояснено в гл. 1, для уменьшения потерь в токоведущих элементах толщина их не должна быть меньше глубины проникновения тока. Дальнейшее увеличение их толщины необходимо либо по соображениям механической прочности, либо в тех случаях, когда не предусмотрено постоянного охлаждения. Таким образом, следует рекомендовать постоянное охлаждение токоведущих элементов, если при этом не получается значительного усложнения конструкции.

Во время работы, а также при испытании на водонепроницаемость в трубках и полостях для воды и охлаждающей жидкости возникает значительное давление. Поэтому стенки трубок и полостей должны быть достаточно жесткими, чтобы давление их не выпучивало. Могут быть предусмотрены также специальные конструктивные элементы, воспринимающие давление.

Охлаждающая вода и закалочная жидкость подводятся к индуктору обычно с помощью резиновых, дюритовых или полиэтиленовых шлангов. Изоляционные материалы необходимы потому, что часто трубы охлаждения должны подводиться к нескольким точкам индуктора, находящимся при прохождении тока под различными потенциалами. При высоких напряжениях, при которых, например, работают индукторы в кузнецких индукционных нагревателях, длина шланга, соединяющего элементы, находящиеся под различными потенциалами, не должна быть меньше 0,1 см на 1 в разности потенциалов, чтобы утечка тока по воде была незначительной. Гибкие шланги не требуют высокой точности расположения мест подсоединения, легко снимаются при смене индуктора.

Для присоединения гибких шлангов служат штуцеры, которые припаиваются к индуктору или ввертываются в специально предусмотренные резьбовые отверстия. Если по условиям эксплуатации

ции индукторы необходимо часто сменять, устанавливаются быстро разъемные штуцеры [42].

Часто индукторы имеют несколько ветвей охлаждения. В этом случае для быстрого присоединения и отключения системы охлаждения используют специальные быстроразъемные колодки (одну из возможных конструкций таких колодок см. на рис. 17-7). Шланги присоединяются к штуцерам обеих частей колодки, соединяющихся между собой двумя болтами. Соединение уплотняется резиновой прокладкой.

Иногда электрические соединения используются также и для подачи охлаждающей жидкости. Такие соединения обычно используются, если смена индуктора осуществляется редко, так как при частой разборке плотность соединений нарушается [42].

При непрерывно-последовательном способе закалки применяются два способа подачи охлаждающей жидкости; непосредственно сквозь отверстия в индукирующем проводе (см. рис. 8-5) через специальное душевое устройство, устанавливаемое рядом с индукирующим проводом. В первом случае охлаждающая жидкость должна подаваться в одну или несколько точек индукирующего провода, проходить по его полости и частично выходить из отверстия на охлаждаемую поверхность. Некоторая часть жидкости должна отводиться из индукирующего провода по специальным патрубкам, так как если она вся будет постепенно выходить через отверстия на охлаждаемую поверхность, то в некоторых точках индукирующего провода скорость охлаждающей жидкости будет близка к нулю и эти точки могут перегреться и расплавиться. Если охлаждающая жидкость подается из отдельного душевого устройства, например из кольцевой трубы (при закалке круглых деталей), то эта трубка должна быть незамкнутой. В замкнутой трубке, концентричной индукирующему проводу, индуцируется ток, находящийся в противофазе с током в индукторе. Этот ток ослабляет поле тока в индукторе и приводит к значительным потерям, уменьшая, таким образом, к. п. д.

Отдельное душевое устройство можно устанавливать на различных расстояниях от индукирующего провода. Тем самым можно подбирать необходимый для структурных превращений в материале и для получения требуемой глубины закаленного слоя интервал между окончанием нагрева и началом охлаждения элемента поверхности. Струи охлаждающей жидкости после удара об охлаждаемую поверхность частично отбрасываются (или стекают под действием силы тяжести) в зону нагрева. Это приводит к появлению на закаливаемой поверхности мягких пятен. Чтобы исключить это явление, угол α между осью закаливаемой детали и осью отверстия, через которое подается охлаждающая жидкость, не должен быть больше 45° (см. рис. 8-4). При увеличении этого угла струи воды ударяют в нагреваемую поверхность ближе к индукирующему проводу и начинают охлаждать ее, когда она еще нагревается индуцированным током. При этом снижается термический к. п. д. нагрева. При

уменьшении этого угла расстояние от точки удара струи в поверхность до индуктирующего провода растет. Поэтому увеличивается отсос тепла внутрь нагреваемой детали, что также приводит к снижению термического к. п. д. и требует некоторого перегрева поверхности. Иногда рядом с индуктирующим проводом предусматривается трубка для подачи воздуха от заводской воздушной сети (эта трубка также не должна быть замкнутой). Струи воздуха не дают отраженным каплям воды попадать в зону нагрева.

Можно при закалке круглых деталей оси отверстия для подачи охлаждающей жидкости расположить не в плоскости, проходящей через ось закаливаемой детали, а под некоторым углом β к ней так, чтобы струи жидкости после удара о закаливаемую поверхность скользили по касательной к ней. При этом достигается большая равномерность охлаждения в том случае, когда деталь не вращается.

Подбирая углы α и β , можно, не увеличивая расстояние от индуктирующего провода до точки удара струи в нагреваемую поверхность, уменьшить угол между плоскостью, касательной к нагреваемой поверхности в точке удара, и осью струи и таким образом избежать отражения струи в зону нагрева. Возникающие центробежные силы отбрасывают частицы жидкости от закаливаемой детали и не дают ей подтекать в зону нагрева. Основной недостаток рассмотренных выше способов охлаждения закаливаемых деталей с помощью душевых устройств — неравномерность охлаждения. Области, в которые ударяют струи жидкости, охлаждаются гораздо быстрее, чем соседние. В результате возникают закалочные трещины [46]. Для выравнивания условий охлаждения закаливаемые детали приходится вращать. Из-за этого усложняются устройства. В некоторых случаях вращать деталь нельзя. Так, например, при термообработке шлицевых и зубчатых деталей вращение может даже усугубить неравномерность охлаждения из-за отражения струй воды выступами на обрабатываемой детали. Для обеспечения равномерного и интенсивного охлаждения на Московском автомобильном заводе имени И. А. Лихачева разработан новый метод охлаждения быстродвижущимся потоком воды. Охлаждающая жидкость подается в зазор между закаливаемой поверхностью и индуктирующим проводом (см. рис. 10-14) из специальной полости большого объема; скорость жидкости в этом объеме незначительна, поэтому давление во всех точках выхода ее в зазор одинаково, а следовательно, одна искорежена и скорость прохождения жидкости вдоль охлаждаемой поверхности. У выхода площадь поперечного сечения потока жидкости несколько сужается, создает некоторый подпор, чтобы жидкость перемещалась сплошным потоком без разрыва. Рассматриваемые устройства не имеют большого количества отверстий малого диаметра, которые легко засоряются. Для повышения производительности установок закаливаемые изделия после окончания нагрева перемещают в охлаждающее устройство, установленное рядом с индуктором. Пока идет нагрев одной детали, вторая

охлаждается. Методика расчета необходимого количества охлаждающей воды и потерь давления в трубопроводах приведена в гл. 11. Вода, используемая для охлаждения, должна иметь температуру 15—25° С. При использовании более холодной воды детали индуктора, не покрытые изоляцией, отпотеваются, в результате изоляция намокает и может быть пробита.

Общая жесткость воды должна быть не выше 20 мг-экв/л. Количество механических примесей в ней не более 20 мг/л, иначе трубы индукторов будут быстро покрываться солями и засорятся.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ПЛОСКИХ И ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

7-1. Особенности нагрева плоских и внутренних цилиндрических поверхностей

Нагрев плоских и внутренних цилиндрических поверхностей значительно сложнее, чем нагрев любых внешних замкнутых поверхностей. При нагреве внешних поверхностей (см. рис. 1-8) нагреваемый объект помещен внутри индуктора, в зоне сильного магнитного поля, а путь обратного замыкания магнитного потока находится вне индуктора, в зоне с относительно малой напряженностью магнитного поля. Составляющая I_0 тока индуктора, создающая магнитодвижущую силу, необходимую для преодоления магнитным потоком магнитного сопротивления R_{m0} этого участка, относительно мала. Полный ток индуктора сравнительно мало пре- восходит ток, индуцированный в нагреваемом объекте.

Кольцевой эффект и эффект близости, действуя согласно, способствуют концентрации индуцированного тока в узкой зоне, ширина которой не очень сильно зависит от зазора и близка к ширине индуктора. Активное сопротивление r_2 нагреваемого объекта благодаря этому относительно велико.

Наоборот, при нагреве поверхности отверстия (рис. 7-1 и 7-2, а) магнитный поток индуктора замыкается в зоне сильного магнитного поля внутри индуктора, вследствие чего магнитное сопротивление обратного замыкания R_{m0} велико, и относительно велика составляющая I_0 тока индуктора. Поэтому ток индуктора для нагрева внутренней поверхности больше тока индуктора для нагрева внешней при одинаковых размерах обоих индукторов. Разница увеличивается с уменьшением диаметра индуктора и с понижением частоты. Очевидно, что следствием этого является относительное увеличение потерь в индукторе и понижение его к. п. д.

Другой причиной понижения к. п. д. индуктора, также представляющей собой следствие кольцевого эффекта, является увеличение ширины активного слоя a_2 , в котором протекает индуциро-

ванный ток (§ 1-7). Это приводит к уменьшению активного сопротивления r_2 , по сравнению с его значением при нагреве внешней поверхности. Зависимость ширины активного слоя от зазора выражена весьма сильно. Действие кольцевого эффекта усиливается с увеличением радиальной высоты провода индуктора.

При отсутствии нагреваемого объекта можно считать, что почти весь ток сконцентрирован на внутренней поверхности индуктора в слое, толщина которого приблизительно равна глубине проникновения тока. Если поместить индуктор внутрь отверстия нагреваемой детали, то за счет эффекта близости ток в большей или меньшей степени будет проходить и по внешней поверхности индуктора. В его сечении установится некоторое результирующее распределение тока. При этом ток концентрируется на внешней поверхности тем сильнее, чем меньше зазор, так как с уменьшением зазора действие эффекта близости усиливается. Усиливается также магнитное поле на поверхности детали и индуцированный в ней ток. Распределение тока по поверхности детали и ширина активного слоя приближенно могут быть определены по эффективному зазору, который равен расстоянию от центра тяжести эпюры тока в индукторе до нагреваемой поверхности. Эффективный зазор увеличивается с увеличением радиальной высоты провода.

Радиальную высоту провода необходимо по возможности уменьшать также и потому, что при этом будет уменьшаться магнитное сопротивление R_{m0} , которое в значительной мере определяется площадью поперечного сечения внутренней полости индуктора. Однако возможности здесь ограничены условиями работы системы охлаждения индуктора и его механической прочностью. Практически минимальная высота провода составляет 6—8 мм.

При сравнении собственных активных сопротивлений r_1 индукторов для нагрева внешних и внутренних поверхностей видно, что в последнем случае оно несколько меньше, так как вследствие противоположного действия кольцевого эффекта и эффекта близости сечение провода используется лучше. Однако это не компенсирует разобранных отрицательных следствий кольцевого эффекта. Для того чтобы такие индукторы имели достаточно высокий электрический к. п. д., необходимо применять зазоры не более 2—3 мм, а при диаметрах, меньших 50 мм, зазор должен составлять около 1 мм.

Для нагрева отверстий диаметром, меньших 100 мм, с помощью рассмотренных простых индукторов следует использовать радио-

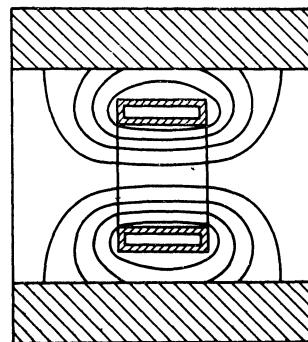


Рис. 7-1. Магнитное поле индуктора для нагрева внутренней поверхности

частоты, которые обеспечивают лучшую магнитную связь индуктора и нагреваемой детали, а следовательно, и более высокий к. п. д. индуктора. При диаметрах, больших 100 мм, могут использоваться и частоты 2500—8000 гц. Во всех случаях, однако, электрический к. п. д. оказывается несколько ниже, чем у соответствующих индукторов для закалки внешних поверхностей. При малых диаметрах отверстия (меньше 30 мм) индуктор обычной кон-

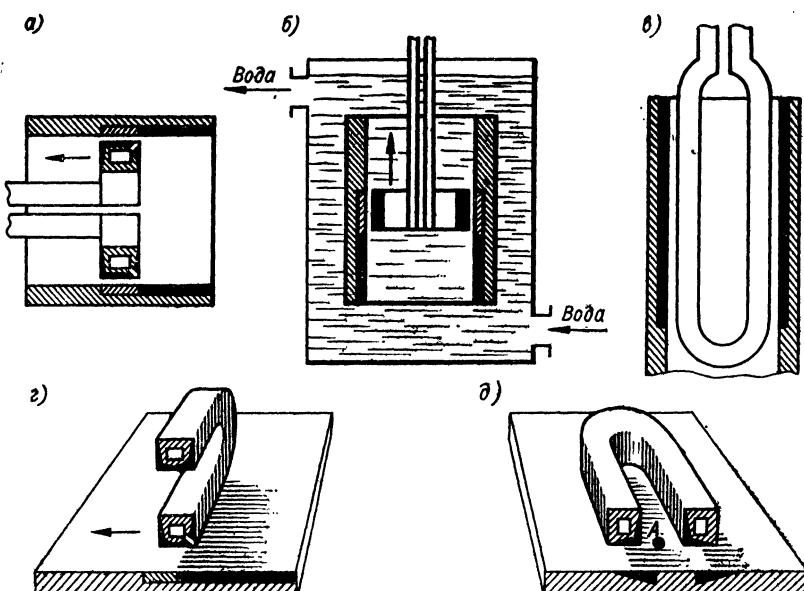


Рис. 7-2. Индукторы без магнитопроводов: *а* — цилиндрический из медной трубы для закалки внутренней поверхности; *б* — то же, из тонкой ленты для закалки под водой; *в* — петлевой индуктор для закалки внутренней поверхности; *г* — индуктор для закалки плоской поверхности с вертикальным расположением проводов; *д* — то же с расположением проводов в горизонтальной плоскости

структуре имеет к. п. д. примерно 20—30%, что практически исключает возможность его использования. В этом случае можно применить метод закалки под водой, заключающийся в том, что индуктор, изготовленный из тонкого сплошного провода или ленты (рис. 7-2, б), вместе с деталью погружается в воду, которая охлаждает индуктор [18]. Потери тепла деталью не слишком велики, так как около нагретой поверхности образуется паровая рубашка. При такой конструкции индуктора значительно ослабляется кольцевой эффект и уменьшается магнитное сопротивление на участке внутри индуктора вследствие увеличения площади отверстия.

Часто для закалки отверстий применяют индукторы петлевого типа (рис. 7-2, в), которые нагревают две полосы с противоположных

сторон отверстия. Для равномерного нагрева всей поверхности деталь приводится в быстрое вращение. В этом случае также справедливо все сказанное о работе цилиндрических индукторов.

Рассмотрим работу индуктора при нагреве плоской поверхности. Индукторы, схематически изображенные на рис. 7-2, *г* и *д*, действуют подобно индукторам для нагрева отверстий. В индукторе на рис. 7-2, *д* ток частично вытесняется к внутренней боковой поверхности. В обоих случаях эффективный зазор довольно велик, так же как и магнитное сопротивление R_{mo} . Существенное влияние на работу индукторов оказывает взаимодействие полей прямого и обратного проводов, токи в которых находятся в противофазе. Очевидно, что благодаря этому в любой точке нагреваемой поверхности будут одновременно индуцироваться противоположно направленные токи, ослабляя друг друга. В точке, находящейся на равном расстоянии от проводов (точка *A* на рис. 7-2, *д*), индуцированный ток равен нулю.

Чтобы ослабить вредное взаимодействие полей прямого и обратного проводов, их необходимо располагать на большом расстоянии один от другого. При обычно применяемых сечениях проводов это полезно и для ослабления кольцевого эффекта. Однако в этом случае нагреваться будут преимущественно участки поверхности детали, находящиеся под проводами. Средняя же часть будет нагреваться главным образом за счет теплопроводности. Выравнивание нагрева обычно не успевает произойти. Поэтому подобные индукторы не могут быть применены для одновременного нагрева неподвижной поверхности.

При непрерывно-последовательном нагреве и большой общей ширине индуктора для получения закаленных слоев глубиной 5—6 мм и меньше необходимо применять большие скорости подачи, а следовательно, и большие мощности, что не всегда возможно. Кроме того, когда необходимо произвести закалку всей поверхности, трудно избежать перегрева края детали, в особенности при сходе индуктора с нагреваемой поверхности в конце закалки.

В индукторе на рис. 7-2, *г* провода расположены в вертикальной плоскости и только нижний является рабочим. Поэтому увеличение расстояния между проводами приводит к росту потерь в подводящих шинах и к резкому понижению коэффициента мощности. К. п. д. индукторов обоих типов довольно низки и обычно составляют 40—60%.

7-2. Применение магнитопроводов из ферромагнитных материалов

Уменьшение магнитного сопротивления обратного замыкания R_{mo} , а также влияния обратного провода индуктора на распределение индуцированного тока может быть достигнуто применением магнитопроводов, изготовленных из листов трансформаторной стали

или из ферритов.¹ На рис. 7-3 приведен примерный эскиз поперечного разреза такого индуктора и картина его магнитного поля.

Индукция в магнитопроводе обычно равна 0,15—0,8 тл. Поэтому его магнитным сопротивлением можно пренебречь и считать,

что R_{m0} определяется лишь длиной воздушных промежутков, (2—5 мм) между башмаками магнитопровода и нагреваемой поверхностью.

С помощью магнитопровода можно также изменить распределение индуцированного тока на поверхности детали. Как было указано выше (§ 5-1), при ширине индуктора, меньшей полуторного зазора, дальнейшее его сужение почти перестает влиять на распределение индуцированного тока по поверхности; картина распределения становится расплывчатой, что понижает общий к. п. д. нагрева.

Рис. 7-3. Разрез индуктирующего провода с магнитопроводом из трансформаторной стали

1 — индуктирующий провод; 2 — магнитопровод

Если на индуктирующий провод надеть магнитопровод, то концентрация тока под индуктором резко повышается. По ширине паза в магнитопроводе поверхностная плотность тока изменяется срав-

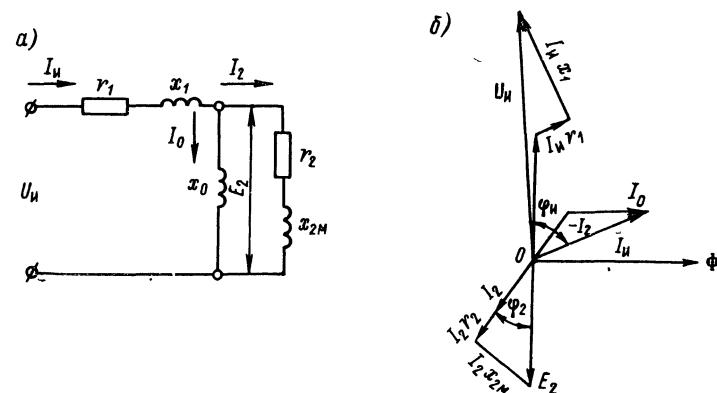


Рис. 7-4. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) индуктора с магнитопроводом

нительно мало и быстро падает за его пределами; с внешней стороны это проявляется в резко очерченной форме нагретой полосы. Возможность влияния на распределение индуцируемого тока используется в ряде случаев для выравнивания нагрева при закалке

¹ Индукторы с магнитопроводами предложены член-корр. АН СССР проф. В. П. Вологдиным и канд. техн. наук А. А. Фогелем.

деталей сложной формы. К. п. д. индукторов с магнитопроводами обычно не ниже 75—80%.

При частотах ниже 10 000 Гц магнитопроводы изготавливаются из листов стали Э44 или Э4 толщиной 0,2—0,3 мм . При радиочастотах следует применять ферриты.

Ток в индуктирующем проводе оттесняется к открытой стороне паза магнитопровода независимо от колышевого эффекта и эффекта близости [23]. Это ясно из того, что благодаря высокой магнитной проницаемости магнитопровода магнитное поле с обратной стороны провода пренебрежимо мало по сравнению с магнитным полем на его наружной поверхности: в пределе при $\mu = \infty$ поле в магнитопроводе равно нулю. Поэтому при любой форме провода в такой системе наблюдается односторонний поверхностный эффект.

Рассмотрим схему замещения индуктора с магнитопроводом. Из рис. 7-3 видно, что путь обратного замыкания главного магнитного потока Φ_m , сцепленного как с нагреваемым объектом, так и с индуктирующим проводом, проходит через воздушные зазоры и через магнитопровод, в то время как путь обратного замыкания потока рассеяния Φ_s проходит только через магнитопровод, где эти потоки и объединяются. Так как магнитным сопротивлением магнитопровода ввиду его малости можно пренебречь, то схема замещения на рис. 5-4 упрощается, в ней остается только реактивность рассеяния x_{s1} .

На рис. 7-4 представлены схема замещения индуктора (рис. 7-4, а) и соответствующая ей векторная диаграмма (рис. 7-4, б), которые будут использованы нами для вычисления электрических параметров индуктора [24, 42].

7-3. Расчетная ширина активного слоя

Так же как и раньше (§ 5-1), будем исходить из распределения поверхностной плотности тока и удельной мощности по нагреваемой поверхности. Строго аналитическое решение задачи представляет большие трудности. Однако для приближенного ее решения можно использовать методы магнитостатики.

При звуковых частотах, когда глубина активного слоя в нагреваемом металле сравнима с зазором между его поверхностью и индуктором, магнитное поле индуктора почти такое же, как при постоянном токе (см. рис. 7-3). В качестве вычислительного приема в этом случае может быть применен метод зеркальных отображений. Внутрь металла следует поместить фиктивный проводник с током, имеющим то же направление, что и ток в индукторе. Тогда, если относительная магнитная проницаемость металла равна бесконечности, линии поля будут входить в него под прямыми углами. Если $\mu = 8 \div 9$, то и в этом случае углы близки к прямым, так что для упрощения расчетов чаще всего считают $\mu = \infty$.

Магнитное поле индуктора при радиочастотах ($f > 7 \cdot 10^4 \text{ Гц}$), приведенное на рис. 7-5, резко отличается по характеру от рассмотр-

ренного. Силовые линии как бы омывают поверхность, входя в нее очень полого, что объясняется реакцией индуцированного в металле тока, сосредоточенного в тонком поверхностном слое. Тем не менее метод зеркальных отображений применим и в этом случае, но в металл следует поместить токоотражение обратного знака [2].

Эксперимент и расчет показывают, что при $a/h > 1$ расчетная ширина активного слоя (определенная так же, как и раньше, в § 5-1)

$$a_2 \approx (0,9 \div 1,2) a,$$

где a — ширина паза в магнитопроводе.

Это соотношение оказывается справедливым и при радиочастотах, причем независимо от того, обладает ли нагреваемая плита магнитными свойствами или нет. Поэтому для всех расчетов мы примем

$$a_2 = a. \quad (7-1)$$

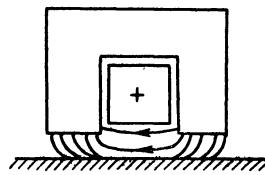


Рис. 7-5. Магнитное поле индуктора с магнитопроводом при относительно высокой частоте (радиочастота)

Укажем, что экспериментальные кривые распределения поверхностной плотности тока получались с помощью миниатюрного магнитного пояса, э. д. с. которого измерялась ламповым вольтметром. Удельная мощность в различных точках стальной плиты вычислялась как с учетом зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля, так и для $\mu = \text{const}$, что не дало существенной разницы.

Расчет и эксперимент показывают, что распределение поверхностной плотности тока и удельной мощности, а также и расчетная ширина активного слоя слабо зависят от зазора при практически встречающихся его значениях. При этом влияние зазора ослабевает с увеличением ширины башмаков магнитопровода при неизменной ширине паза. Однако чрезмерное увеличение ширины башмаков приводит к получению размытой полосы нагрева. Поэтому практически ограничиваются соотношением:

$$c \approx (0,2 \div 0,75) a, \quad (7-2)$$

где c — ширина башмака магнитопровода, a — ширина паза.

Уменьшение ширины башмака ограничивается повышением индукции в стали магнитопровода (которая при повышенных частотах не должна быть больше 0,6 тл во избежание перегрева магнитопровода), а также ростом магнитного сопротивления R_{mo} .

Зная расчетную ширину активного слоя, нетрудно вычислить его активное и внутреннее реактивное сопротивления. Для этого пригодны выведенные выше формулы:

$$r_2 = \frac{l_u}{a} r_0, \quad x_{2M} = \frac{l_u}{a} x_0,$$

где l_n — длина полосы; r_0 и x_0 — активное и внутреннее реактивное сопротивления единичного квадрата, вычисляемые в зависимости от режима нагрева.

При нагреве плоского предмета l_n равняется длине индуцирующего провода.

При нагреве внутренней цилиндрической поверхности

$$l_n = \pi D'_2, \quad (7-3)$$

где $D'_2 = D_2 + \xi$ — расчетный диаметр.

Вначале мы рассмотрим расчет применительно к случаю плоского индуктора. Поясним, как распределяются по нагреваемой поверхности прямые и обратные ветви индуцированного тока.

Для прямой ветви характерна концентрация тока в относительно узкой полосе, в то время как в обратных ветвях, расположенных симметрично относительно прямой ветви, токи растекаются диффузно, широкими полосами (рис. 7-6). Поэтому поверхностная плотность тока в обратных ветвях мала и нагрев практически отсутствует.

Благодаря большому эффективному сечению, по которому проходят обратные токи, сопротивлением их путей можно пренебречь, как мы и сделали с самого начала.

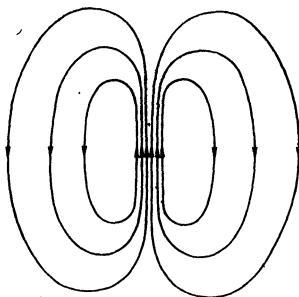


Рис. 7-6. Примерная картина растекания индуцированного тока под плоским индуктором с магнитопроводом

7-4. Расчет собственных активного и реактивного сопротивлений индуктора

На рис. 7-7 приведен поперечный разрез активной части индуктора.

Соответственно двум способам нагрева под закалку — одновременному и непрерывно-последовательному, индуцирующий провод выполняется в виде массивной медной шины (рис. 7-7, а) или в виде тонкостенной медной трубы, непрерывно охлаждаемой водой (рис. 7-7, б).

Как уже указывалось, при наличии магнитопровода наблюдается явление одностороннего вытеснения тока к стороне провода, расположенной у открытой стороны паза. Это позволяет при однослойной обмотке, которая в практике встречается наиболее часто, использовать для вычисления активного r_1 и внутреннего реактивного x_{1m} сопротивлений провода формулы (5-29), (5-30) и (5-31), заменив для плоского индуктора πD_1 на l_n .

Использование многослойных обмоток при повышенных частотах не рекомендуется, так как вызывает значительное увеличение потерь [7, 8, 23].

Необходимо теперь вычислить составляющую реактивности рассеяния, определяемую магнитным потоком, проходящим в воздушном зазоре $h' + h$ между индуктирующим проводом и нагреваемой поверхностью. Точное вычисление его весьма сложно, но задачу можно упростить, воспользовавшись приближенным способом вычисления поперечного поля рассеяния провода, заложенного в открытый паз.

При расчете поля рассеяния будем считать его равномерным, паз условно продолжим до нагреваемой поверхности (рис. 7-7, штриховая линия). Такое допущение оправдывается тем, что обычно отношение $(h' + h)/a$ в несколько раз меньше единицы; при этом получается достаточно точный результат расчета. Будем

также считать, что магнитная проницаемость магнитопровода равна бесконечности.

Тогда на основании закона полного тока получим:

$$\oint_{abcda} \mathbf{H} d\mathbf{l} = aH_b = \omega \sqrt{2} I_n,$$

где I_n — действующее значение тока в индукторе; H_b — напряженность магнитного поля в воздухе.

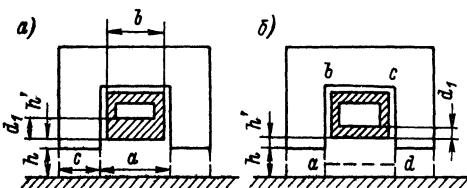


Рис. 7-7. Эскизы индукторов с магнитопроводами: а — для одновременного нагрева; б — для непрерывно-последовательного нагрева

Магнитный поток в воздушном промежутке

$$\Phi_b = \mu_0 H_b (h + h') l_n = \mu_0 \omega \frac{\sqrt{2} I_n}{a} (h + h') l_n.$$

Реактивное сопротивление, определяемое магнитным потоком в воздухе,

$$x_b = \omega \frac{\omega \Phi_b}{\sqrt{2} I_n} = \omega \mu_0 \omega^2 \frac{l_n}{a} (h + h')$$

или

$$x_b = 7,9 \cdot 10^{-6} f \omega^2 \frac{l_n}{a} (h + h'), \text{ ом.}$$

Полное реактивное сопротивление рассеяния

$$x_s = x_b + x_{1M} = 7,9 \cdot 10^{-6} f \omega^2 \frac{l_n}{a} (h + h') + r_{1n} k_x, \text{ ом,} \quad (7-4)$$

где f — частота, гц; ω — число витков; l_n — длина индуктирующего провода, м; a — ширина паза в магнитопроводе, м; h — зазор между магнитопроводом и нагреваемой поверхностью, м; h' — расстояние от внешней поверхности индуктирующего провода до края магнитопровода, м.

7-5. Расчетные параметры индуктора

Конструкция индуктора, представленная на рис. 7-8, является наиболее общей, и схема расчета составляется применительно к ней. Индукторы почти всегда выполняются одновитковыми, что позволяет упростить расчет, однако все полученные формулы будут справедливы и для многовитковых индукторов с однослойной обмоткой (витки уложены в один ряд). В этом случае все сопротивления умножаются на w^2 .

Индукторы, подобные изображенному на рис. 7-8, часто делаются разборными. Так, например, подводящие шины крепятся к колодкам на концах индуктирующего провода винтами.

Индуктор рассчитывается в соответствии со схемой замещения на рис. 7-4, а. Поскольку в этой схеме составляющая реактивности рассеяния x_{s2} (см. рис. 5-4) отсутствует, формулы (5-16) и (5-17) примут вид:

$$x'_2 = x'_{2M} = c \left(x_{2M} + \frac{x_{2M}^2 + r_2^2}{x_0} \right), \quad (7-5)$$

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0} \right)^2 + \left(1 + \frac{x_{2M}}{x_0} \right)^2}, \quad (7-6)$$

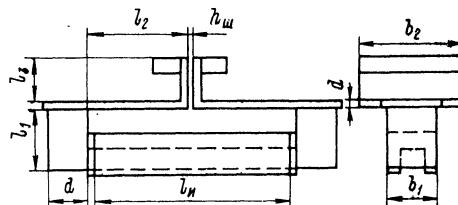


Рис. 7-8. Индуктор нагрева плоских поверхностей

где x'_2 — приведенное реактивное сопротивление вторичной цепи, равняется теперь приведенному внутреннему реактивному сопротивлению x'_{2M} .

Формула (5-15) для приведенного активного сопротивления нагреваемого объекта, остается без изменения.

Эквивалентное реактивное сопротивление индуктора определяется из соотношения:

$$x_3 = x_s + x'_{2M}. \quad (7-7)$$

Эквивалентное активное сопротивление находится по формуле (5-12):

$$r_3 = r_1 + r'_2.$$

Определим магнитное сопротивление воздушного промежутка R_{m0} и реактивное сопротивление x_0 (см. рис. 7-4). Считая, что индукция под башмаками магнитопровода постоянна, а за пределами их равна нулю, получим:

$$\Phi = \frac{H_B 2h}{R_{m0}} = \frac{B_B 2h}{\mu_0 R_{m0}} = cl_u B_B,$$

откуда

$$R_{m0} = \frac{2h}{\mu_0 cl_u}, \quad (7-8)$$

$$x_0 = \frac{\omega}{R_{m0}} = \omega \mu_0 \frac{cl_u}{2h} = 3,95 \cdot 10^{-6} f \frac{cl_u}{h}, \text{ ом}, \quad (7-9)$$

где c — ширина башмака магнитопровода, м.

Возможность такого упрощения видна из экспериментально полученной зависимости $\Phi_z/\Phi_0 = f(z)$ (рис. 7-9). Последняя получена измерением с помощью лампового вольтметра э. д. с., индуктированной в пробном витке, охватывающем нагреваемую пластины. Кривая относительных значений индукции $\bar{B}_z = f(z)$ получена графическим дифференцированием первой зависимости.

При больших по сравнению с шириной башмака магнитопровода зазорах h формула (7-9) дает несколько преуменьшенное значение x_0 ,

что приводит к некоторому завышению тока индуктора и напряжения на нем.

Знак ошибок создает известную гарантию при проектировании установки и при выборе оборудования. Поэтому формула (7-9) будет принята в расчетах как основная.

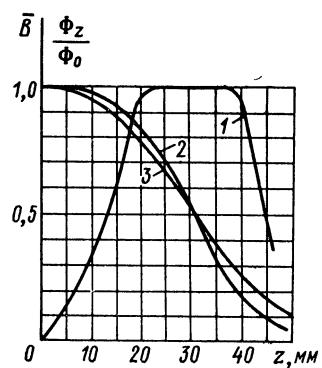


Рис. 7-9. Экспериментально полученное распределение магнитного потока и индукции на поверхности стальной плиты

1 — $\bar{B} = f(z)$; 2 — $\Phi_z/\Phi_0 = f(z)$ при $h = 5$ мм;
3 — $\Phi_z/\Phi_0 = f(z)$ при $h = 10$ мм. Размеры индуктора: $a = 41$ мм; $b = 39$ мм; $c = 16$ мм

7-6. Расчет подводящих шин

По форме выполнения шины имеют различную конструкцию. Для упрощения расчета шины сложной формы разбиваются на однотипные участки. Формы шин могут быть сведены к следующим двум основным.

1. Шины в виде двух параллельных широких полос, расположенных на малом (обычно 1,5—3 мм) расстоянии друг от друга. Как правило, они имеют трапециoidalную форму (см. рис. 5-10). Шины подобной конструкции применяются обычно в индукторах для закалки внутренних и наружных поверхностей цилиндров. Эти шины рассчитываются по формулам (5-32), (5-33).

2. Шины, имеющие короткий участок у места присоединения индуктора к трансформатору (участок подобен рассмотренным выше шинам). Дальше шины расходятся в разные стороны и поворачиваются к индуцирующему проводу. Шины этой конструкции чаще всего применяются в индукторах для закалки плоских поверхностей (см. рис. 7-8).

Все прочие конструкции являются комбинациями указанных двух типов шин и ничего нового, в смысле расчета, не представляют.

Расчет участков l_3 (см. рис. 7-8) и активного сопротивления всех участков производится так же, как было указано в § 5-5. Реактивные сопротивления участков l_1 и l_2 рассчитываются по формуле для уединенной шины прямоугольного сечения:

$$L = 2l \left(2,303 \lg \frac{2l}{b+d} + 0,5 + 0,223 \frac{b+d}{l} \right) 10^{-7}, \text{ гн.} \quad (7-10)$$

Когда толщина шины d превышает Δ_1 более чем в два раза, вместо d подставляется Δ_1 . При $d < \Delta_1$ подставляется d . Однако из соображений механической прочности шины не выполняют тоньше 5—8 мм и, таким образом, первое условие почти всегда выполнено.

Коэффициент самоиндукции участков l_1 и l_2 рассчитывается отдельно, при этом участок l_2 заменяется, как и выше, эквивалентным прямоугольником, имеющим основание

$$b' = \frac{b_1 + b_2}{2}.$$

Тогда

$$x_{ш1} = \omega 4l_1 \left(2,3 \lg \frac{2l_1}{b_1 + \Delta_1} + 0,5 + 0,223 \frac{b_1 + \Delta_1}{l_1} \right) \cdot 10^{-7}, \text{ ом}; \quad (7-11)$$

$$x_{ш2} = \omega 4l_2 \left(2,3 \lg \frac{2l_2}{b' + \Delta_1} + 0,5 + 0,223 \frac{b' + \Delta_1}{l_2} \right) \cdot 10^{-7}, \text{ ом}; \quad (7-12)$$

$$x_{ш3} = 7,9 \cdot 10^{-6} f \frac{l_3 h_{ш}}{b_2} + 2\rho_1 \frac{l_3}{d_{ш} b_2} k_x, \text{ ом}; \quad (7-13)$$

$$x_{ш} = x_{ш1} + x_{ш2} + x_{ш3}.$$

Казалось бы, что второй участок следовало рассчитывать как одну шину, так как ток в одной половине проходит в том же направлении, что и в другой. Расстояние между их концами очень мало. Тогда получили бы

$$L_{ш2} = 4l_2 \left(2,3 \lg \frac{4l_2}{b' + \Delta_1} + 0,5 + 0,223 \frac{b' + \Delta_1}{2l_2} \right) \cdot 10^{-7}, \text{ гн.}$$

Однако эта формула дает недопустимо завышенный результат. Это происходит потому, что шины, строго говоря, не являются вполне уединенными, длина их относительно мала, а форма сложная.

Как показывает опыт, формулы (7-11) и (7-12) дают ошибку не более 10%. В рассматриваемом случае их следует считать полуэмпирическими.

7-7. Расчет плоского индуктора

Расчет построен применительно к индуктору, приведенному на рис. 7-8.

Для расчета заданы частота $f = 2000 \text{ Гц}$; глубина закаленного слоя $x_k = 0,45 \text{ см}$; длина закаленной полосы $l_u = 50 \text{ см}$; зазор $h = 0,5 \text{ см}$; удельная мощность $\rho_0 = 1,55 \text{ кВт/см}^2$; способ закалки непрерывно-последовательный; скорость движения индуктора $v = 0,5 \text{ см/сек}$; время нагрева $t_k = 4,4 \text{ сек}$.

Конструктивные размеры индуктора: длина магнитопровода $l_i = 50 \text{ см}$; полная длина индуктирующего провода $l'_i = 53 \text{ см}$; число витков $w = 1$; $l_1 = 7 \text{ см}$; $l_2 = 26,4 \text{ см}$; $l_3 = 4 \text{ см}$; $b_1 = 8 \text{ см}$; $b_2 = 18,5 \text{ см}$; $b' = (8 + 18,5)/2 = 13,25 \text{ см}$; $d_{ш1} = 5 \text{ см}$; $d_{ш2} = d_{ш3} = 0,8 \text{ см}$; $h_{ш} = 0,2 \text{ см}$.

При одновременном нагреве задается ширина нагретой полосы a_3 .

1. Ширина паза в магнитопроводе и ширина индуктирующего провода. При одновременном нагреве ширина паза определяется соотношением:

$$a \approx 1,1a_3. \quad (7-14)$$

При непрерывно-последовательном нагреве, если задана мощность генератора P_g , то

$$a = 0,64P_g/(\rho_0 I_{ii}),$$

если, как в рассмотренном случае, задана скорость v , то

$$a = vt_k = 0,005 \cdot 4,4 = 0,022 \text{ м.}$$

Чтобы обеспечить нужную изоляцию, ширина провода берется на 1,5 — 4 мм меньше ширины паза:

$$b = a - 2\Delta b = 0,022 - 2 \cdot 0,001 = 0,02 \text{ м},$$

где $\Delta b = 0,75 \div 2 \text{ мм}$ — толщина изоляции. Если магнитопровод изготовлен из феррита, то $\Delta b = 0$.

2. Магнитная проницаемость определяется в соответствии с п. 6 расчета цилиндрического индуктора (§ 5-6).

При непрерывно-последовательном нагреве рассчитывается только горячий режим.

Задаемся $m = 0,55$ ($\mu_2 = 12$). Из табл. 4-1, 4-2, 4-3 и 4-4 находим: $K = 1,43$; $N = 2,84$; $\cos \varphi_2 = 0,911$; $\sin \varphi_2 = 0,412$;

$$H_{me} = \sqrt{\frac{1,55 \cdot 10^7 \cdot 10^6}{1,405 \cdot 1,43 \cdot 44,7 \cdot 0,911}} = 4,35 \cdot 10^5 \text{ а/м};$$

$$H_{mk} = 4,35 \cdot 10^5 / 2,84 = 1,53 \cdot 10^5 \text{ а/м.}$$

По усредненной кривой намагничивания (рис. 3-5) находим $\mu_2 = 11,53$, что соответствует $m = 0,546$ и близко к принятому значению. Поэтому принимаем эти результаты в качестве окончательных.

3. Полное электрическое сопротивление нагреваемого слоя

$$z_2 = z_0 l_{ii} / a.$$

При холодном и промежуточном режимах

$$z_0 = 1,68 \rho_e / \Delta_e, \quad \Delta_e = 503 \sqrt{\rho_e / (\mu_e f)}, \text{ м.}$$

В холодном режиме $\rho_e \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$, в промежуточном режиме $\rho_e \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$. В горячем режиме

$$z_0 = 2,81 \cdot 10^{-6} K \sqrt{f} = 2,81 \cdot 10^{-6} \cdot 1,43 \cdot 44,7 = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

$$z_2 = 1,79 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 / 0,022 = 4,08 \cdot 10^{-3} \text{ ом.}$$

4. Активное и внутреннее реактивное сопротивления нагреваемого слоя:

$$r_2 = z_2 \cos \varphi_2 = 3,72 \cdot 10^{-3} \text{ ом}; \quad x_{2m} = z_2 \sin \varphi_2 = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ ом.}$$

5. Магнитное сопротивление нагреваемого слоя

$$Z_{m2} = \omega / z_2 = 2\pi \cdot 2000 / (4,08 \cdot 10^{-3}) = 3,07 \cdot 10^6.$$

6. Магнитный поток в нагреваемом слое

$$\Phi_m = a H_{me} / Z_{m2} = 0,022 \cdot 4,35 \cdot 10^5 / (3,07 \cdot 10^6) = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ вб.}$$

7. Ширина башмака магнитопровода $c = \Phi_m / (B l_{ii})$.

При $f < 2500 \text{ Гц}$ для стали толщиной 0,35 мм $B < 0,2 \text{ тл}$; для стали 0,2 мм $B < 0,6 \text{ тл}$.

При $f < 8000 \div 10000 \text{ Гц}$ для стали толщиной 0,2 мм $B < 0,2 \text{ тл}$; для стали 0,1 мм $B < 0,4 \text{ тл}$; для феррита $B < 0,3 \text{ тл}$.

При $f < 440 \text{ кГц}$ для феррита $B < 0,1 \text{ тл}$.

При больших индукциях удельные потери в магнитопроводе недопустимо возрастают.

Обычно $c \approx (0,2 \div 0,75) a$. В дальнейшем следует убедиться, что $r_2/x_0 < 0,5$. Если это не соблюдается, то необходимо увеличить ширину башмака, не выходя за указанные пределы.

Выбираем сталь Э44 толщиной 0,2 мм, тогда

$$c = 3,12 \cdot 10^{-3} / (0,446 \cdot 0,5) = 0,014 \text{ м.}$$

8. Коеффициент приведения активного сопротивления

$$x_0 = 3,95 \cdot 10^{-6} f l_n c / h = 3,95 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 0,014 / 0,005 = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ ом};$$

$$r_2/x_0 = 0,33 < 0,5; \quad c = \frac{1}{(r_2/x_0)^2 + (1 + x_{2M}/x_0)^2} = 0,692.$$

9. Приведенные активное и внутреннее реактивное сопротивления нагреваемого слоя:

$$r'_2 = cr_2 = 2,58 \cdot 10^{-3} \text{ ом}; \quad x'_{2M} = c [x_{2M} + (x_{2M}^2 + r_2^2)/x_0] = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{ ом.}$$

10. Толщина индуктирующего провода выбирается в зависимости от способа нагрева, как было указано в § 5-6.

Выбираем трубку $20 \times 10 \times 2$ мм; глубина проникновения тока $\Delta_1 = 0,0016 \text{ м}$, $d_1 = 0,002 \text{ м}$, т. е. $\Delta_1 < d_1$.

11. Собственное активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктирующего провода:

$$r_{1n} = \rho_1 l'_n / (bd_1) = 2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,53 / (0,02 \cdot 0,002) = 2,65 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

$$d_1/\Delta_1 = 1,25; \quad k_r = 1,23; \quad k_x = 0,95 \text{ (см. рис. 5-9);}$$

$$r_1 = r_{1n} k_r = 3,26 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; \quad x_{1M} = r_{1n} k_x = 2,51 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

12. Реактивное сопротивление рассеяния индуктора:

$$x_s = 7,9 \cdot 10^{-6} f l_n (h + h') / a + x_{1M} = \\ = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,53 (0,005 + 0,001) / 0,022 + 2,51 \cdot 10^{-4} = 2,54 \cdot 10^{-3} \text{ ом.}$$

Здесь h' выбирается $0,5 \rightarrow 1,5$ мм с целью защиты индуктирующего провода от случайного соприкосновения с нагреваемой поверхностью.

13. Активное сопротивление подводящих шин:

$$r_{\text{шк}} = r_{\text{пк}} k_{rk}; \quad r_{\text{пк}} = \rho_1 l'_k / (b'_k d_{\text{шк}}).$$

В рассматриваемом примере участки симметричны и их число сокращается в два раза. $d_{\text{шк}}/\Delta_1 \gg 2$ на любом из трех участков. Поэтому $k_r \approx k_x \approx d_{\text{шк}}/\Delta_1$ и $r_{\text{шк}} = 2\rho_1 l_k / (b'_k \Delta_1)$;

$$r_{\text{шк}} = \sum_1^3 r_{\text{шк}} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-8} (7/8 + 26,4/13,25 + 4/18,5) / 0,0016 = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$$

14. Реактивное сопротивление шин: а) для параллельных участков, расположенных на близком расстоянии один от другого

$$x_{\text{шк}} = 7,9 \cdot 10^{-6} f l_k h_{\text{шк}} / b'_k + r_{\text{пк}} k_{rk};$$

б) для «уединенных» участков

$$x_{\text{шк}} = \omega 2 l_k \left(2,3 \lg \frac{2l_k}{b'_k + \Delta_1} + 0,5 + 0,223 \frac{b'_k + \Delta_1}{l_k} \right) \cdot 10^{-7}, \text{ ом.}$$

Если шины симметричны, то последний результат удваивается. Таким образом:

$$a) x_{ш3} = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 0,002 / 0,185 + 5,4 \cdot 10^{-6} = 1,22 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$b) x_{ш2} = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 0,264 \left(2,3 \lg \frac{2 \cdot 0,264}{0,1325 + 0,0016} + 0,5 + 0,223 \cdot \frac{0,1325 + 0,0016}{0,264} \right) \cdot 10^{-7} = 2,63 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

$$x_{ш1} = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 0,07 \left(2,3 \lg \frac{2 \cdot 0,07}{0,08 + 0,0016} + 0,5 + 0,223 \cdot \frac{0,08 + 0,0016}{0,07} \right) \cdot 10^{-7} = 4,57 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

Получим

$$x_{ш} \approx 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ ом}.$$

15. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_{и} = r_1 + r_{ш} + r'_2 = 2,98 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

$$x_{и} = x_s + x_{ш} + x'_{2M} = 7,86 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

$$z_{и} = \sqrt{x_{и}^2 + r_{и}^2} = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ ом}.$$

16. Коэффициент полезного действия индуктора

$$\eta_{и} = r'_2 / r_{и} = 2,58 / 2,98 = 0,867.$$

17. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_{и} = r_{и} / z_{и} = 2,98 / 8,4 = 0,355.$$

18. Ток в индукторе ($w = 1$)

$$I'_{и} = I_{и} = \sqrt{P_T / r'_2} = \sqrt{1,705 \cdot 10^5 / (2,58 \cdot 10^{-3})} = 8130 \text{ а.}$$

$$P_T = \rho_0 I_{и} a = 1,55 \cdot 10^7 \cdot 0,5 \cdot 0,022 = 1,705 \cdot 10^5 \text{ вт.}$$

19. Напряжение на индукторе:

$$U'_{и} = I'_{и} z_{и} = U_{и} = 8130 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3} = 68,2 \text{ в.}$$

20. Мощность, подводимая к индуктору:

$$P_{и} = P_T / \eta_{и} = 1,705 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} / 0,867 = 197 \text{ квт.}$$

21. Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$P_r = P_{и} \operatorname{tg} \varphi_{и} = 197 \cdot 2,63 \approx 520 \text{ квар.}$$

Из эксперимента получено: $U_{и} = 65 \text{ в}$; $I_{и} = 8760 \text{ а}$; $\eta_{и} = 82,4\%$; $\cos \varphi_{и} = 0,364$.

Путем калориметрирования получено: $r_1 + r_{ш} = 0,474 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$; $r_{и} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$; $x_{и} = 7,36 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$.

Если индуктор имеет w витков, расположенных в один ряд, то следует r'_2 , x'_{2M} , x_s , r_1 умножить на w^2 ; r_1 следует также разделить на коэффициент заполнения $g = 0,8 \div 0,9$; $I'_{и}$ делится на w .

После этого следует найти $x_{и}$, $r_{и}$, $z_{и}$, $U_{и}$ и все остальные величины.

7-8. Виды индукторов для закалки внутренних поверхностей

Наиболее распространенный вид индуктора для закалки внутренней поверхности — кольцевой индуктор для закалки цилиндрической поверхности (см. рис. 8-12, 8-15). Особенностью этого индуктора является то, что коэффициент заполнения магнитопровода сталью на внутренней его кромке больше, чем на внешней. Это затрудняет изготовление таких индукторов при диаметрах, меньших 50 мм. В последнем случае вместо стали лучше применять феррит, особенно если частота выше 2500 гц. В остальном работа такого индуктора протекает так же как и плоского.

Для расчета индуктора следует пользоваться приведенным выше порядком расчета со следующим изменением некоторых пунктов.

В п. 2 дополнительно определяется приведенная удельная мощность:

$$p_0' = p_0 D_2 / D_2^{'},$$

где $D_2^{'} = D_2 + \xi$; как и прежде,

$$\xi = M \Delta_\kappa.$$

При вычислении z_2 и Z_{m2} в пп. 3 и 5 вместо l_n подставляется $\pi D_2^{'}$.

При вычислении x_0 и x_s в пп. 8 и 12 вместо l_n подставляется πD , где

$$D = \frac{D_2 + D_1}{2} + h'$$

— средний диаметр воздушного зазора.

При частотах выше 10000 гц часто применяются индукторы без магнитопроводов, особенности работы которых были разобраны в § 7-1.

Распределение магнитных потоков и схема замещения в этом случае более сложны, чем рассмотренные выше. Однако для ориентировочных расчетов здесь также можно использовать схему замещения индуктора без магнитопровода (см. рис. 5-5), которая совершенно точно соответствует весьма длинному индуктору [26].

Наибольшую трудность представляет собой определение x_0 . При $a \rightarrow \infty$, $x_0 \rightarrow x_{10}$, причем x_{10} определяется по внутреннему диаметру индуктора D_1 . В общем случае имеем:

$$x_0 = x_{10} k_c, \quad (7-15)$$

где $k_c < 1$ — поправочный коэффициент.

При обычно применяемых малых зазорах коэффициент k_c может быть вычислен по эмпирической формуле:

$$k_c = k_1 + (1 - k_1) e^{-3D_2/D_{cp}}, \quad (7-16)$$

где $k_1 = f(D_1/a)$ — определяется по рис. 5-6; $D_{cp} = (D_1 + D_1^{'})/2$ — средний диаметр индуктора; D_1 и $D_1^{'}$ — внешний и внутренний диаметры индуктора соответственно; D_2 — диаметр нагреваемой полости; $a = a_1 \approx a_2$.

Если $D_1/a \rightarrow 0$, то $k_c \rightarrow 1$ и $x_0 \rightarrow x_{10}$.

Активное r_1 и внутреннее реактивное сопротивления индуктора вычисляются по внешнему диаметру D_1 индуктора, по формулам (5-29) и (5-31), однако для того, чтобы приближенно учесть кольцевой эффект, результат уменьшается в 1,5 раза:

$$r_{1\pi} \approx \frac{\pi D_1 \rho_1}{1,5 a d_1}. \quad (7-17)$$

Ориентировочный расчет производится по схеме, приведенной в § 5-6, в которую вносятся также приведенные выше изменения в определение удельной мощности и расчетного диаметра нагреваемого объекта.

При закалке отверстий с диаметрами, меньшими 50 мм, часто употребляют индукторы петлевого типа, чаще всего с магнитопроводами (простейшую форму такого индуктора см. на рис. 8-17). Петлевые индукторы производят нагрев двух полос на поверхности детали. Для того чтобы равномерно нагреть всю поверхность, деталь необходимо вращать. Тогда нагрев равномерно растушевывается, и тепловые процессы протекают так же, как при обычном одновременном нагреве. Однако режим такого индуктора тяжелее, чем обычного цилиндрического, охватывающего всю нагреваемую поверхность. Для цилиндрического индуктора, если не учитывать незначительной разницы диаметров, рабочая площадь индуктирующего провода примерно равна площади нагреваемой поверхности. Выразив удельную мощность потерь в индуктирующем проводе через полную удельную мощность, получим:

$$\Delta p_i = p_0 \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) \frac{S}{S_i} \approx p_0 \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right),$$

где S и S_i — площади нагреваемой поверхности и индуктирующего провода соответственно; η_i — электрический к. п. д. индуктора; p_0 — полезная удельная мощность.

Наоборот, активная площадь петлевого индуктора в несколько раз меньше площади нагреваемой поверхности. Если в обоих случаях рассматривать одинаковые режимы нагрева (одни и те же x_k , t_k и p_0), то при одинаковых электрических к. п. д. получим удельные потери в петлевом индукторе

$$\Delta p_{i\pi} = p_0 \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) \frac{S}{S_{i\pi}}$$

и

$$\frac{\Delta p_{i\pi}}{\Delta p_i} \approx \frac{S}{S_{i\pi}} > 1.$$

Здесь $S_{i\pi}$ — активная площадь петлевого индуктора.

Так как ширина нагретой полосы приблизительно равна ширине паза в магнитопроводе a , то

$$\frac{\Delta p_{i\pi}}{\Delta p_i} \approx \frac{\pi D_2}{2a}.$$

Отсюда видно, что удельная мощность потерь в индуктирующем проводе у петлевого индуктора значительно выше. Это создает трудности в охлаждении индуктора при больших удельных мощностях. Так как удельная мощность увеличивается с уменьшением глубины закаленного слоя x_{κ} , то получение тонких слоев становится затруднительным. При частоте, принятой для петлевого индуктора с помощью цилиндрического индуктора, можно получить более тонкий слой, если диаметр отверстия не менее 50 мм и цилиндрический индуктор работает с нормальным к. п. д.

К. п. д. петлевого индуктора с магнитопроводом достигает 80—85%. Расчет приводится так же, как и расчет плоских индукторов.

Особенно часто применяют петлевые индукторы для закалки внутренних поверхностей деталей сложной формы; ступенчатых или деталей с переменным диаметром (подробно см. § 9-4).

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

8-1. Неразъемные индукторы

Предприятия электротехнической промышленности выпускают серийно для поверхностной индукционной закалки установки мощностью 25 и 63 квт на 440 кгц и мощностью 100 квт — на 2500 и 8000 гц.

Как показывает опыт, используя эти установки, в подавляющем числе случаев можно получить требуемые качественные результаты термообработки, а также достичь необходимой производительности. Только в отдельных случаях для решения поставленных производственных задач требуются установки большей мощности.

Так как при поверхностной закалке удельные мощности обычно составляют 1,0 — 2,0 квт/см², то при использовании серийных установок поверхности площадью до 150—200 см² можно закаливать как одновременным, так и непрерывно-последовательным методом. Термообработку поверхностей большей площади осуществляют непрерывно-последовательным методом.

При одновременном методе термообработки технологические устройства получаются более простыми. Вспомогательные операции — установка и снятие деталей — осуществляются, как правило, быстрее. Автоматизация вспомогательных операций достигается более простыми и дешевыми средствами. Поэтому этот метод используется чаще, чем непрерывно-последовательный.

При нагреве поверхности площадью 100—120 см², например шейки вала диаметром 70 мм и шириной 50 мм, индуктирующий провод может иметь не более 5 витков, если он изготовлен из квадратной медной трубы 10 × 10 мм. При толщине стенки трубы 1 мм сечение для прохода охлаждающей воды составит 8 × 8 мм. Для изготовления индуктора с большим числом витков требуется трубка меньшего поперечного сечения. Через такие трубы затруднен проход воды, они часто засоряются. Таким образом, при термо-

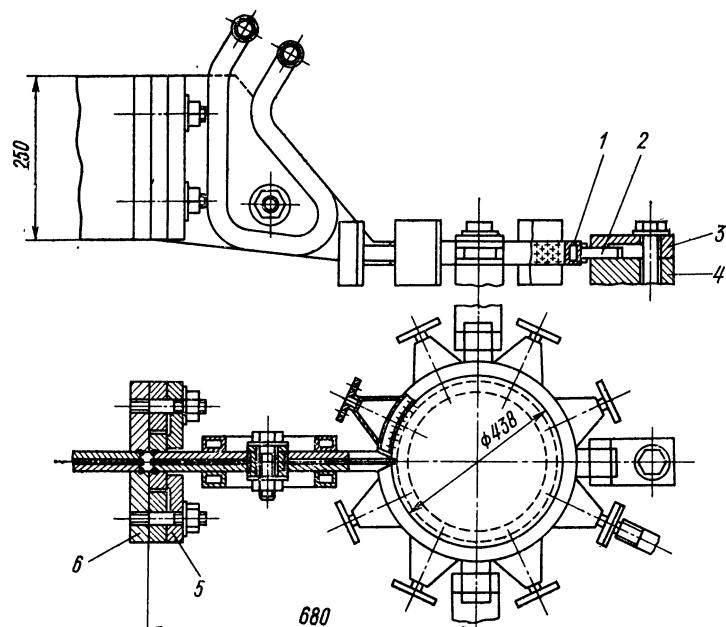


Рис. 8-1. Индуктор для термообработки зубчатого венца маховика автомобиля

обработке деталей на серийных установках для согласования индуктора с источником ТВЧ необходим понижающий трансформатор. Число витков индуктора в зависимости от размеров нагреваемой поверхности и напряжения вторичной обмотки понижающего трансформатора может изменяться от одного до нескольких.

Одновитковые индукторы имеют ряд преимуществ перед многовитковыми.

Одновитковый индуктор не нуждается в электрической изоляции витков. Стоимость изготовления одновиткового индуктора меньше. Подавать охлаждающую и закалочную жидкости в одновитковые индукторы гораздо проще, а также проще изготавливать полости для их прохода. В одновитковом индукторе электрический пробой между нагреваемой деталью и индуктором возможен, только

если она коснется индукирующего провода в месте подсоединения токоподводящих шин. В многовитковом индукторе пробой может произойти при прикосновении детали в любых двух точках разных витков. Поэтому одновитковые индукторы используются чаще многовитковых.

На рис. 8-1 приведен одновитковый индуктор, используемый для термообработки одновременным способом зубчатого венца маховика автомобиля. В этом индукторе закалочная жидкость подается на охлаждаемую поверхность сквозь отверстия в индукирующем проводе. Индукирующий провод 1 прямоугольного сечения изготовлен из медной шины толщиной 8 мм с приваренным к ней кожухом для закалочной жидкости, которая подается шлангами к восьми конусным насадкам, обеспечивающим равномерность подачи воды по всей окружности детали. Индукирующий провод опирается приваренными к нему планками 2 на изолированные опоры 4 и прижимается к ним планками 3. Эти опоры предохраняют индукирующий провод от деформации при случайных ударах за-каливающей детали.

К вторичной обмотке трансформатора 6 токоподводящие колодки прижимаются планками 5. Такой способ крепления позволяет быстро снимать индуктор при ремонте и обслуживании.

Если охлаждение деталей производится в специальном устройстве (рис. 8-2), которое расположено рядом с индукирующим проводом, можно упростить индуктор для одновременной закалки, а также сэкономить значительное количество меди. Закаливаемая деталь удерживается во время нагрева магнитным патроном или каким-либо иным зажимом. После окончания нагрева деталь сбрасывается в кольцо 1, через его отверстия все время подается вода.

В кольце 1 деталь удерживается задвижками 2. Такое устройство значительно увеличивает производительность, так как во время охлаждения одной детали, вторая может подвергаться нагреву. Необходимо только, чтобы к моменту окончания нагрева второй детали, первая деталь была выброшена из кольца 1 путем отодвигания задвижек 2, т. е. чтобы было освобождено место для второй детали.

В этом случае индукирующий провод изготавливается из тонкой листовой меди или трубок. Для охлаждения индукирующего провода через него пропускается вода, которая затем проходит по трубкам, охлаждающим контактные колодки и токоподводящие шины. К индуктору подводятся всего два шланга: один для подачи воды, другой для отвода ее.

Кольцо 1 для охлаждения детали может изготавляться из латуни или немагнитной стали. Для максимального сокращения промежутка времени между нагревом и охлаждающим кольцом следует располагать по возможности близко к индуктору. Изготавливать его следует незамкнутым, разрезным, чтобы под действием магнитного поля индуктора в нем не возник ток, который ослабляет поле индуктора, а также является источником потерь.

Если кольцо 1 удалено от индуктора на расстояние больше диаметра закаливаемой детали, его можно выполнить сплошным, без разреза. Большое расстояние между индуктором и охлаждающим

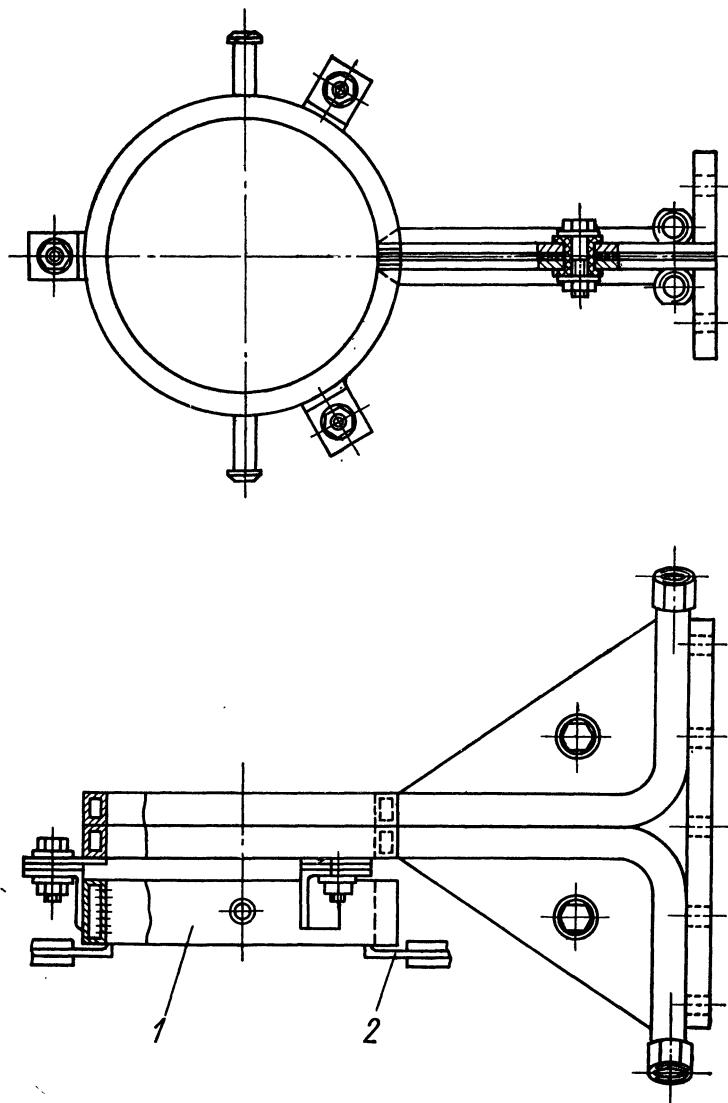


Рис. 8-2. Индуктор для одновременной закалки с отдельным устройством для охлаждения закаливаемой детали

кольцом может быть, если нагреваемая деталь достаточно массивна, так что за время перемещения из индуктора в охлаждающее кольцо она не успеет остывть ниже закалочной температуры. Многовитко-

вые индукторы при одновременном способе закалки иногда используются в том случае, когда на детали требуется нагревать несколько элементов, удаленных друг от друга на небольшое расстояние, например кулачки и шейки распределительных валов, шейки на цилиндрических деталях и т. д. В этом случае один или несколько витков индуктирующего провода покрывают каждую зону, подлежащую нагреву. Эти витки соединяются между собой параллельно или последовательно. При параллельном соединении, вообще говоря, трудно добиться идентичности режима нагрева элементов детали. Даже небольшое смещение нагреваемых элементов относительно витков индуктирующего провода, возможное вследствие

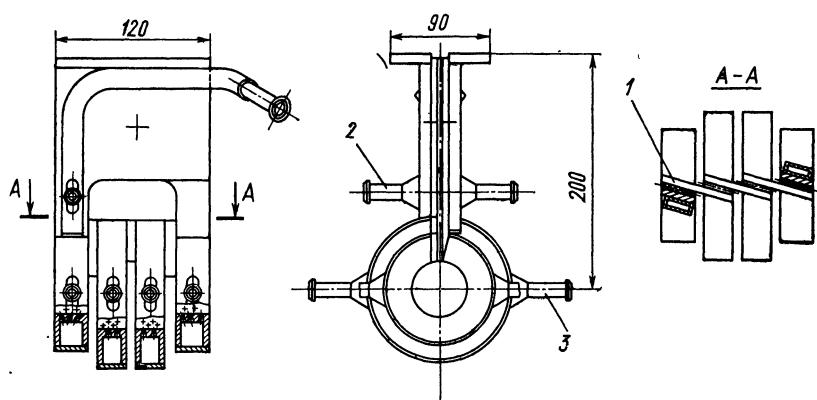


Рис. 8-3. Четырехвитковый индуктор для одновременной закалки элементов распределительного вала

неизбежных неточностей в изготовлении деталей, приводит к перераспределению тока в параллельных витках индуктирующего провода.

На рис. 8-3 приведен индуктор для одновременной термообработки четырех кулачков автомобильного распределительного вала. Диаметры средних витков несколько больше, чем крайних. Они подобраны опытным путем так, чтобы все нагреваемые элементы достигали закалочной температуры одновременно. При одинаковом диаметре всех витков напряженность поля индуктора в середине его больше, чем у краев, поэтому средние кулачки греются быстрее крайних. Планки 1 из меди последовательно соединяют между собой витки. Штуцеры 2 служат для подвода воды, охлаждающей токоподводящие шины, штуцеры 3 для подвода закалочной жидкости, охлаждающей закаливаемые кулачки.

Простейший индуктор для непрерывно-последовательной закалки (рис. 8-4) изготавливается из прямоугольной медной трубы, которая или приваривается к токоподводящим шинам 1 или прямо подсоединяется при помощи прижимных планок к вторичной

обмотке понижающего трансформатора. Оси отверстий для закалочной жидкости наклонены к оси отверстия в индукторе под углом $\alpha = 30 \div 45^\circ$.

С увеличением угла α струи закалочной жидкости падают ближе к индуктору, в связи с чем сокращается время перехода закаливаемой поверхности из зоны нагрева в зону охлаждения. При некотором угле α начинается интенсивный отсос тепла из зоны нагрева, снижающий к. п. д. устройства. При угле падения больше 45° наблюдается попадание в зону нагрева струй, отраженных от поверхности детали, вследствие чего появляются мягкие пятна на закаленной поверхности.

При уменьшении угла α время между концом нагрева и началом охлаждения возрастает, растут нерациональные потери тепла на теплопередачу и излучение. Угол α подбирается опытным путем таким образом, чтобы охлаждение началось сразу после того, как в нагреваемом слое произойдут превращения, необходимые для получения заданных результатов термообработки [11, 14].

Площадь поперечного сечения трубы, образующей индуктирующий провод, а следовательно, и трубок охлаждения токоподводящих шин, должна быть в два—четыре раза больше общей площади выходных отверстий для закалочной воды.

Рис. 8-4. Индуктор для непрерывно-последовательной закалки цилиндрической стали

Возможны два способа подачи закалочной жидкости в индуктор для последовательной закалки, показанный на рис. 8-4.

В первом случае вода по шлангам подается сразу в оба штуцера. Она проходит по трубкам, охлаждает токоподводящие шины и индуктирующий провод и далее поступает на закаливаемую поверхность. При этом в некоторой точке индуктирующего провода, находящейся около его середины, скорость охлаждающей жидкости почти равна нулю. Если индуктирующий провод изготовлен из тонкостенной трубы, возможно его перегорание. В производственной практике такие случаи часто встречаются.

Во втором случае охлаждающая вода подается в индуктор через кран по шлангу, проходит по трубкам, охлаждающим одну контактную колодку и одну токоподводящую шину, затем проходит через индуктирующий провод, откуда частично вытекает на закаливаемую поверхность. После этого оставшаяся вода идет по трубкам, охлаждающим вторую токоподводящую шину и контактную

колодку и через выпускной шланг, на конце которого устанавливается регулировочный кран, выбрасывается в сливной бак.

Краны на входе и выходе позволяют варьировать напор воды у входа в индуктор и в индуктирующем проводе и таким образом регулировать общее поступление воды в индуктор, а также и расход ее для охлаждения закаливаемой поверхности. В этом случае сечение трубы для подачи охлаждающей жидкости должно быть в два раза больше, чем в первом случае. Однако перегорание индуктирующего провода менее вероятно.

Иногда для повышения надежности охлаждения индуктирующего провода и остальных элементов индуктора предусматривается раздельная система подачи закалочной жидкости и охлаждающей воды (рис. 8-5). Охлаждающая вода подается из отдельной замкнутой системы, заполненной чистой дистиллированной водой. В этом случае закалочная жидкость может подаваться через некоторое время после начала нагрева, например в случае, когда закалка цилиндра начинается от торца буртика.

Если некоторые отверстия в индукторах для последовательной закалки засоряются, на поверхности закаливаемой детали образуются мягкие полосы. Очистка отверстий в конструкциях, изображенных на рис. 8-4 и 8-5, затруднена. Весьма трудоемка также операция сверления мелких отверстий. Для того чтобы угол падения струй был одинаковым, отверстия приходится сверлить в специальных приспособлениях. Если углы разные, из-за неравномерности охлаждения также возможно появление мягких полос. Поэтому иногда для непрерывно-последовательной закалки используют индуктор, показанный на рис. 8-6, в котором полость для подвода охлаждающей воды изготовлена в изолированной накладке 5 (из стеклотекстолита, эбонита). Вода для постоянного охлаждения подается в полость 3; закалочная жидкость через полость 2 и щель 1 попадает на закаливаемую поверхность. Размер щели может быть подобран путем смены прокладок 4. В случае засорения полости и щели накладка 5 отвертывается и проводится необходимая прочистка. Так как детали, образующие щель для прохода закалочной жидкости, обрабатываются на токарном станке, угол падения жидкости по всей окружности индуктора оказывается одинаковым с высокой степенью точности.

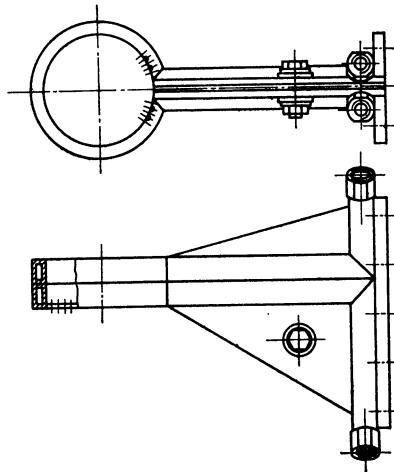


Рис. 8-5. Индуктор для непрерывно последовательной закалки цилиндрической детали с раздельной подачей закалочной жидкости и охлаждающей воды

Если ось закаливаемой детали в процессе закалки расположена горизонтально, то даже и при малом угле падения струи воды, отразившись от охлаждаемой поверхности, из-за различных завихрений иногда попадают на поверхность в зоне нагрева. Для борьбы с этим явлением индуктор снабжают устройством для воздушного дутья. Трубка для подачи воздуха устанавливается рядом с индуктирующим проводом, концентрично ему. Эта трубка не должна

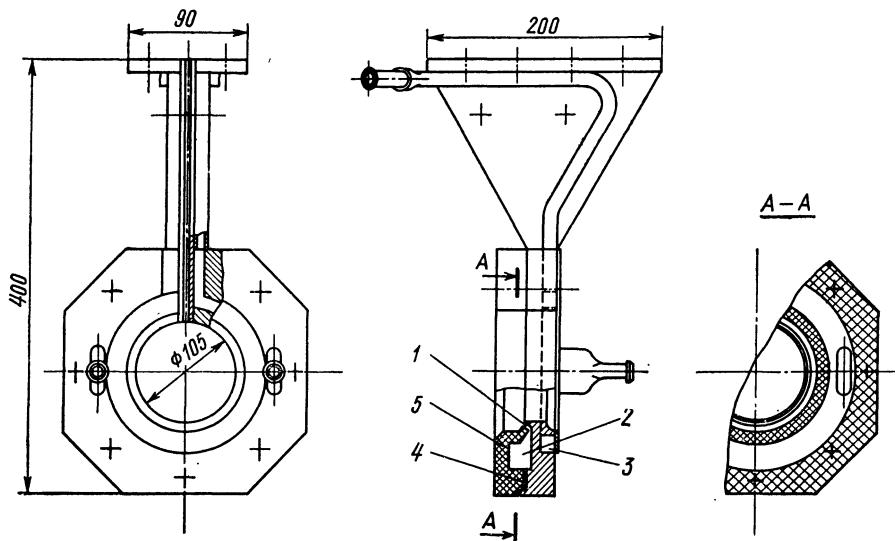


Рис. 8-6. Индуктор для непрерывно-последовательной закалки с щелевым спреем для подачи охлаждающей жидкости

быть замкнутой. Струи воздуха направляются в зазор между закаливаемой поверхностью и индуктирующим проводом и не позволяют отраженным струям охлаждающей жидкости попадать в этот зазор.

8-2. Разъемные индукторы

При нагреве узких зон на длинных трубах или прутках, при нагреве труб под сварку, а также шеек коленчатых валов под закалку неразъемные индукторы не могут быть использованы. Приходится использовать, несмотря на их существенные недостатки, индукторы с разъемным индуктирующим проводом. Подгорание контактов, необходимость их частой зачистки, а также смены контактных пластин удорожает эксплуатацию разъемных индукторов. Конструкция индуктора получается более сложной, дорогостоящей.

В связи с неизбежными нарушениями контакта повышается процент брака при термообработке. При конструировании разъем-

ных индукторов необходимо обращать особое внимание на жесткость всех деталей, обеспечивающих надежность контакта. В промышленности используются три основных типа разъемных индукторов.

А. Разъемный индуктор с болтовым соединением в разъемном контакте (рис. 8-7). Разборка таких индукторов производится редко, только в аварийных случаях, когда необходимо сменить индуктор. Эти индукторы используются на непрерывных турбоэлектросварочных станах. Чтобы снять неразъемный индуктор, приходится разрезать трубную заготовку. Это приводит к излишним простоям станов, что при высокой их производительности и стоимости приносит большие убытки.

По этой же причине должно быть обращено особое внимание на надежность и прочность индукторов, так как во время работы стана на индуктор попадают брызги расплавленного металла, за него задевает грат, остающийся при стыковой сварке кусков штрипса. Для надежного контакта болты должны быть диаметром больше 16 мм, под головки и гайки необходимо помещать достаточно толстые прокладки (1) из бронзы или немагнитной стали, чтобы давление болтов передавалось равномерно на всю контактную поверхность. Если ширина индуктора больше 50 мм, следует ставить с каждой стороны по 2 болта и более.

Б. Индукторы, предназначенные для многократного разъема и соединения в течение рабочей смены с ручным подключением отъемной части (рис. 8-8). Барашки, ввинченные в откидные струбцины, зажимаются вручную. Плоскости контакта отнесены от внутренней поверхности индукирующего провода и находятся на оси барашков. При таком расположении контактных плоскостей они надежно прижимаются друг к другу. Кроме того, ток в индукторе, протекающий по его внутренней поверхности, прежде чем перейти с одной части индуктора на другую, удаляется от этой поверхности, а затем, пройдя через контакт, снова возвращается к ней. Поэтому, если вследствие деформации контактных плоскостей или подгорания их будет некоторая неравномерность контакта по ширине индуктора, то ток на пути от контакта к внутренней поверх-

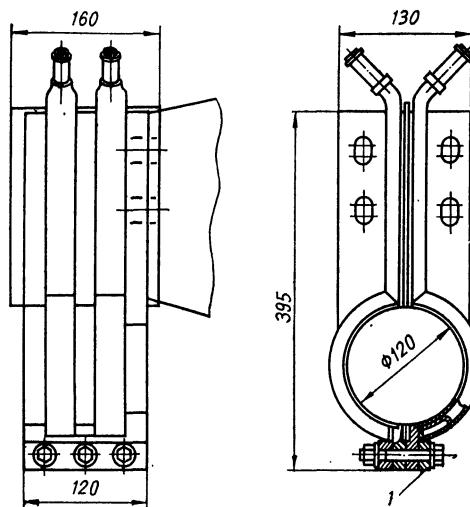


Рис. 8-7. Разъемный индуктор для нагрева труб под сварку

ности растечется по всей ширине индуктора. Для того чтобы ток не мог протекать по барашкам и струбцинам, оси последних пропускают сквозь изоляционные втулки. От индуктора струбцины отделены изоляционными стеклотекстолитовыми шайбами.

В. Разъемные индукторы в автоматических закалочных устройствах замыкаются обычно пневматическими или гидравлическими.

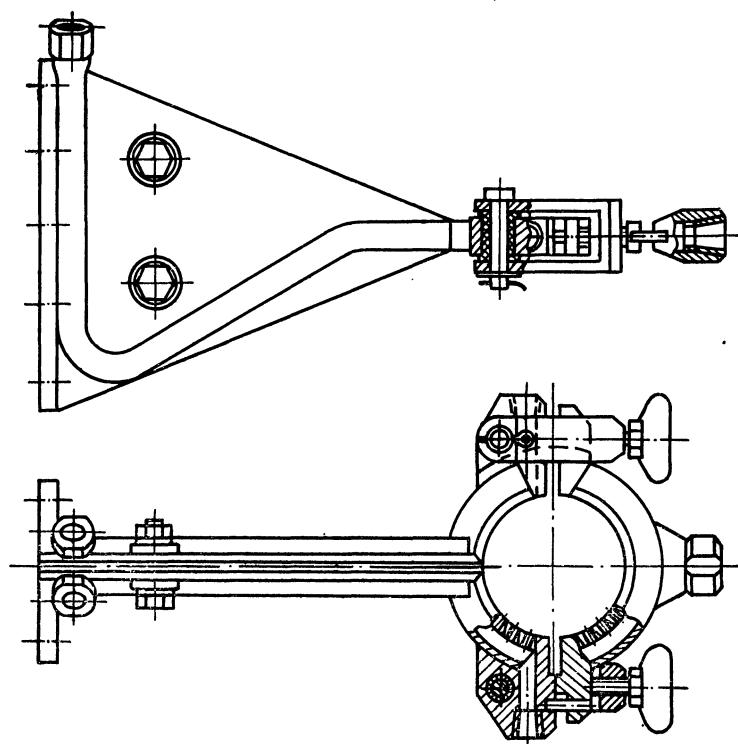


Рис. 8-8. Разъемный индуктор для нагрева узких канавок

цилиндрами (рис. 8-9). Нижний полуиндуктор 1, замыкающий цепь для тока, опирается на стальную колодку 2, которая укреплена на гидравлическом цилиндре 6. Пружина 7 стремится опустить цилиндр 6 вместе с нижним полуиндуктором 1 и разомкнуть таким образом цепь тока. В поднятом положении цилиндр 6 удерживается маслом, которое под давлением 20—25 атм подается в цилиндр 6 через сверление в штоке 8. Размыкание индуктора осуществляется выпуском масла из цилиндра 6. Вертикальный ход нижнего полуиндуктора 5—6 мм. При установке вала в станок верхние доли индукторов 3 откидываются, так как они вместе с питающими их трансформаторами закреплены на подъемной головке станка.

Ввиду того что в процессе нагрева индуктор не охлаждается, все части его изготавливаются массивными, из поковок. Полости для подачи закалочной воды получаются фрезерованием; окна, оставшиеся после фрезерования, закрываются медными заглушками, привариваемыми латунью. Ток к верхним долям индуктора 3 подводится по шинам 4. Путь минимального сопротивления, по которому идет ток при отсутствии магнитопроводов 5, показан на рис. 8-9 штриховой линией. Таким образом верхняя часть шейки вала может остаться недогретой. П-образные магнитопроводы 5 вытесняют ток и заставляют его строго следовать контуру внутренней поверхности долей индуктора 3 и 1.

8-3. Индукторы для нагрева плоских поверхностей

Для нагрева плоскостей применяют индукторы с индуктирующими проводами в виде петель и прямолинейных трубок. Как показано в гл. 7, индуктор для нагрева плоскости может иметь удовлетворительный электрический к. п. д. только тогда, когда он снабжен магнитопроводом.

При нагреве плоскости для закалки одновременным способом индуктирующий провод должен покрывать всю закаливаемую поверхность. Применение петлевого индуктора с магнитопроводом целесообразно, если закалке подлежат две параллельные полосы, удаленные друг от друга на некоторое расстояние. Над каждой из этих полос располагается одна из ветвей, образующих петлю индуктирующего провода.

Для последовательной закалки плоскостей петлевые индукторы получаются более сложными, чем индукторы с прямолинейным индуктирующим проводом. Термический к. п. д. петлевых индукторов несколько ниже, так как вследствие двухкратного нагрева каждого элемента закаливаемой поверхности при прохождении его под одной, а затем под второй частью петли возрастают потери тепла.

Наибольшее распространение при закалке плоскостей вследствие простоты конструкции и более высокого к.п. д., получили индукторы с прямолинейным индуктирующим проводом.

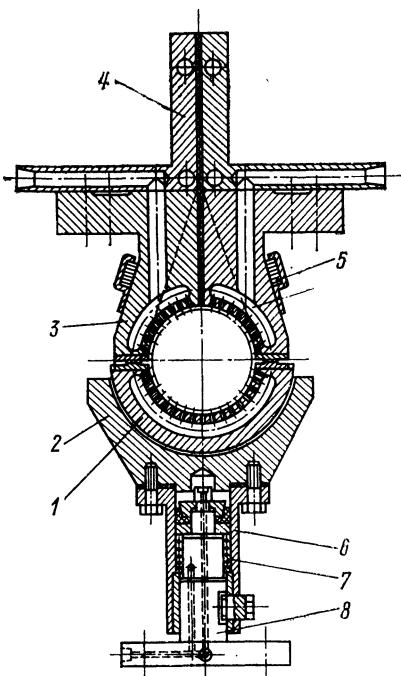


Рис. 8-9. Разъемный индуктор автоматического станка для закалки коленчатых валов

На рис. 8-10 показана конструкция индуктора для последовательной закалки плоскости шириной 160 мм. Индуктирующий провод состоит из двух прямоугольных трубок, длина которых несколько больше ширины закаливаемой плоскости. По трубке 4 непрерывно течет вода, охлаждающая индуктирующий провод; трубка 5 снабжена отверстиями и служит для подачи воды на закаливаемую поверхность. Токоподводящие шины 2 проходят над индуктирующим проводом и соединяются с ним посредством прива-

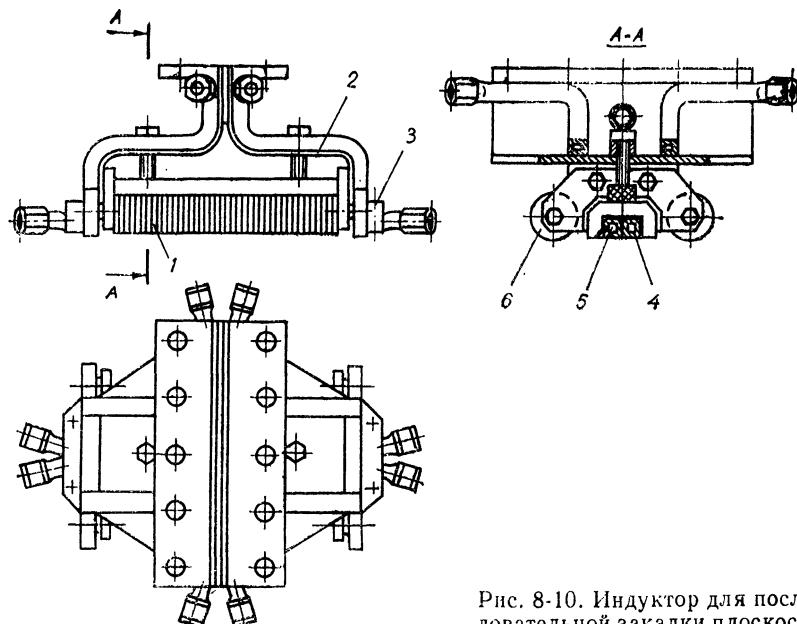


Рис. 8-10. Индуктор для последовательной закалки плоскости

ренных к нему колодок 3. Колодки присоединяются к токоведущим шинам пайкой или болтами. Крепление болтами имеет то преимущество, что позволяет легко заменить индуктирующий провод в случае его перегорания. Так как индуктирующий провод является наиболее нагруженной частью индуктора, случаи выхода его из строя весьма вероятны.

Магнитопровод 1 набирается из пластин трансформаторной стали толщиной 0,1—0,35 мм. Длина магнитопровода должна быть равна ширине нагреваемой поверхности, т. е. в данном случае 160 мм. На пластинах в том месте, где подается закалочная вода, снимаются скосы для свободного прохода струи воды на охлаждаемую поверхность, как показано в разрезе на рис. 8-10.

От индуктирующего провода магнитопровод изолируется мica-нитовыми прокладками толщиной 1,0—1,5 мм. В случае продолжительной и непрерывной работы индуктора, например при за-

калке длинных плоскостей, сталь магнитопровода из-за излучения с нагреваемой поверхности, а также отчасти из-за вихревых токов сильно нагревается и может перегореть. Для охлаждения стали в магнитопроводе делают вырез в виде ласточкина хвоста, в который плотно пригоняют охлаждающую трубку. Иногда, например при закалке вертикальных плоскостей, магнитопровод для охлаждения поливают водой. В этом случае вода, стекая с магнитопровода, не попадает на закаливаемую поверхность.

Из-за больших динамических усилий, притягивающих индуктор к закаливаемой поверхности, а также из-за возможных неровностей последней и неточности механизма станка зазор между индуктирующим проводом и изделием может изменяться. Чтобы он оставался постоянным, индукторы для закалки поверхностей большого размера снабжают роликами 6, как показано на рис. 8-10. Ролики крепятся на изоляционных пластинах из текстолита или асбоземента, чтобы через них и через закаливаемую поверхность не мог ответвляться ток.

При закалке горизонтально расположенных поверхностей для предупреждения попадания отраженных струй воды в зону нагрева параллельно с индуктирующим проводом на некотором расстоянии от магнитопровода устанавливается трубка воздушного дутья. Чтобы индуктор мог свободно опираться роликами на закаливаемую поверхность, он соединяется с понижающим трансформатором гибкими шинами. Гибкие шины представляют собой плоский набор круглых многожильных медных проводников диаметром 6—8 мм длиной 100—200 мм. Концы этих проводников припаиваются к медным контактным колодкам, одна из которых присоединяется к индуктору, вторая — к вторичной обмотке трансформатора. Для охлаждения эти проводники или заключаются в резиновые шланги, или просто поливаются водой. Вода должна отводиться в сторону, чтобы она не попала на нагреваемую поверхность. Иногда, чтобы избежать гибких шин, в которых теряется значительная доля мощности, индуктор прямо подсоединяют к трансформатору. При этом трансформатор не имеет отдельного крепления к конструкции. Он как бы едет по закаливаемой поверхности на индукторе.

Иногда необходимо закалить сразу несколько параллельных полос на одной плоскости или несколько плоскостей различной ширины. В этом случае общий индуктирующий провод снабжается несколькими магнитопроводами, которые устанавливаются только над закаливаемыми поверхностями. В качестве примера на рис. 8-11 показан индуктирующий провод индуктора для последовательной закалки направляющих станин металлорежущих станков. Он изготовлен из квадратной медной трубы 1, на концах которой приварены штуцеры 4 подачи и отвода охлаждающей воды. Колодки 3 служат для присоединения к токоподводящим шинам 5, идущим от понижающего трансформатора. Таким образом, индуктирующий провод легко сменить при переходе к закалке направляющих другой формы. Магнитопроводы — пакеты из трансформаторной

стали — плотно набираются между медными пластинками 2, приваренными к индуктирующему проводу. Эти пластины служат для отвода тепла, выделяющегося в магнитопроводе. Концы пластинок отогнуты и таким образом не дают П-образным пластинам магнитопровода отходить от трубы 1. Магнитопроводы располагаются только над теми участками направляющих, которые должны закаливаться.

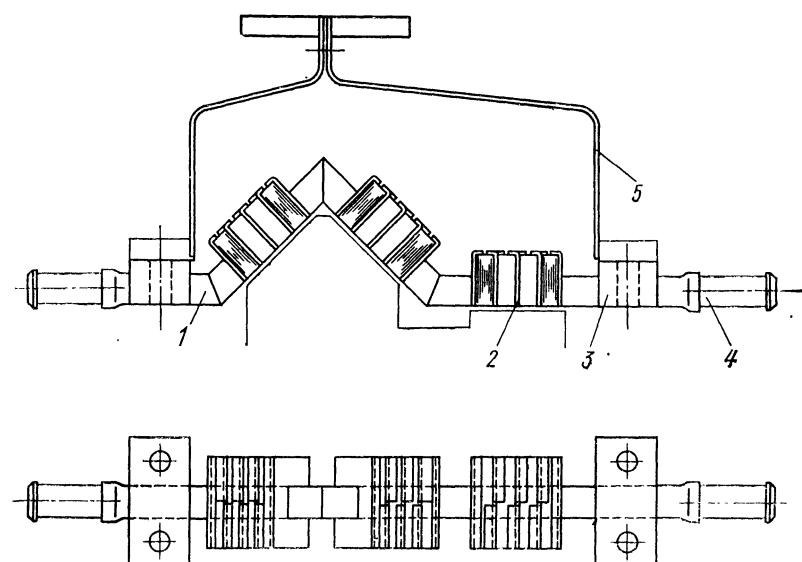


Рис. 8-11. Индуктирующий провод индуктора для последовательной закалки станин металлорежущих станков

Спираль для подачи охлаждающей жидкости на рис. 8-11 не показан. Он изготавливается из медной трубы такой же формы, прямоугольного сечения и закрепляется рядом с индуктирующим проводом параллельно ему.

8-4. Индукторы для нагрева внутренних цилиндрических поверхностей

Нагрев внутренним индуктором приходится осуществлять главным образом при поверхностной закалке и при сварке. При необходимости сквозного нагрева всегда можно использовать внешний индуктор, имеющий более высокий к. п. д. (см. гл. 1). Иногда внутренние индукторы приходится применять при нагреве под пайку, если припаиваемые детали охватывают друг друга, например при пайке двух концентрических труб. При нагреве внешняя труба из-за расширения отходит от внутренней, и нагрев последней за счет теп-

лопроводности затрудняется. Во всех этих процессах: поверхностной закалке, сварке, пайке — к. п. д., вообще говоря, имеет второстепенное значение, так как технико-экономический эффект, полученный за счет технологических преимуществ индукционного нагрева, обычно во много раз перекрывает затраты, связанные с повышенной стоимостью токов средней и высокой частоты.

Как пояснено в гл. 7, при нагреве внутренним индуктором к. п. д. сильно зависит от зазора между нагреваемой поверхностью и индукирующим проводом и от размеров последнего, так как ток стягивается на внутреннюю поверхность его. Для повышения к. п. д. приходится применять магнитопроводы из трансформаторной стали или ферритов. Это обстоятельство затрудняет изготовление индукторов для закалки малых отверстий (50 мм и меньше). Для их нагрева приходится использовать петлевые или стержневые индукторы.

При поверхностной закалке отверстий также используются два метода: одновременный и непрерывно-последовательный. Для одновременной закалки отверстий диаметром 75 мм и более при общей площади закаливаемой поверхности не более 100 см² и при использовании серийных установок мощностью 100 квт применяются индукторы без постоянного охлаждения индукирующего провода. Индукирующий провод 1 (рис. 8-12) изготавливается из массивной медной шины толщиной 8—10 мм с таким расчетом, чтобы масса металла была достаточной для поглощения тепла, выделяющегося в процессе нагрева. При этом температура индукирующего провода не достигает величины, опасной для расплавления припоя, соединяющего отдельные части индуктора.

В шине, образующей индукирующий провод, сверлятся отверстия для прохода закалочной воды. С внутренней стороны к шине приваривается коробчатый кожух, в полость которого подается закалочная вода.

Магнитопровод 2 собран из П-образных пластин трансформаторной стали толщиной 0,2 мм. Пластины фосфатируются для получения тонкого непроводящего слоя, изолирующего их друг от друга. Фосфатированный слой сохраняет свои изолирующие свойства при нагревании до 400° С. Если в процессе закалки магнитопровод не нагревается выше 100—150° С, изоляцию пластин можно осуществлять кремнеорганическим лаком.

Токоподводящие шины 3 постоянно охлаждаются припаянными к ним трубками 5. Закалочная вода подается по трубкам 4, припаянным к индукирующему витку. В некоторых конструкциях не делают отдельных трубок для подвода закалочной воды в индукирующий провод. Подача воды осуществляется через трубы, служащие для охлаждения щек. Концы трубок выводятся в полость между кожухом и шиной индукирующего провода. Толщина токопроводящих шин в этом случае должна быть несколько большей, так как они охлаждаются только в периоды подачи закалочной воды.

Токоподводящие шины подходят к индуктирующему витку с внутренней стороны его. Такая конструкция обеспечивает равномерное прохождение тока по всей ширине индуктирующего провода.

В месте присоединения токоподводящих шин к индуктирующему проводу магнитопровод не может быть установлен из-за отсутствия места. Поэтому нагрев здесь ослаблен.

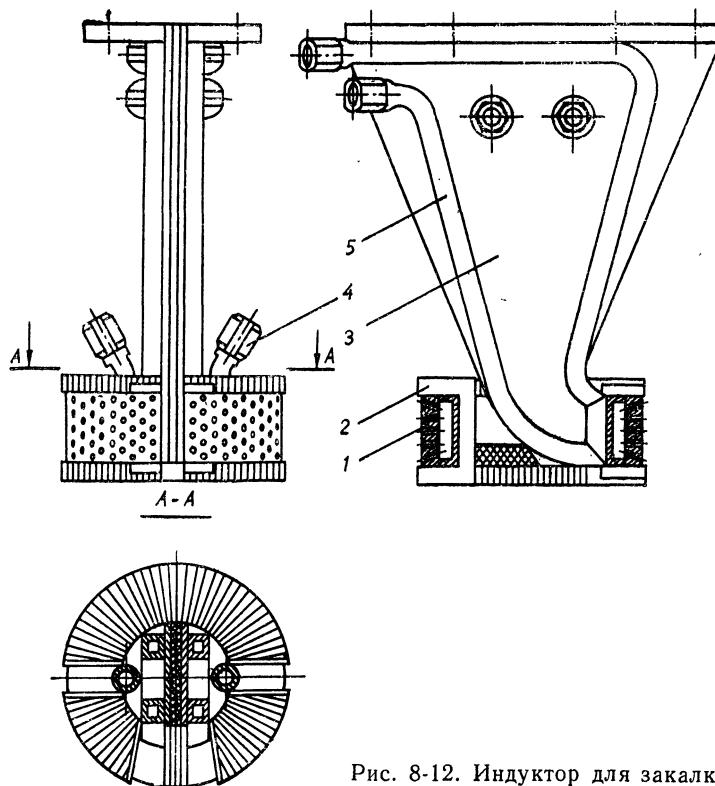


Рис. 8-12. Индуктор для закалки отверстий одновременным методом

При вращении нагреваемой детали отсутствие магнитопровода на значительной части индуктирующего провода, а также боковой подвод токоподводящих шин (рис. 8-13) не влияют существенным образом на равномерность нагрева. Однако и в этом случае следует стремиться, чтобы магнитопровод охватывал, возможно большую часть индуктирующего витка и подвод токоведущих шин осуществлялся изнутри, так как оба мероприятия повышают электрический к. п. д. индуктора, а также уменьшают потери тепла, уходящего вглубь нагреваемой детали вследствие теплопроводности.

Так как в индукторах для закалки небольших диаметров всегда затруднена сборка пластин магнитопровода, им придают Г-образ-

ную форму. Установка таких пластин осуществляется вдоль оси индуктора поочередно с каждой стороны индукирующего витка. В результате магнитопровод получит форму, показанную на рис. 8-12.

При закалке глубоких отверстий, если закаливаемую поверхность необходимо максимально приблизить ко дну, пластинам магнитопровода 2 (рис. 8-14) придается также Г-образная форма. В этом случае продолжением магнитопровода служит дно закаливаемого отверстия. Пластины магнитопровода удерживаются на месте при помощи планок 3 из текстолита или шиферасбеста, которые соединены между собой (и прижаты к токоподводящим шинам) латунными болтами.

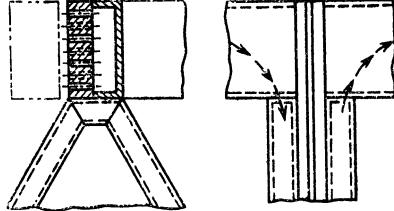


Рис. 8-13. Нерациональный способ присоединения токопроводящих шин к индуцирующему проводу индуктора для закалки отверстий

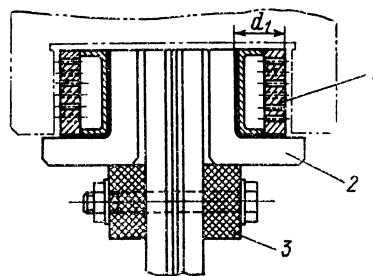


Рис. 8-14. Индуктирующий провод и магнитопровод индуктора для закалки глухих отверстий

Недостатком индукторов, не имеющих постоянного охлаждения индуцирующего провода, является большая радиальная высота d_1 . Величина d_1 складывается из толщины шины 1 (рис. 8-14) и размера окна в кожухе, который определяется в зависимости от суммарной площади отверстий для выхода воды вшине 1. Чем больше размер d_1 , тем меньше электрический к. п. д. индуктора.

Кроме того, увеличение размера d_1 уменьшает нижний предел диаметров отверстий, которые могут закаливаться индукторами рассматриваемой конструкции. С этой точки зрения более рационально производить охлаждение закаливаемой поверхности с помощью отдельного душевого устройства, которое располагается рядом с индуктирующим проводом. Тогда последний можно изготавливать из тонкостенной медной трубки с минимальным сечением, достаточным для прохода охлаждающей его воды (рис. 8-2). Индукторы для последовательной закалки цилиндрических отверстий диаметром меньше 50 мм могут изготавливаться одновитковыми или многовитковыми. Обычно в индукторах для закалки гильз тракторов и грязевых насосов, диаметр которых лежит в пределах от 45 до 150 мм, используется одновитковый индуктирующий провод как более простой для изготовления.

Индуктор для закалки гильз трактора с отверстием диаметром 100 мм приведен на рис. 8-15. Для уменьшения потерь в токоподводящих шинах они изготовлены в виде концентрического фидера. Наружная шина изготавливается из двух труб с небольшой разницей в диаметрах. С одного конца эти трубы припаяны к фланцу 5, а с другого к заглушке 2. Таким образом, между ними образуется полость для подачи воды в один конец индуктирующего провода 12, который присоединен к ним перемычкой 9. Внутренняя шина образована трубой 4. С одного конца к ней припаян фланец 7, а с дру-

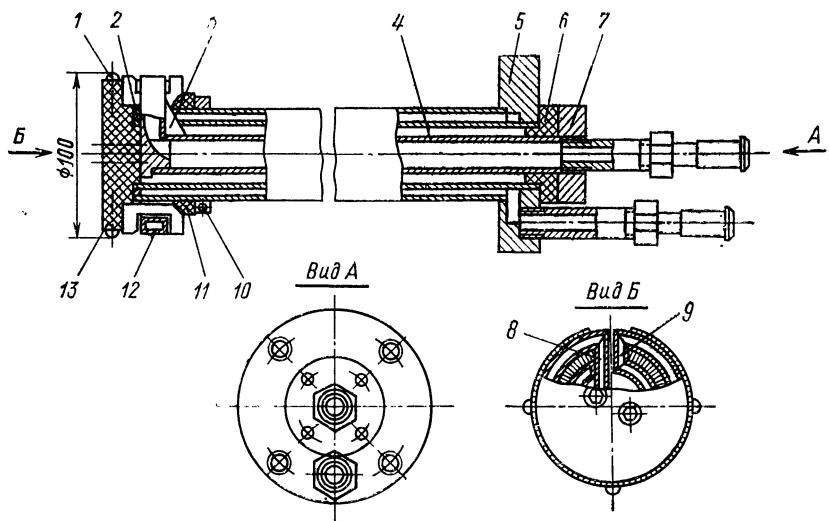


Рис. 8-15. Индуктор для закалки длинных цилиндрических отверстий диаметром более 75 мм

гого заглушка; к последней перемычке 8 присоединен второй конец индуктирующего провода. Чтобы уменьшить потери в перемычках 8, 9, соединяющих шины с индуктирующим проводом, к перемычкам припаяны треугольные косынки 3, расширяющие путь для тока. Втулка 6 служит для изоляции наружной шины от внутренней. Пластины магнитопровода удерживаются между текстолитовым диском 13 и кольцом 11; последнее крепится разрезным стяжным хомутом 10. Латунные или из жароупорной стали штифты 1 в диске 13 предохраняют индуктирующий провод от случайных прикосновений к нагреваемой поверхности. В этом индукторе вода, охлаждающая токоведущие шины, поступает затем сквозь отверстия в индуктирующем проводе на закаливаемую поверхность.

При изготовлении индукторов описываемого типа необходимо максимально увеличивать диаметры труб, образующих токоведущие шины (в пределах, допускаемых конструктивными соображениями). При этом очевидно, что ширина пути для тока сравнительно

с плоскими подводящими шинами (рис. 8-12) будет больше в $\pi/2$ раз. Соответственно меньше будут потери на нагрев шин. Меньше будет также падение напряжения на шинах, так как концентрический провод имеет сравнительно с другими конструкциями минимальное индуктивное сопротивление.

Если индуктор предназначен для нагрева отверстий небольшой длины, его токоподводящие шины могут быть плоскими, аналогично подводящим шинам индуктора на рис. 8-12.

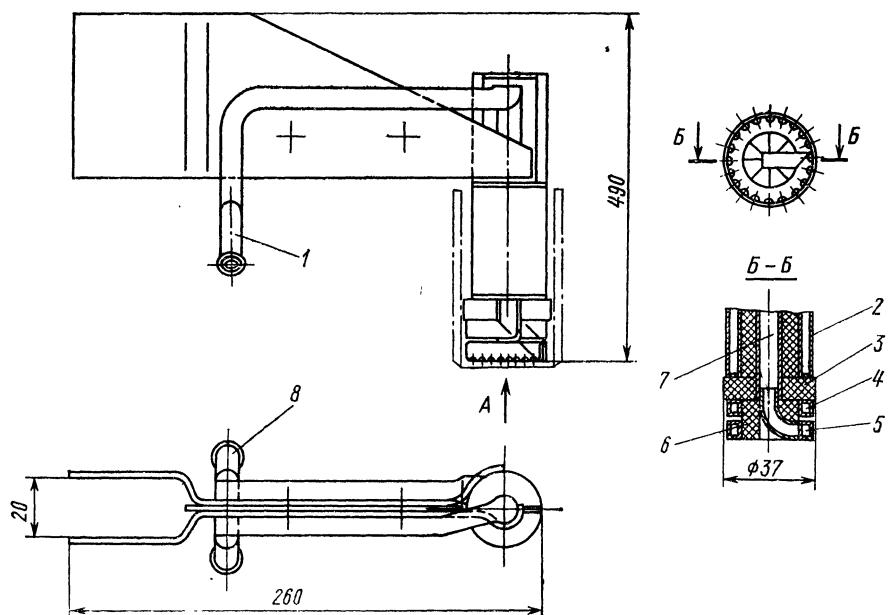


Рис. 8-16. Индуктор для закалки длинных цилиндрических отверстий диаметром от 30 до 75 мм

При термообработке внутренних цилиндрических поверхностей малого диаметра (меньше 50 мм) и большой длины одновитковые индукторы применять нерационально: активное сопротивление длинных токоподводящих шин становится соизмеримым с эквивалентным активным сопротивлением индуцирующего провода. В таких случаях стремятся использовать двух- или трехвитковые индукторы (рис. 8-16). Здесь индуцирующий провод 4 имеет два витка. Магнитопровод 6 из феррита (индуктор предназначен для нагрева током 440 кГц) служит для вытеснения тока к нагреваемой поверхности. Охлаждающая жидкость подается через штуцер 1 по внешнему токоподводу 2, состоящему из двух концентрических медных труб, и через штуцер 8 по внутреннему токопроводу 7, затем она выходит через отверстия 5 на закаливаемую поверхность. Сечение индуцирующего провода должно быть достаточно велико,

чтобы пропустить необходимое для охлаждения закаливаемой поверхности количество жидкости. Диаметр стеклотекстолитового кольца 3 должен быть несколько больше диаметра индуктирующего провода, чтобы последний не мог прикоснуться к закаливаемой детали. Так как в местах присоединения токопроводов к индуктирующему проводу ток в индукторе удаляется от нагреваемой поверхности, нагрев здесь ослаблен и для выравнивания его деталь должна вращаться.

8-5. Петлевые и стержневые индукторы

Для отверстий диаметром 50 мм и меньше надежную конструкцию кольцевого индуктора для нагрева на средних частотах создать не удается. Ферритовые магнитопроводы в данном случае оказы-

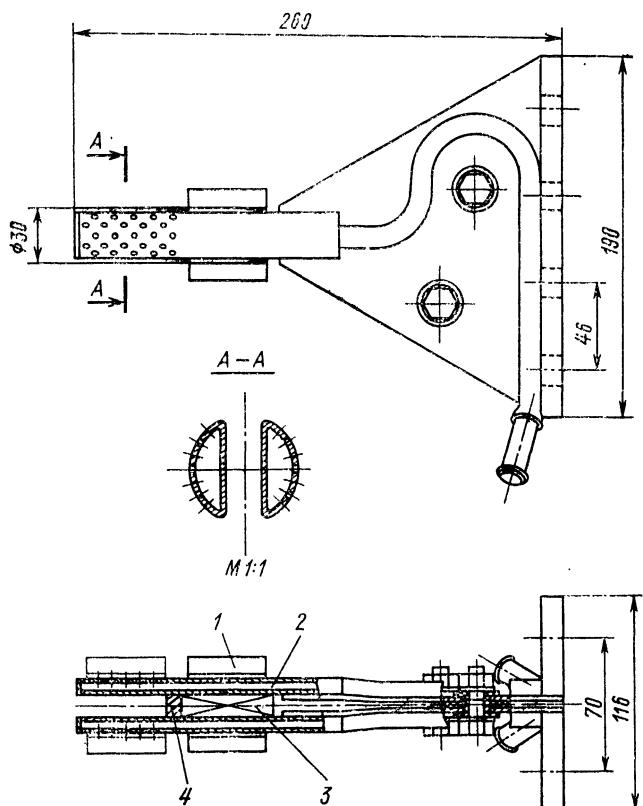


Рис. 8-17. Петлевой индуктор для одновременной закалки отверстия диаметром 25—30 мм током средней частоты

ваются малоэффективными. Внутри отверстия малого диаметра индуктирующий провод достаточного сечения, а также магнитопровод из трансформаторной стали не помещаются. В этом случае

приходится использовать стержневые или петлевые индукторы. При нагреве током высокой частоты (440 кГц и выше) нижний предел диаметра, для которого может быть изготовлен колышевой индуктор $D_2 = 35$ мм. Индукирующий провод петлевого индуктора (рис. 8-17) должен иметь такую форму, чтобы ток протекал возможно ближе к нагреваемой поверхности. Он вводится в нагреваемую деталь 1, так что отверстия для выхода воды находятся в стороне от поверхности, подлежащей закалке. Ток проходит вдоль оси отверстия по одной из труб 2 и по перемычке 4 переходит во вторую трубку. Вода подается сразу в обе трубы и вытекает через отверстия на их конце. После окончания нагрева деталь сдвигается вдоль оси

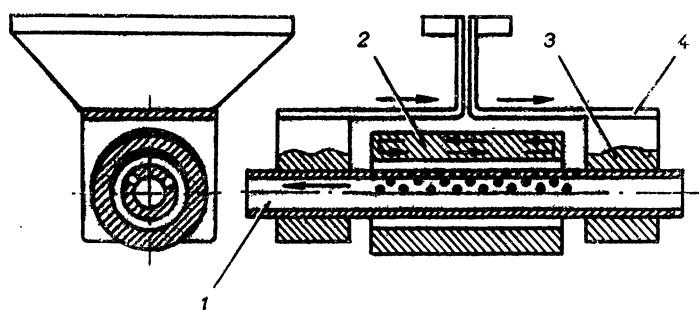


Рис. 8-18. Стержневой индуктор для одновременной закалки отверстий диаметром меньше 30 мм

так, что отверстия, через которые выходит вода, оказываются против закаливаемой поверхности. Магнитопровод 3 из пластин трансформаторной стали (или из феррита для тока высокой частоты) вытесняет ток к нагреваемой поверхности. Если в процессе нагрева деталь не вращается, то на поверхности отверстия нагреваются только две полосы, находящиеся против трубок (рис. 8-17). Для закалки всей поверхности деталь необходимо во время нагрева и охлаждения вращать со скоростью 150—200 об/мин.

Детали с отверстиями $D_2 < 30$ мм можно нагревать стержневыми индукторами (рис. 8-18). Индуктор разъемный. Стержень 1 вводится в нагреваемую деталь 2 и присоединяется к токоподводящим шинам 4 колодками 3. Таким образом, нагревается не только внутренняя поверхность детали, но и внешняя, как это схематически показано на рис. 8-18. Стрелки указывают направление индуцированного тока. Зачернены поверхности, подвергающиеся нагреву, когда деталь не вращается.

Наружная поверхность детали нагревается менее интенсивно, так как вследствие большого зазора между ней и токоподводящими шинами, а также большой ширины последних индуцированный ток по наружной поверхности растекается на большую ширину. Таким образом при нагреве стержневым индуктором можно зака-

лить частично внутреннюю, частично наружную поверхности детали.

Полная закалка всей поверхности отверстия осуществляется только при вращении детали. Если закалка наружной поверхности не требуется, то в случае толстых стенок охлаждать ее после нагрева не нужно. Однако при этом подача воды на внутреннюю закаливаемую поверхность должна производиться достаточно долго, чтобы не произошло отпуска закаленного слоя за счет тепла, накопленного в детали у наружной поверхности.

Детали с тонкими стенками даже при отсутствии охлаждения могут прокаливаться насквозь. Поэтому, если сквозная закалка нежелательна, наружную поверхность необходимо охлаждать в процессе нагрева.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ВЫБОР ЧАСТОТЫ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ И ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ТЕЛ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

9-1. Выбор частоты при закалке предметов цилиндрической и плоской формы

Технико-экономические показатели установок для индукционной поверхностной закалки в значительной мере определяются выбором частоты. От выбора частоты зависят и механические свойства закаленного слоя, а также прочность закаленной детали в целом, в первую очередь ее усталостная прочность.

Выбор частоты определяется следующими основными факторами: глубиной закаленного слоя, удельными потерями в индукторе, электрическим к. п. д. индуктора, полным к. п. д. установки и затратами электроэнергии из сети 50 Гц.

Глубина закаленного слоя. Глубина закаленного слоя выбирается на основании технологических требований. При этом необходимо учитывать износ детали во время работы и удельные нагрузки, которым она подвергается, а также распределение остаточных напряжений, определяющее усталостную прочность. Проведенные исследования показывают, что цилиндрические образцы малых и средних размеров обнаруживают наибольшую прочность, если глубина закаленного слоя удовлетворяет соотношению [11]:

$$\frac{x_k}{D_2} = 0,05 - 0,1,$$

где x_k — как и прежде, глубина слоя, содержащего более 50% марганца; D_2 — диаметр образца.

У крупных деталей это соотношение может быть меньше. Далее будем считать глубину закаленного слоя заданной.

Выше указывалось (§ 1-6), что реализовать большую производительность при малом перепаде температуры в нагретом слое

можно путем применения глубинного типа нагрева. При этом будет получен и наиболее высокий термический к. п. д. Для получения глубинного типа нагрева необходимо соблюдать условие:

$$\Delta_\kappa > x_\kappa, \quad (9-1)$$

где Δ_κ — горячая глубина проникновения тока; x_κ — глубина закаленного слоя.

Уменьшение толщины переходной зоны, являющейся следствием быстрого падения температуры за пределами нагретого слоя, приводит к повышению усталостной прочности. Изучение остаточных напряжений после поверхностной закалки приводит к заключению, что глубина слоя, определенного по макроструктуре, должна пре-восходить глубину слоя, содержащего более 50% мартенсита, при-мерно в 1,25—1,5 раза [11].

Неравенство (9-1), определяющее верхний предел частоты, мо-жет быть переписано в более удобном виде:

$$f < 0,25/x_\kappa^2. \quad (9-2)$$

Удельные потери в индукторе. С уменьшением глубины зака-ленного слоя при неизменной частоте увеличивается необходимая удельная мощность при одновременном уменьшении времени на-грева. Приблизительно в таком же соотношении будут возрастать и удельные потери в индукторе

$$\Delta p_i = p_0 \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) \frac{S}{S_i},$$

где Δp_i — удельные потери в индукторе, p_0 — удельная мощность, передаваемая в деталь; η_i — электрический к. п. д. индуктора, равный обычно 75—85%; S_i — активная поверхность индуцирую-щего провода; S — нагреваемая поверхность.

Так как $S_i \approx S$, то:

$$\Delta p_i \approx p_0 \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right).$$

Опыт показывает, что в производственных условиях недопу-стимо применять режимы работы, при которых $\Delta p_i > 0,4 \text{ квт}/\text{см}^2$, так как при этом индуктор часто перегорает вследствие нестабиль-ности охлаждения. Это условие позволяет связать минимальную допустимую глубину закаленного слоя с частотой:

$$x_{\kappa \min} \approx 0,25 \Delta_\kappa \approx 0,12 / \sqrt{f}, \text{ м}, \quad (9-3)$$

где $x_{\kappa \min}$ — наименьшая допустимая глубина закаленного слоя, м.

Формулы (9-2) и (9-3) могут быть объединены в одну:

$$\frac{0,015}{x_\kappa^2} < f < \frac{0,25}{x_\kappa^2}. \quad (9-4)$$

Из широкой полосы частот, определяемых неравенством (9-4), оказывается возможным выделить некоторую оптимальную ча-стоту. Выше было показано (§ 4-3), что при глубине прогретого слоя,

равной 0,3 — 0,4 горячей глубины проникновения тока, внутренний угол сдвига фаз имеет минимум, а следовательно, коэффициент мощности индуктора достигает максимума. Экспериментальные исследования, проведенные в лаборатории проф. В. П. Вологдина [44], показывают, что максимум полного к. п. д., включая термический, достигается при

$$x_k \approx (0,4 \div 0,5) \Delta_k \quad (9-5)$$

или при

$$f_{\text{опт}} \approx \frac{0,06}{x_k^2}. \quad (9-6)$$

Хотя оптимум выражен не очень сильно, формула (9-6) может служить для уточнения выбора частоты в диапазоне, указываемом неравенством (9-4).

Электрический к. п. д. индуктора. Зависимость электрического к. п. д. индуктора от частоты подробно разобрана в § 11-3 применительно к объектам с постоянными по всему сечению удельным сопротивлением и магнитной проницаемостью. С ростом частоты к. п. д. повышается от нуля (при $f = 0$) до некоторой предельной величины, определяемой значениями удельных сопротивлений, и магнитных проницаемостей индуктора и нагреваемого объекта, а также соотношением их размеров.

Для любой частоты применительно к цилиндру, нагретому выше точки магнитных превращений, имеем при $a_1 = a_2 = a$ (см. § 11-3)

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{r_2}{cr_2}} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\sqrt{2}}{m_2 A c}}} = f \left(\frac{D_1}{D_2}, \frac{D_1}{a}, \frac{D_2}{\Delta_k}, \frac{\rho_1}{\rho_2} \right),$$

где D_1 и D_2 — соответственно диаметры индуктора и нагреваемого цилиндра; ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления материалов индуктора и нагреваемого цилиндра; $m_2 = D_2 / (\sqrt{2} \Delta_k)$; $A = f(m_2)$; c — коэффициент приведения активного сопротивления цилиндра (§ 5-3); a — длина системы; Δ_k — горячая глубина проникновения тока.

Если $f \rightarrow \infty$, то $m_2 A \rightarrow \sqrt{2}$ и $c \rightarrow c_{\text{пред}} = f(D_1/a, D_1/D_2)$. Тогда имеем:

$$\eta_i \rightarrow \eta_{i, \text{пред}} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{1}{c_{\text{пред}}}}} = f \left(\frac{D_1}{D_2}, \frac{D_1}{a}, \frac{\rho_1}{\rho_2} \right).$$

Таким образом, при достаточно высокой частоте к. п. д. достигает предельного значения, что было показано в § 1-9, для отрезка a системы бесконечной длины.

При заданных соотношениях геометрических размеров и удельных сопротивлений получим:

$$\frac{\eta_i}{\eta_{i, \text{пред}}} = f \left(\frac{D_2}{\Delta_k} \right) = N. \quad (9-7)$$

С увеличением N отношение D_2/Δ_k возрастает, а следовательно, возрастает и требуемая частота. Учитывая приведенные формулы для к. п. д. и формулу (9-7), можно написать:

$$\frac{D_2}{\Delta_k} = f \left(N, \frac{D_1}{D_2}, \frac{D_1}{a}, \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) = F'.$$

Принимая, как и прежде, $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ ом·м, $\rho_2 = 10^{-6}$ ом·м и подставив значение Δ_k из формулы (1-29), получим:

$$f \geq \frac{0,25F'^2}{D_2^2} = \frac{F}{D_2^2}, \quad (9-8)$$

где $F = 0,25 F'^2$, м²/сек.

Значения $F = f(D_2/a)$, м²/сек, найденные при условиях, наиболее характерных для поверхностной закалки ($N = 0,8$ и $D_1/D_2 = 1,05 \div 1,1$), приведены ниже:

D_2/a	0	1,0	2,0	5,0	10,0
F	2,2	4,5	8	28	75

В большинстве случаев частота, определенная по формуле (9-8), лежит внутри полосы частот, определяемой формулой (9-4). Поэтому формула (9-8) наряду с формулой (9-6) служит для уточнения частоты внутри этой полосы.

Полный к. п. д. установки для поверхностной закалки. Расход электроэнергии из сети 50 гц определяется полным к. п. д. установки

$$\eta = \eta_r \eta_{tr} \eta_u \eta_t,$$

где η_r — к. п. д. генератора; η_{tr} — к. п. д. закалочного трансформатора; η_t — термический к. п. д.

К. п. д. генератора определим как отношение отдаваемой им мощности к полной, подведенной из сети, включая мощность, расходуемую на вспомогательные нужды. Правильно сконструированные трансформаторы имеют к. п. д. 85—92% в диапазоне как звуковых частот, так и радиочастот. Индукторы имеют к. п. д. около 75—85%. К. п. д. машинного генератора составляет 70—80%, а лампового около 60%, если учесть мощность, необходимую для нагрева ламп, потери в сеточных цепях и выпрямителе. Таким образом, электрический к. п. д. установки с машинным генератором составит в среднем около 45%, а с ламповым около 38%.

При глубине закаленного слоя больше 2 мм звуковые частоты обеспечивают режим глубинного нагрева, характеризующийся термическим к. п. д., обычно большим 40%, в то время как применение радиочастот при такой и большей глубине закалки связано с режимом поверхностного нагрева, характеризующимся термическим к. п. д., в среднем равным 20%. Тогда будем иметь полный к. п. д. при $x_k > 2$ мм:

Звуковые частоты	18%
Радиочастоты	8%

При меньших глубинах закаленных слоев режим глубинного нагрева осуществляется и при радиочастотах при значении полного к. п. д. около 15%. Таким образом, при $x_k > 2 \text{ мм}$ безусловно целесообразно употреблять звуковые частоты, вырабатываемые в настоящее время с помощью машинных генераторов. Намечающаяся тенденция к замене машинных генераторов статическими преобразователями частоты с более высоким к. п. д. лишь подтверждает выводы о применимости того или иного диапазона частот.

В качестве примера приведем выбор частоты для закалки цилиндра диаметром 60 мм при длине индуктора 12 мм на глубину 3 мм .

Согласно формуле (9-4) имеем: $1500 < f < 25000 \text{ Гц}$.

Согласно формулам (9-6) и (9-8) $f_{\text{опт}} \approx 7000 \text{ Гц}$; $f_{\text{min}} \approx 7800 \text{ Гц}$.

Отечественная промышленность выпускает генераторы на частоты 1000, 2500, 8000, 10000 Гц ; наиболее подходящей является частота 8000—10000 Гц .

При закалке плоских деталей обычно применяются индукторы с магнитопроводами, для которых зависимость к. п. д. от частоты выражена более слабо. При выборе частоты следует пользоваться условиями (9-4) и (9-6). При этом будет обеспечен наиболее высокий полный к. п. д.

9-2. Закалка тел сложной формы

В рассмотренных случаях закалки тел простой формы — цилиндрических и плоских — необходимая глубина закаленного слоя может быть получена при самых различных частотах, из которых можно выделить полосу оптимальных частот.

Опыт закалки деталей сложного профиля, например шестерен, показал, что получение равномерного слоя по всей рабочей поверхности при индукционном нагреве возможно лишь при некоторых условиях. Если эти условия не соблюдаются, то закаленными оказываются или только зубцы, или, наоборот, только впадины. При этом форма индуктора не имеет решающего значения, хотя и оказывает некоторое влияние на характер нагрева. На этом основании при приближенном решении вопроса напряженность магнитного поля во всех точках поверхности нагреваемого предмета можно считать постоянной, что значительно упрощает задачу, не внося больших искажений в основные закономерности.

Задача равномерного нагрева поверхности тела сложной формы может быть разделена на две части — тепловую и электрическую. Теоретическое рассмотрение этого вопроса было впервые произведено Г. А. Разореновым [36]. Мы остановимся главным образом на качественном разборе явлений.

Тепловая часть задачи. Если, например, требуется закалить шестерню равномерно по всему контуру, то на первый взгляд кажется необходимым, чтобы удельная мощность была одинаковой во всех точках. Однако при ближайшем рассмотрении становится очевидным, что условия нагрева зубцов и впадин различны.

Точка O у вершины зубца находится под действием большего количества источников тепла, чем точка O_1 у впадины, как это показано на рис. 9-1 стрелками.

При равномерном распределении удельной мощности это приведет к перегреву зубца относительно впадины. Такое положение соответствует случаю нагрева шестерни на частоте настолько высокой, что глубина проникновения тока много меньше толщины зубца. При этом ток протекает вдоль всего контура с почти одинаковой плотностью и удельная мощность тоже оказывается почти постоянной во всех точках. Наоборот, при низкой частоте, когда глубина проникновения тока сравнима с толщиной зубца, плотность тока в зубцах падает и вместе с ней падает и удельная мощность. Впадины начинают нагреваться сильнее зубцов.

Примерное распределение тока по сечению детали, имеющей выступ, подобный зубцу шестерни, приведено на рис. 9-2, а и б. Таким образом, для вполне равномерного нагрева поверхности необходимо, чтобы выделение тепла в выступе было несколько меньше,

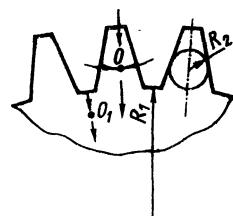


Рис. 9-1. Направление тепловых потоков в различных участках нагреваемой поверхности

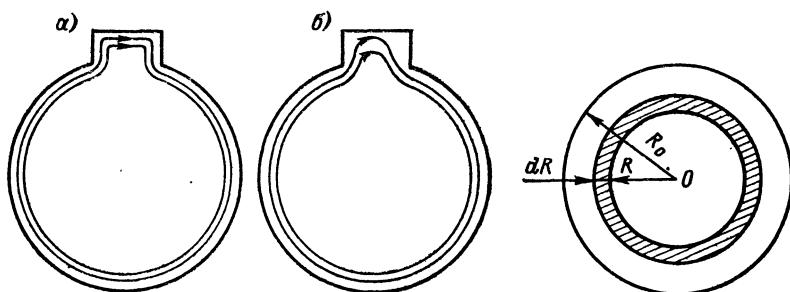


Рис. 9-2. Нагрев деталей сложного профиля: а — распределение тока по сечению при высоких частотах; б — то же при низких частотах

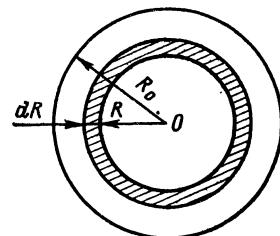


Рис. 9-3. Пояснение к выводу формул для удельных мощностей

чем во впадине. Условие равномерного нагрева можно написать в виде:

$$p_{01} - \Delta p_{01} = p_{02} - \Delta p_{02},$$

где p_{01} — удельная мощность на поверхности впадины; p_{02} — то же на выступе; Δp_{01} — удельная мощность тепловых потерь во впадине; Δp_{02} — то же в выступе. При этом $\Delta p_{01} > \Delta p_{02}$ и $p_{01} > p_{02}$;

$$p_{01}/p_{02} = c,$$

где $c > 1$. Опытами установлено, что $c \approx 2 \div 3$.

Электрическая часть задачи. Заменим сложное тело группой цилиндров разного размера и рассмотрим действие переменного магнитного поля индуктора на каждый цилиндр вне связи с другими цилиндрами. Это упрощение является довольно грубым, но оно допустимо при качественном рассмотрении вопроса. Замена реальных тел сложной формы группами цилиндров показана на рис. 9-1 применительно к случаю шестерни.

Распределение плотности тока по сечению весьма длинного цилиндра, находящегося в однородном переменном магнитном поле, выражается уравнением:

$$\delta_m = \sqrt{2} \frac{H_{me}}{\Delta_2} \left| \frac{J_1\left(\sqrt{-2j} \frac{R}{\Delta_2}\right)}{J_0\left(\sqrt{-2j} \frac{R_2}{\Delta_2}\right)} \right|,$$

где J_0 и J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков первого рода; R — расстояние от центра цилиндра до рассматриваемой точки; R_2 — радиус цилиндра; $j = \sqrt{-1}$.

Если $\Delta_2 \leq 0,25 R_2$, то с точностью до 5%

$$\delta_m = \sqrt{2} \frac{H_{me}}{\Delta_2} \sqrt{\frac{1 - \frac{x}{R_2}}{1 - \frac{x}{\Delta_2}}} e^{-\frac{x}{\Delta_2}},$$

где $x = R_2 - R$ — расстояние точки от поверхности.

Если $\Delta_2 > R_2$, то с точностью до 10 %

$$\delta_m = \frac{H_{me}}{\Delta_2^2} R = \frac{H_{me}}{\Delta_2^2} (R_2 - x).$$

Найдем выражения для удельной мощности в каждом из этих случаев. Для этого в цилиндре с радиусом R_2 выделим кольцевой слой радиусом R и толщиной dR (рис. 9-3). Тогда при $\Delta_2 \leq 0,25 R_2$ мощность, выделяющаяся в кольцевом слое на единицу его высоты

$$dP = \frac{1}{2} (\delta_m dR)^2 \frac{\rho_2 2\pi R}{dR \cdot 1} = \pi R \rho_2 \delta_m^2 dR = \frac{2\pi R \rho_2 H_{me}^2}{\Delta_2^2 \frac{R}{R_2}} e^{-\frac{2(R_2-R)}{\Delta_2}} dR.$$

Удельная мощность

$$p_0 = \frac{1}{2\pi R_2 \cdot 1} \frac{2\pi R_2 \rho_2 H_{me}^2}{\Delta_2^2} \int_0^{R_2} e^{-\frac{2(R_2-R)}{\Delta_2}} dR = \frac{\rho_2 H_{me}^2}{2\Delta_2^2} \left(1 - e^{-\frac{2R_2}{\Delta_2}}\right)$$

или

$$p_0 \approx \frac{\rho_2 H_{me}^2}{2\Delta_2}, \text{ вт/м}^2,$$

как и должно быть при ярко выраженном поверхностном эффекте.

Во втором случае, когда $\Delta_2 > R_2$, имеем:

$$dP = \frac{1}{2} \left(\frac{H_{me}^2}{\Delta_2^2} R dR \right)^2 \rho_2 \frac{2\pi R}{dR} = \frac{\pi \rho_2 R^3 H_{me}^2}{\Delta_2^4} dR.$$

Удельная мощность

$$p_0 = \frac{\rho_2 H_{me}^2}{2R_2 \Delta_2^4} \int_0^{R_2} R^3 dR = \frac{\rho_2 H_{me}^2 R_2^3}{8\Delta_2^4}, \text{ вт/м}^2.$$

Используя формулу (1-10) при $\Delta_2 \leq 0,25 R_2$, получим:

$$p_0 \approx 10^{-3} H_{me}^2 \sqrt{\rho_2 \mu f}, \text{ вт/м}^2,$$

что совпадает с формулой (2-1). При $\Delta_2 > R_2$

$$p_0 \approx 2\pi^4 \cdot 10^{-14} \frac{H_{me}^2 \mu^2 f^2 R_2^3}{\rho_2}, \text{ вт/м}^2. \quad (9-9)$$

Для наибольшего из цилиндров, заменяющих тело сложной формы, справедлива формула (2-1). Для малых цилиндров приближенно соблюдается равенство (9-9). Тогда на основании формул (9-9) и (2-1) имеем:

$$\frac{\rho_{01}}{\rho_{02}} = c = \frac{10^{11}}{2\pi^4 R_{22}^2} \sqrt{\frac{\rho_2^3}{\mu^3 f^3}}$$

и

$$f = \frac{1}{R_{22}^2} \frac{\rho_2}{\mu} \sqrt{\frac{10^{22}}{4\pi^8 c^2}}, \quad (9-10)$$

где R_{22} — радиус малого цилиндра, м.

В формулу (9-10) входят ρ_2 и μ , которым трудно приписать определенные значения. При закалке прогрев производится на глубину, меньшую чем горячая глубина проникновения, и металл становится неоднородным. Примем за удельное сопротивление его среднее значение при температуре 750—770° С: $\rho_2 \approx 8 \cdot 10^{-7}$ ом·м. Относительную магнитную проницаемость положим равной единице, что представляет довольно грубое приближение, так же, как и применение формул (2-1) и (9-9), полученных для однородной проводящей среды. Тогда получим:

$$f \approx \frac{0,51}{R_{22}^2} \frac{1}{c^{2/3}}.$$

Таким образом, частоту следует изменять обратно пропорционально квадрату наименьшего радиуса, а для шестерен — квадрату модуля.

Проделав тепловой расчет при $x_k = 0,5$ R_{22} и $\tau = 0,4 = at_k/R_{22}^2$, что при $a = 6,25 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2/\text{сек}$ соответствует $t_k = 6,4 R_{22}^2$, сек, получим:

$$f = \frac{0,29}{R_{22}^2}. \quad (9-11)$$

Применимельно к шестерне R_{22} равен четверти шага:

$$R_{22} = \frac{t}{4} = \frac{\pi M}{4000}, \text{ м,}$$

где M — модуль шестерни в мм .

Из формулы (9-11) имеем:

$$f = \frac{4,6 \cdot 10^5}{M^2}. \quad (9-12)$$

При этом $x_k \approx 4 \cdot 10^{-4} M$, м и $t_k \approx 4 \cdot 10^{-2} M^2$, сек, т. е. глубина закаленного слоя равна четверти средней толщины зубца.

На самом деле напряженность магнитного поля на поверхности выступающих частей (вершин зубцов) больше вследствие меньшего зазора между индуктором и нагреваемой поверхностью на выступах. Поэтому в формулах (9-11) и (9-12) числовой коэффициент следует уменьшить примерно в 1,5 раза. Тогда имеем:

$$f = \frac{0,2}{R_{22}^2}; \quad (9-13)$$

$$f = \frac{300\,000}{M^2}. \quad (9-14)$$

Последние соотношения хорошо согласуются с опытом.

На рис. 9-4 приведены ориентировочные зависимости частоты, удельной мощности и времени нагрева от модуля шестерни. Эти же зависимости могут быть использованы и сложной формы, если модуль заменить на радиус наименьшего закругления.

Жесткие условия при выборе частоты приводят к почти полной невозможности закалки шестерни с $M < 6$. Например, при $M = 4$ $f \approx 19000 \text{ гц}$. Генераторы на такие частоты промышленностью не выпускаются. Чтобы охватить в достаточной степени все многообразие деталей сложной формы, пришлось бы иметь не менее пятидесяти типов мощных генераторов в диапазоне частот 15000—100000 гц и соответствующее оборудование к ним, в частности контурные конденсаторы. Разнотипность оборудования представляет большие неудобства и тормозит внедрение индукционного метода для закалки деталей сложной формы. Как видно из рис. 9-4, для нагрева шестерен с $M < 4$ требуются весьма большие удельные

Рис. 9-4. Зависимости параметров от модуля шестерни

1 — удельная мощность в детали; 2 — удельная мощность от генератора; 3 — частота по формуле (9-14); 4 — частота по формуле (9-12); 5 — время нагрева

в других случаях нагрева деталей заменить на радиус наименьшего закругления.

Жесткие условия при выборе частоты приводят к почти полной невозможности закалки шестерни с $M < 6$. Например, при $M = 4$ $f \approx 19000 \text{ гц}$. Генераторы на такие частоты промышленностью не выпускаются. Чтобы охватить в достаточной степени все многообразие деталей сложной формы, пришлось бы иметь не менее пятидесяти типов мощных генераторов в диапазоне частот 15000—100000 гц и соответствующее оборудование к ним, в частности контурные конденсаторы. Разнотипность оборудования представляет большие неудобства и тормозит внедрение индукционного метода для закалки деталей сложной формы. Как видно из рис. 9-4, для нагрева шестерен с $M < 4$ требуются весьма большие удельные

мощности: $p_0 > 2 \text{ квт}/\text{см}^2$. Это приводит к удельным потерям в индукторе, превышающим $0,6 \text{ квт}/\text{см}^2$, что делает работу индуктора ненадежной. В 1941 г. член-корр. АН СССР проф. В. П. Вологдин предложил применять для закалки сразу две частоты. Сначала следует нагревать впадины при низкой частоте, затем зубцы при любой радиочастоте. Низкая частота выбирается по формулам (9-4), (9-6) и (9-8) по среднему диаметру.

В настоящее время чаще всего прокаливают зубцы насквозь при мелкой закалке впадин, выбирая частоту более высокую, чем это следует из формул (9-12) и (9-14), или калят впадины и часть боковых поверхностей на более низкой частоте. В последнем случае, используя теплопроводность, можно прокалить зубцы и насквозь за счет некоторого перегрева впадин. Однако такого рода закалка применима лишь к шестерням, работающим в относительно легких условиях.

9-3. Приближенный расчет индукторов для закалки деталей сложной формы

Для ориентировочного расчета индуктора может быть использован с некоторыми поправками приведенный в § 5-6 расчет индуктора для закалки деталей с гладкой поверхностью. Эти поправки будут введены применительно к случаю закалки шестерен, являющихся наиболее типичными и массовыми деталями сложной формы, однако их можно будет использовать и в большинстве других случаев. Естественно, что такой расчет не обладает большой точностью: ошибки в определении отдельных величин могут достигать 30%.

Характерными являются режимы нагрева: при частоте более высокой, чем оптимальная, определенная по формулам (9-12) и (9-14); при частоте оптимальной; при частоте более низкой, чем оптимальная.

Высокая частота. Характер распределения плотности тока по сечению примерно одинаков как в зубцах, так и во впадинах. При вычислении активного и внутреннего реактивного сопротивлений нагреваемого слоя в качестве длины подставляется средний периметр шестерни (с учетом толщины активного слоя), причем периметр примерно в 1,2 раза больше длины начальной окружности.

Тогда получим:

$$F_s = \pi D'_2, \quad D'_2 = 1,2D_t - \xi,$$

где F_s — эквивалентный периметр; D_t — диаметр начальной окружности.

Активное и внутреннее реактивное сопротивления шестерни будут равны:

$$r_2 = \frac{F_s}{a} r_0, \quad x_{2M} = \frac{F_s}{a} x_0,$$

где r_0 и x_0 — соответствующие сопротивления единичного квадрата.

Если индуктор имеет простую цилиндрическую форму, то реактивность рассеяния может быть вычислена по формуле:

$$x_s \approx \omega \frac{\pi^2 (D_1^2 - D_i^2)}{a} 10^{-7}, \text{ ом.}$$

В остальном расчет, приведенный в § 5-6, остается без изменений.

При цилиндрическом индукторе расстояние от поверхности последнего до вершин зубцов значительно меньше, чем до впадин. Вследствие этого ток, в особенности при относительно узком индукторе, на вершинах зубцов концентрируется в более узкой полосе, т. е. напряженность магнитного поля у поверхности зубцов больше, чем во впадинах. Поэтому удельная мощность оказывается максимальной на поверхностях зубцов, что усиливает их нагрев.

Несколько более равномерный нагрев можно получить, применив индуктор фасонной формы (рис. 9-5). При этом напряженность магнитного поля и удельная мощность распределяются по нагреваемой поверхности приблизительно равномерно. При расчете такого индуктора необходимо учсть еще следующее:

- собственные активное r_1 и внутреннее реактивное x_{1m} сопротивления индуктора вычисляются по его полному периметру;
- реактивность рассеяния вычисляется по фактическому зазору; в) реактивное сопротивление x_{10} и коэффициент k_1 вычисляются по среднему диаметру индуктора.

Рис. 9-5. Индуктор фасонной формы для нагрева шестерен

1 — индуктор; 2 — нагреваемая шестерня

Приближенный тепловой расчет производится для эквивалентного цилиндра с диаметром, равным средней толщине зубца, из расчета его сквозного нагрева до температуры закалки $T_k = 750^\circ\text{C}$ при максимально допустимой температуре на поверхности. Полученная удельная мощность умножается на полную одновременно нагреваемую поверхность шестерни. Тогда имеем:

$$P_T = 1,2\pi D_i a p_0,$$

где a — ширина одновременно нагреваемой полосы.

Оптимальная частота. В этом случае и при более низких частотах применяются только простые цилиндрические индукторы, так как средняя толщина зубца фасонного индуктора оказывается одного порядка с глубиной проникновения тока в медь, или даже меньше ее. Вследствие этого плотность тока в зубцах индуктора падает, что делает применение фасонной конструкции неэффективной.

Частота определяется по формуле (9-14). Активное и внутреннее реактивное сопротивления шестерни рассчитываются для эквива-

лентного цилиндра по диаметру начальной окружности шестерни:

$$r_2 = \frac{\pi D_t}{a} r_0, \quad x_{2M} = \frac{\pi D_t}{a} x_0.$$

Основанием для этого служит падение плотности тока в зубцах по сравнению с ее значением у впадины. В остальном расчет проводится так, как было указано выше.

При тепловом расчете время нагрева и удельная мощность определяются по кривым на рис. 9-4. Полная мощность в нагреваемой шестерне находится из соотношения:

$$P_T = 1,2\pi D_t a p_0.$$

Частота ниже оптимальной. Электрический расчет выполняется так же, как и для оптимальной частоты.

Время нагрева и удельная мощность находятся для цилиндра с диаметром, равным диаметру окружности впадин, при $x_k = R_{22} = 8 \cdot 10^{-4} M$, м и наибольшей допустимой температуре поверхности с тем, чтобы обеспечить прокаливание большей части зубца.

Полная мощность находится по формуле:

$$P_T = \pi D_{vp} a p_0,$$

где D_{vp} — диаметр окружности впадин.

Подставляя при вычислении периметра диаметр окружности впадин, мы учитываем, что мощность на поверхности зубца много меньше, чем на поверхности впадин.

Если закалка ведется с применением двух частот, то индуктор для каждой частоты рассчитывается отдельно. Один расчет проделывается для частоты более низкой, чем оптимальная, второй — для более высокой.

Глубина закалки принимается равной $x_k = (3 \div 4) \cdot 10^{-4} M$, м.

9-4. Индукторы для закалки тел вращения сложной формы

Цилиндрические индукторы. Одним из характерных примеров закалки тела вращения является закалка внешних поверхностей, имеющих коническую или ступенчатую форму с малой высотой ступеней. В этом случае необходимо, чтобы участкам тела с меньшими диаметрами сообщалась меньшая мощность. Только в этом случае нагрев будет равномерным.

Равномерный нагрев конической детали (рис. 9-6) можно получить, применяя многовитковый цилиндрический индуктор. В местах, где наблюдается перегрев, следует увеличить шаг витков, что часто можно выполнить без переделки индуктора. Тогда в этом месте уменьшится напряженность магнитного поля и, следовательно, нагрев. Тот же эффект достигается соответствующим изменением зазора при постоянном шаге витков. Однако этот способ хуже, так как ослабление нагрева достигается за счет снижения

к. п. д. индуктора на этом участке, а подгонка зазора связана с полной переделкой индуктора.

Если наименьший диаметр детали $D_{22} > 3\Delta_k$, то поверхностный эффект ярко выражен во всех точках ее поверхности. К. п. д. индуктора на всех участках примерно одинаков. Для уменьшения передаваемой мощности зазор и шаг витков по мере уменьшения диаметра должны увеличиваться (рис. 9-6, а).

Если, наоборот, $D_{22} < 3\Delta_k$, то к. п. д. индуктора на участках с меньшим диаметром падает. В этом случае по мере уменьшения диаметра зазор или шаг витков должен уменьшаться (рис. 9-6, б). Если при этом не удается выравнивать нагрев, то следует повысить частоту так, чтобы D_{22} было больше Δ_k , что к тому же обеспечивает более высокий общий к. п. д. индуктора.

Приближенный расчет индуктора осуществляется по средним значениям диаметров индуктора и детали и по среднему шагу витков.

Индукторы петлевого типа. При большой разности диаметров усеченного конуса или ступеней целесообразнее применять индукторы петлевого типа соответствующей формы. При нагреве внутренних поверхностей они должны иметь магнитопроводы.

Рис. 9-6. Цилиндрические индукторы для нагрева поверхностей конических деталей: а — $D_{22}/\Delta_k > 3$; б — $D_{22}/\Delta_k < 3$, $D_{21}/\Delta_k > 3$

Характерная форма ступенчатой детали приведена на рис. 9-7. Мощность $P_1^{(1)}$ на единицу высоты участка 1 должна быть больше мощности $P_2^{(1)}$ на единицу высоты участка 2. Пренебрегая различием в условиях теплопередачи, считаем, что удельные мощности p_0 на обоих участках равны. Тогда имеем:

$$\frac{P_1^{(1)}}{P_2^{(1)}} = \frac{\pi D_{21} p_0}{\pi D_{22} p_0} = \frac{D_{21}}{D_{22}}, \quad (9-15)$$

где D_{21} и D_{22} — диаметры нагреваемой детали на участках 1 и 2.

Обеспечить необходимое распределение мощности можно, увеличив зазор на участке 2 или удалив частично или полностью магнитопровод на этом участке. Таким образом, уменьшение мощности на участке 2 происходит за счет понижения к. п. д. индуктора на этом участке и, в конечном счете, приводит к снижению полного к. п. д. индуктора.

Лучшие результаты можно получить, применяя индуктор с переменной шириной провода (рис. 9-8). Чем шире провод, тем при том же токе в нем меньше напряженность магнитного поля, а следовательно, и мощность, передаваемая в деталь.

Считая магнитное поле в зазоре между индуктором и нагреваемой поверхностью равномерным и пренебрегая магнитным сопротивлением обратного замыкания, получим для напряженности магнитного поля на участках 1 и 2:

$$H_1 \approx I_u/a_1, \quad H_2 \approx I_u/a_2,$$

где a_1 и a_2 — ширина провода на первом и втором участках.

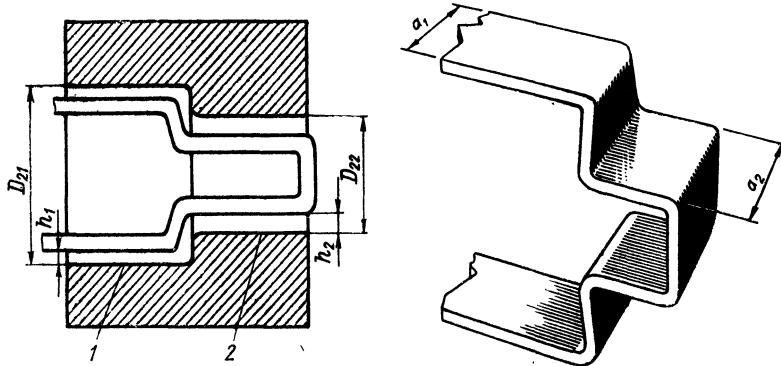


Рис. 9-7. Нагрев поверхности детали ступенчатой формы
1 — нагреваемая деталь; 2 — провод индуктора

Рис. 9-8. Индуктор с переменной шириной провода

Тогда имеем:

$$\begin{aligned} P_1^{(1)} &\approx 2a_1 k H_1^2 \approx \frac{2k}{a_1} I_u^2, & P_2^{(1)} &\approx 2a_2 k H_2^2 \approx \frac{2k}{a_2} I_u^2, \\ \frac{P_1^{(1)}}{P_2^{(1)}} &\approx \frac{a_2}{a_1}, \end{aligned} \quad (9-16)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

На основании (9-15) получаем:

$$\frac{a_2}{a_1} \approx \frac{D_{21}}{D_{22}}. \quad (9-17)$$

Если $x_k/D < 0,1$, то соотношение (9-17) достаточно точно, на любом участке при нагреве внешней поверхности детали с сплошным сечением. При нагреве внешней или внутренней поверхности полой детали необходимо также, чтобы глубина прогрева x_k была в 5-6 раз меньше толщины стенки на любом участке.

Если эти условия не выполняются, то следует пользоваться соотношением (9-16), определив мощности $P_1^{(1)}$ и $P_2^{(1)}$ из теплового расчета.

Электрический расчет индуктора производится по участкам подобно тому, как было указано в § 7-7.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ ИНДУКТОРЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТИПОВ

10-1. Основные типы специальных индукторов

При нагреве тел простой геометрической формы, круглого, прямоугольного или квадратного поперечного сечения поверхность, подлежащая нагреву, как правило, замкнута. Ширина ее по всему пути протекания индуцированного тока постоянна. Поэтому плотность тока везде одинакова, нагрев протекает практически равномерно. Некоторые сложные поверхности, как например зубчатые колеса, цепные звездочки и пазовые валы, а также подобные им изделия с повторяющимися элементами при выборе частоты (см. гл. 9) могут рассматриваться как совокупность цилиндров разного диаметра. Выбирая частоту, как указано в гл. 9, или используя токи двух частот, иногда можно получить равномерный по глубине нагрев в кольцевом индукторе или индукторе, огибающем деталь по ее профилю с равномерным или неравномерным зазором. Однако, как показано выше, для осуществления термообработки шестерен токами двух частот необходимы источники ТВЧ большой мощности (300—500 квт). Время нагрева получается коротким 1,0—1,5 сек, что весьма усложняет дозирование нагрева, так как все приборы управления должны работать с очень высокой точностью. Поэтому такой способ термообработки может быть рационально использован только в условиях массового производства однотипных деталей.

В большинстве случаев практики зубья шестерен с $M > 5$ и звездочек цепей большого шага (ходовых звездочек гусеничных машин) нагреваются по одному в индукторах специальной формы. Такой прием позволяет осуществлять термообработку зубчатых и цепных колес, используя серийные установки мощностью до 100 квт.

Однако часто приходится изготавливать индукторы для нагрева поверхностей весьма сложной формы. В таких случаях либо получают необходимое температурное поле, придавая индукирующему проводу специальную форму, либо искусственно растягивают нагрев (за счет уменьшения удельной мощности), чтобы поверхности, не обтекаемые индуцированным током, нагрелись за счет теплопроводности. Из большого числа разнообразных специальных индукторов, которые используются в промышленности, мы рассмотрим только несколько основных типов, каждый из которых может служить образцом при конструировании группы индукторов сходного назначения:

- 1) индукторы для нагрева под сварку и пайку;
- 2) индукторы для нагрева тонкостенных изделий;
- 3) индукторы для термообработки шестерен большого модуля ($M > 6$);
- 4) индукторы с электромагнитными экранами;
- 5) индукторы-трансформаторы, или, как их иногда называют, концентраторы [2].

10-2. Индукторы для нагрева под сварку и под пайку

Индукторы для нагрева под сварку. Сварка алюминиевых и стальных труб при нагреве током средней и высокой частоты за последние 10 лет практически вытеснила все другие, ранее использовавшиеся методы производства сварных труб. Использование токов средней и высокой частоты позволило увеличить скорость сварки в 2—3 раза и значительно повысить качество сварного шва.

Трубная заготовка образуется из стальной или алюминиевой полосы на формовочных клетях турбоэлектросварочного стана (рис. 10-1). Кромки, подлежащие сварке, при прохождении по ним тока нагреваются и свариваются под действием шовожимающих валков 2. В настоящее время используются следующие три способа подвода тока к нагреваемым кромкам.

1. При подводе скользящими контактами к вторичной обмотке понижающего трансформатора присоединяются шарнирные контакты, которые прижимаются к кромкам трубной заготовки пружинами. Контактный подвод используется при нагреве током высокой частоты, так как для подвода тока через слой окалины, всегда имеющейся на поверхности трубной заготовки, необходимы достаточно высокие напряжения (200—500 в). В связи с быстрым износом контактов этот метод используется редко, главным образом при сварке труб большого диаметра, так как другие методы в этом случае менее эффективны.

2. Подвод посредством вращающегося трансформатора (или роликов) также требует повышенного напряжения и используется поэтому на высоких частотах, однако тоже редко в связи с относительной сложностью, вращающегося трансформатора.

3. Индукционный подвод тока (рис. 10-1) используется как на средних, так и на высоких частотах.

Коэффициент полезного действия при таком методе нагрева ниже, чем при двух первых, так как здесь к потерям в понижающем трансформаторе добавляются потери в индукторе. Однако надежность и долговечность индуктора гораздо выше, чем надежность скользящих контактов или вращающегося трансформатора. Поэтому последний способ вытеснил другие способы почти на всех установках, где вначале были использованы контактные способы подвода тока из-за их более высокого электрического к. п. д.

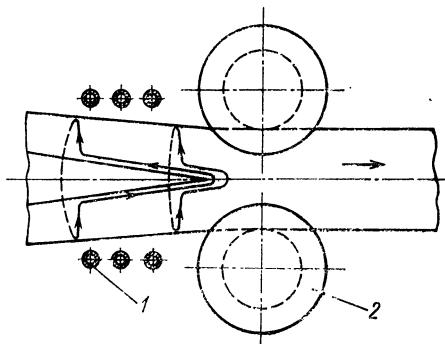


Рис. 10-1. Схема устройства для сварки труб при нагреве индуктированным током

Показанное на рис. 10-1 распределение индуктированного тока в поверхностях трубной заготовки может быть получено при нагреве во внешнем кольцевом индукторе (см. рис. 8-7), конструкция которого была описана в гл. 8. Такое же распределение индуктированного тока будет при использовании многовиткового индуктора, индуктирующий провод которого (1) схематически показан в разрезе на рис. 10-1. Такого типа индукторы используются при сварке труб диаметром до 200 мм на средних и высоких частотах. Как видно из рис. 10-1, индуктированный ток протекает не только по свариваемым кромкам, нагрев которых необходимо осуществить,

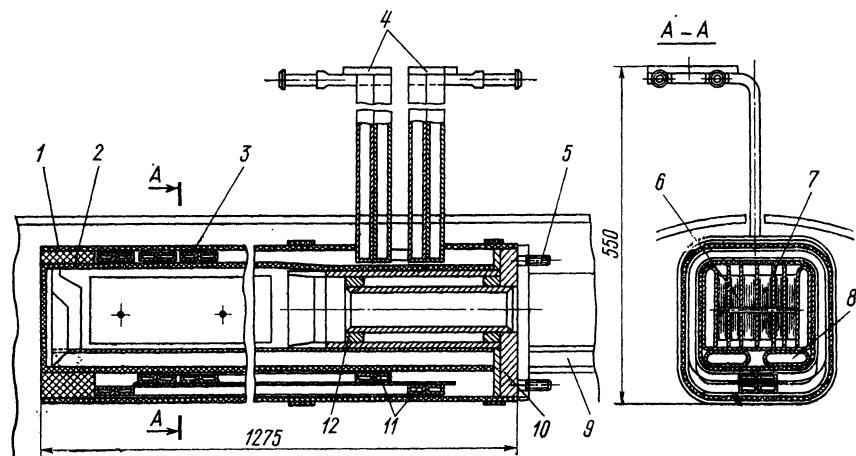


Рис. 10-2. Внутренний индуктор для нагрева труб под сварку

но также от кромки до кромки по значительной части поверхности трубной заготовки. По мере увеличения диаметра трубы длина пути тока увеличивается, растут, следовательно, бесполезные потери. Поэтому при увеличении диаметра труб иногда отказываются от индукционного подвода тока и переходят к контактному. Кроме того, по мере увеличения диаметра труб увеличивается диаметр шовозажимающих валков 2.

При использовании внешнего охватывающего индуктора увеличивается расстояние между индуктором и точкой схода свариваемых кромок. При этом плотность тока на кромках уменьшается, так как он уходит от них, как показано схематически одной из линий на рис. 1-10. Поэтому при сварке труб диаметром больше 200 мм используют внутренний индуктор (рис. 10-2)¹.

Индуктирующий провод 3 имеет два витка, он сварен из двух прямоугольных медных трубок. Трубки меньшего поперечного сечения легче навивать в прямоугольную спираль. К концам индуктирующего провода приварены токоподводящие шины 11, каждая

¹ Конструкция разработана В. А. Пейсаховичем.

из двух аналогичных медных трубок. Токоподводящие шины идут сначала вдоль оси индуктора, а затем выходят сквозь щели в трубной заготовке наружу. Здесь к ним приварены планки 4 для присоединения к шинам, идущим от источника тока. Магнитопровод 6 из трансформаторной стали толщиной 0,35 мм разделен на 6 частей медными листами 7 толщиной 2 мм. Магнитопровод обернут стеклотканью 2, пропитанной эпоксидной смолой.

Снаружи весь индуктор также покрыт изоляционной гильзой 1 из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Магнитопровод 6

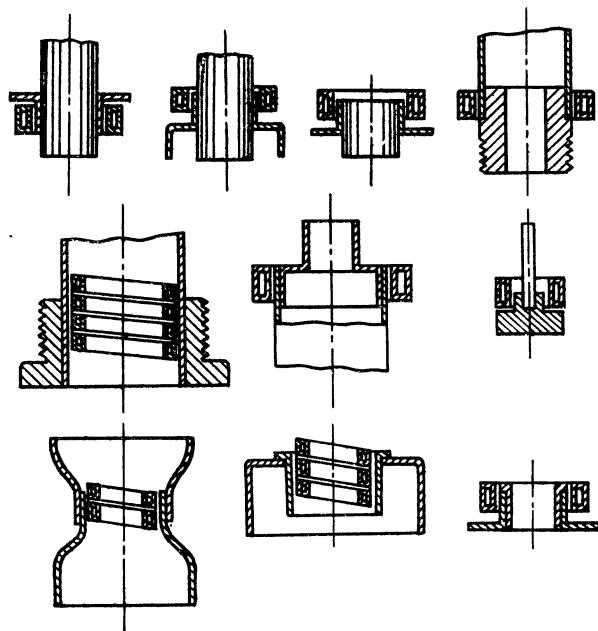


Рис. 10-3. Схемы индукторов для нагрева под пайку цилиндрических деталей

закреплен на трубе 12 посредством медных листов, которые входят в прорезанные в трубе пазы. Труба из немагнитной стали приварена к фланцу 10, изготовленному из того же материала.

Индуктор с помощью фланца 10 и шпилек 5 закрепляется на фланце трубчатой оправки 9, через которую подается вода для охлаждения магнитопровода. Вода по каналам между медными листами там, где последние выступают снизу и сверху над магнитопроводом, проходит в левый конец индуктора, а затем по трубкам 8 возвращается в трубчатую оправку 9. Медные листы отводят тепло, выделяющееся внутри магнитопровода, и передают его воде.

Индукторы для нагрева под пайку. При конструировании индукторов под пайку кроме общих правил, относящихся ко всем ин-

дукторам, необходимо принимать во внимание соображения, связанные с особенностями технологического процесса пайки. Для хорошего соединения припаиваемых деталей требуется не только расплавить припой, но также равномерно прогреть спаиваемые поверхности обеих соединяемых деталей. Неравномерный нагрев может быть источником появления на отдельных поверхностях чрезмерной окалины и даже оплавления их. Поэтому при конструировании следует учитывать не только форму нагреваемых деталей, но также их массу, теплопроводность и теплоемкость. Более массивная деталь должна получать больше тепла, чтобы обе детали грелись равномерно. В том случае, если одна из деталей находится внутри другой и одновременный нагрев обеих деталей невозможен, нагреву необходимо подвергать деталь более массивную, тогда деталь с меньшей массой будет нагреваться за счет теплопроводности. Когда толщина деталей одинакова, предпочтительнее производить нагрев внутренней детали, так как внешняя от нагрева расширяется и отходит от внутренней, вследствие чего ухудшаются условия для передачи тепла последней.

Припой как наиболее легкоплавкая часть не должен нагреваться слишком интенсивно, ибо, если он расплывится и затечет в стык между холодными деталями, соединение может получиться недостаточно прочным.

Рис. 10-4. Индуктор для нагрева четырех колец под пайку их к изоляторам

На рис. 10-3 приведено несколько конструкций индукторов для нагрева под пайку деталей цилиндрической формы.

Обычно при нагреве индукционным способом припаиваются друг к другу детали сравнительно тонкостенные. Индуцированным током нагревается в большинстве случаев одна из деталей, вторая деталь прогревается за счет теплопроводности. Поэтому процесс

нагрева идет сравнительно медленно и требует небольшой мощности. Вместе с тем, как правило, установки должны иметь высокую производительность. Мощность выпускаемых промышленностью источников токов высокой частоты, которые служат для нагрева под пайку, обычно достаточна для одновременного нагрева под пайку нескольких деталей. Поэтому в установках для пайки находят широкое применение индукторы многоочковые (рис. 10-4).

На этом рисунке показан индуктор для одновременного нагрева четырех колец 1 при припайке к ним проходных изоляторов. Нижняя конусная часть изолятора 3 предварительно металлизируется. Стальные кольца 1 укладываются на шифер-асbestовые шайбы 6, опирающиеся на индуктирующий провод 5. На кольцо 1 помещается

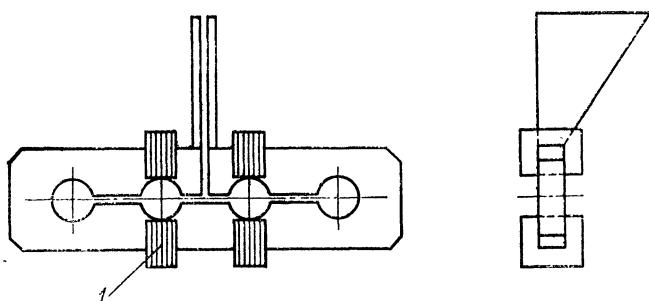


Рис. 10-5. Индуктор с дополнительными магнитопроводами для выравнивания нагрева

колечко из припоя 2, а затем устанавливается изолятор. В медных короткозамкнутых кольцах 4 индуцируется ток, который находится в противофазе с током в индуктирующем проводе. Таким образом, ослабляется нагрев наружного диаметра кольца 1 и усиливается нагрев внутреннего его диаметра, прилегающего к изолятору 3 и припюю 2. Трубка 7, в которой просверлены отверстия с шагом 10 мм со стороны, обращенной к кольцу 1, служит для подачи воздуха после окончания нагрева и затекания припоя. Таким образом ускоряется охлаждение изделий и увеличивается производительность, так как изоляторы можно снимать только после затвердевания припоя. При нагреве в многоочковых индукторах, подобных описанному, угол охвата током изделий, расположенных у концов индуктирующего провода, несколько больше, чем угол охвата двух средних изделий. Поэтому последние нагреваются несколько медленнее. Для выравнивания нагрева средние отверстия в индуктирующем проводе делают несколько меньшего диаметра, чем края.

При одинаковых диаметрах всех отверстий в многоочковом индукторе выравнивание нагрева можно осуществить, устанавливая П-образный магнитопровод 1 так, как показано схематически на рис. 10-5. Магнитопровод собран из трансформаторной стали тол-

щиной 0,1 — 0,35 мм. Толщину пакета магнитопровода подбирают опытным путем.

Выравнивание нагрева может быть достигнуто также, если при помощи дополнительных пазов у крайних отверстий, как это схе-

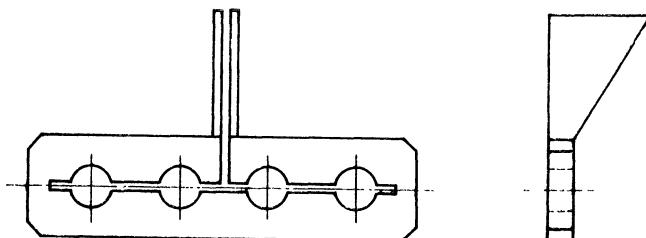


Рис. 10-6. Индуктор с пазами для выравнивания нагрева

матически показано на рис. 10-6, будут обеспечены одинаковые условия обтекания током средних и крайних отверстий в индуктирующем проводе.

10-3. Индукторы для нагрева тонкостенных изделий

В настоящее время токи высокой частоты широко используются при нагреве тонкостенных изделий в следующих технологических процессах: при сушке защитного покрытия стальных лент (перед отжигом их в производстве трансформаторной стали), при сушке лаковых покрытий на ленте, при лужении для оплавления олова и т. п.

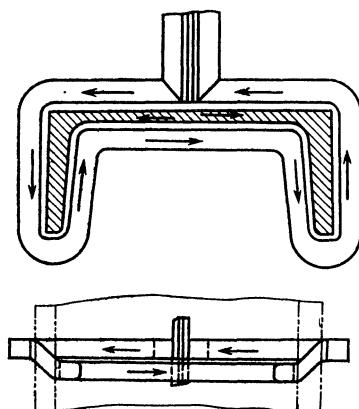


Рис. 10-7. Схема протекания тока в индукторе и нагреваемой детали при нагреве швеллера

Если глубина проникновения тока соизмерима с толщиной нагреваемого изделия (листа, ленты, угловой и швеллерной стали и т. д.), то к. п. д. индуктора будет очень низким, если индуцированный ток, протекающий с одной стороны изделия (рис. 10-7), ослабляет поле тока, протекающего с другой стороны во встречном направлении.

На рис. 10-7 показаны мгновенные направления тока в индукторе и нагреваемом швеллере. Тонкие изделия из ферромагнитных материалов на средних частотах удается нагревать в обычных охватывающих индукторах

только до температуры, при которой они теряют магнитные свойства. Когда глубина проникновения тока резко возрастает и становится соизмеримой с толщиной изделий, к. п. д. резко падает,

потери излучения и теплопередачи становятся соизмеримыми с выделяющейся в изделиях мощностью. Нагрев прекращается.

Можно устранить ослабляющее взаимодействие прямого и обратного токов, если сместить относительно друг друга элементы индуктирующего провода, расположенные с противоположных сторон нагреваемого объекта, как это показано на рис. 10-7. Это смещение должно быть приблизительно равно ширине индуктирующего провода. Так как индуцированный ток протекает под индуктирующим проводом, при смещении последнего смещается и прямая, и

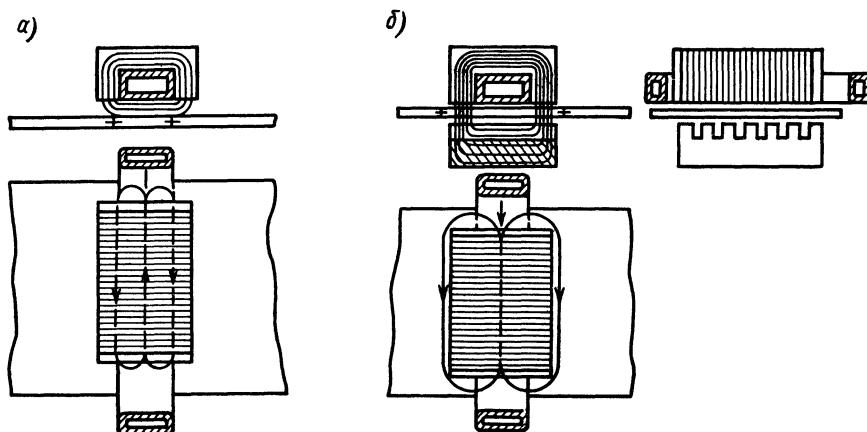


Рис. 10-8. Схема нагрева тонкого листового материала прямолинейным индуктирующим проводом

обратная ветви этого тока и таким образом взаимное влияние их уменьшается.

При нагреве тонкого листового ферромагнитного материала внешним полем прямолинейного индуктора с магнитопроводом нагрев почти прекращается по достижении температуры магнитных превращений.

Немагнитные материалы вообще плохо греются, так как вследствие слабой связи индуктора с нагреваемым объектом (большая часть магнитного потока замыкается по воздуху, не пересекая нагреваемой поверхности) обратный ток идет очень близко от прямого тока и ослабляет его (рис. 10-8, а). Кроме того, ввиду большого рассеяния коэффициент мощности и, следовательно, к. п. д. индуктора получаются чрезвычайно низкими.

Для увеличения связи между индуктирующим проводом и тонкостенным объектом после потери последним магнитных свойств применяются дополнительные магнитопроводы.

Взаимное расположение индуктирующего провода, дополнительного магнитопровода и нагреваемого листа показано на рис. 10-8, б.

Магнитопровод увеличивает связь между индуктирующим витком и листом после потери последним магнитных свойств, поэтому коэффициент мощности и к. п. д. при наличии магнитопровода уменьшаются незначительно, а расстояние между прямым и обратным током остается неизменным.

Поперечные пазы в магнитопроводе препятствуют возникновению в нем вихревых токов. Промежуток между двумя соседними пазами должен быть равен 4—5 глубинам проникновения тока в сталь, а глубина паза должна быть больше глубины проникновения.

10-4. Индукторы для закалки зубьев шестерен

При поверхностной закалке зубьев шестерен (по одному зубу) также используют два способа термообработки — одновременный и непрерывно-последовательный. Если мощность источника достаточна для того чтобы сразу нагреть один зуб на всю его длину, используется первый способ. Когда требуется только износостойкость рабочей поверхности зуба, нагрев осуществляют в петлевых индукторах с магнитопроводом из трансформаторной стали при использовании тока средней частоты (2400, 8000 гц) или без магнитопроводов при нагреве током 440 кгц [38, 42]. Петлевые индукторы просты в изготовлении и надежны в эксплуатации.

У шестерен тяжело нагруженных механизмов, которые должны

Рис. 10-9. Индуктор для одновременной закалки шестерен крупного модуля по одному зубу

иметь также высокую усталостную прочность, закаленный слой равномерной толщины должен идти непрерывно от вершины одного зуба через впадину до вершины соседнего зуба. Если шестерни изготовлены из сталей регламентированной прокаливаемости, то такой слой можно получить при сквозном нагреве в кольцевом индукторе и последующем охлаждении в интенсивном потоке охлаждающей жидкости. При этом на поверхности образуется равномерный закаленный слой, глубина которого определяется свойствами стали [46]. Для обычных конструкционных и малолегированных

сталей, из которых изготавливаются многие детали, подвергающиеся поверхностно-индукционной закалке, закаленный слой необходимой формы может быть получен при нагреве индуктором, приведенным на рис. 10-9. Индуктор получает питание через понижающий трансформатор. Ток проходит сначала по трубке 1 вдоль дна впадины. Затем он разветвляется на два тока, которые по трубкам 2 и 8 возвращаются снова в ту же впадину, но теперь уже идут вдоль вершин правого и левого зуба по трубкам 5 и 6. По выходе из этих трубок токи по трубкам 3 и 7 попадают к второму выводу вторичной обмотки понижающего трансформатора. Магнитопровод 4 из стальных с надрезом листов толщиной 2 мм расположен между трубками 1, 5 и 6. Он вытесняет ток к нагреваемым поверхностям.

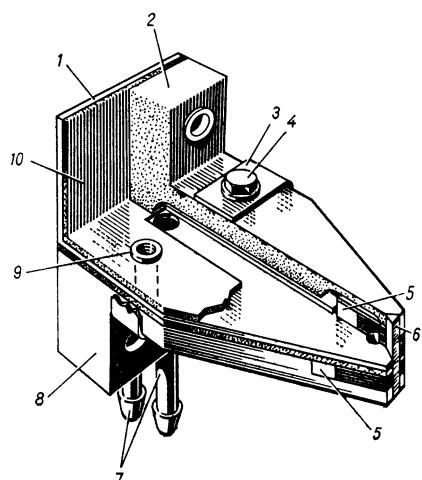


Рис. 10-10. Индуктор для последовательной закалки шестерен крупного модуля по одному зубу

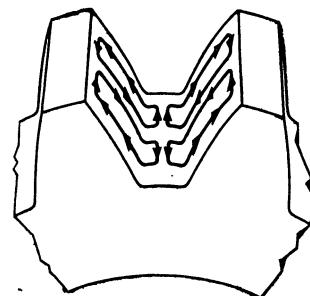


Рис. 10-11. Схема протекания индуцированного тока при нагреве индуктором, показанным на рис. 10-10

Для последовательной закалки зубьев шестерен используются индукторы нескольких типов. Отечественные индукторы описаны в литературе [18, 38, 42].

За последнее время за рубежом довольно широко используются станки для закалки шестерен английской фирмы «Делапена». Несколько таких станков завезены также в СССР. Индуктор, который используется на этих станках, показан на рис. 10-10. Ток подводится к центральному проводнику 1, отсюда он попадает в индуктирующий провод 6. Здесь разветвляется на два равных тока, которые текут далее по верхнему 2 и нижнему проводникам 8. Эти проводники соединены между собой полосовыми проводниками 3 с помощью болтов 4, проходящих через изоляционные втулки 9. Между проводниками 1, 2 и 8 проложены изоляторы 10 из слюды.

Магнитопроводы 5 из листовой никелевой стали вытесняют ток к нагреваемой поверхности впадины, через штуцеры 7 подводится и отводится вода. Мгновенные направления индуцированного тока

показаны на рис. 10-11. Фирма рекомендует индукторы такого типа для закалки шестерен модулем от 2,5 до 12. Индукторы, показанные на рис. 10-9 и 10-10, эффективны только при малых зазорах (0,3 — 0,5 мм) между нагреваемой поверхностью и индуктирующим проводом.

Для получения равномерного слоя на рабочих поверхностях зубьев и во впадине, последняя должна изготавливаться с высокой степенью точности. Станок, на котором производится закалка, должен обеспечивать высокую точность взаимного расположения индуктора и закаливаемой поверхности. Допуск на это расположение не должен превышать половины зазора. Такой допуск обеспечить довольно трудно.

10-5. Индукторы с электромагнитными экранами

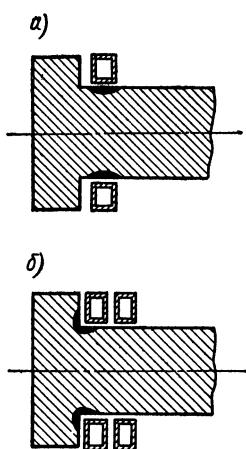
При нагреве деталей индукционным методом часто в магнитном поле индуктирующего провода оказываются не только те поверхности детали, для нагрева которых индуктор предназначен, но также и соседние с ними, нагреву не подлежащие. При достаточной близости этих поверхностей к индуктирующему проводу они могут нагреваться до весьма высоких температур и потреблять значительную мощность.

Если даже нагрев их не является вредным, с технологической точки зрения он нежелателен, так как ведет к излишнему расходу электроэнергии.

Иногда поле рассеяния индуктора захватывает некоторые элементы конструкции закалочного станка или индукционного нагревателя, вследствие чего происходит нагрев этих элементов, сопровождающийся обгоранием краски или смазки.

Для ограничения потоков рассеяния применяются экраны из короткозамкнутых витков или магнитопроводы из расслоенного железа. Наиболее эффективным способом экранирования является использование магнитопровода из трансформаторной стали на средних частотах и из ферритов на высоких частотах. Располагая магнитопровод таким образом, чтобы магнитный поток на всем своем пути проходил или в нагреваемой детали, или в магнитопроводе, ограничивая его путь по воздуху минимальным зазором между нагреваемой поверхностью и магнитопроводом, можно сосредоточить нагрев только там, где он требуется. Во всех индукторах с магнитопроводами, описанных выше, используется этот прием. Короткозамкнутые витки из медных полос или трубок в энергетическом отношении менее выгодны, так как на нагревание их расходуется

Рис. 10-12. Схема влияния короткозамкнутого витка на поле индуктора



энергия. При использовании короткозамкнутых витков требуется весьма точно устанавливать индуктор относительно нагреваемой поверхности. При смещении индуктора край поверхности, обращенной к короткозамкнутому витку, греется слабее. Кроме того, короткозамкнутые витки, вообще говоря, не ограничивают поток, а перераспределяют его в пространстве (как это осуществляется, например, в индукторе для пайки изоляторов — см. рис. 10-4).

Другой пример использования короткозамкнутого витка для перераспределения магнитного поля приведен на рис. 10-12. Если

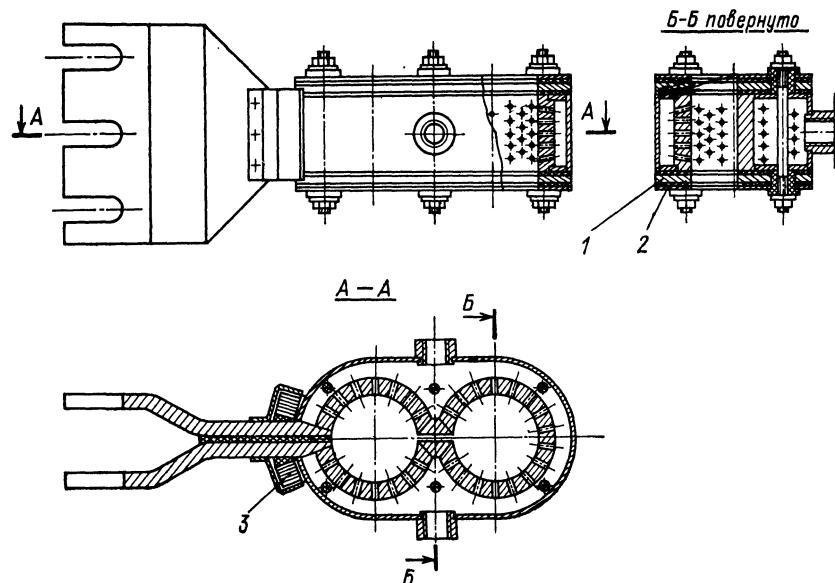


Рис. 10-13. Индуктор для закалки шеек и кулачков распределительного вала с экранами из магнитопроводов и короткозамкнутых витков

не установить короткозамкнутый виток, греется цилиндрическая поверхность внутри индуктора (рис. 10-12, а). При установке короткозамкнутого витка (рис. 10-12, б) нагревается торец бурта. В первом случае торец нагревается, если зазор между индуцирующим проводом и буртом значительно меньше зазора между проводом и цилиндром или если установлен магнитопровод, вытесняющий ток к бурту [42].

Для уменьшения потерь экраны в виде короткозамкнутых витков должны изготавляться из меди М1.

Если каждый из рассмотренных способов экранирования в отдельности не дает требуемого результата, из-за близости поверхности, которую необходимо защищать от нагрева, то иногда используют оба способа вместе: применяют экран из магнитопровода и короткозамкнутый виток.

Так, при термообработке распределительных валиков, у которых кулачки и шейки расположены на расстоянии 10—15 *мм* друг от друга необходимо, чтобы при нагреве кулачка шейка, закаленная ранее, не отпускалась (или наоборот, если кулачок закаливается раньше шейки). В этом случае используют индуктор с двумя экранами (рис. 10-13). Магнитопровод 1 из мягкой стали и медный короткозамкнутый экран 2 изолированы от индуктирующего провода мицанитовыми прокладками. Магнитопровод 3 служит для выравнивания нагрева в левом и правом отверстии индуктора.

10-6. Индукторы-трансформаторы

Если нет высокочастотного понижающего трансформатора с достаточно низким вторичным напряжением (при котором можно использовать одновитковый индуктор), а многовитковый индуктирующий провод не удается разместить над нагреваемой поверхностью, то может быть использован индуктор-трансформатор.

Индуктором-трансформатором называют индуктор, имеющий две обмотки: вторичную, состоящую из одного-двух витков, и первичную — из нескольких витков. Обмотки связаны между собой индуктивно. Индукторы-трансформаторы могут быть также использованы взамен разъемных индукторов (описанных в гл. 8) при термообработке шеек коленчатых валов и кулачков распределительных валов.

Индуктор-трансформатор используют взамен многовиткового индуктора с нагревостойкой изоляцией между индуктором и нагреваемой деталью в том случае, когда такая изоляция нежелательна, так как содержит загрязнения, которые могут перейти в нагреваемую деталь.

Индуктор-трансформатор, чертеж которого приведен на рис. 10-14, предназначен для групповой термообработки шеек валов электродвигателей нескольких габаритов. Для нагрева коротких шеек многовитковый индуктор изготовить не удается. Одновитковый индуктор не согласуется с понижающим трансформатором. Для нагрева длинных шеек можно было бы использовать многовитковый индуктор. Однако при установке и снятии деталей электрическая изоляция витков неизбежно повреждается. Кроме того, при переходе от закалки одного вала к закалке другого необходимо менять целиком весь сложный многовитковый индуктор. Индуктор-трансформатор (рис. 10-14) используется для термообработки шеек валов десяти типоразмеров. Первичная обмотка 3 имеет пять витков, вторичная 8 одновитковая. Длина цилиндра, образующего внутреннюю поверхность вторичной обмотки, равна ширине шейки, подлежащей нагреву.

Таким образом, ток вторичной обмотки, протекающий, как это показано схематически стрелками на том же чертеже, стягивается на внутренней поверхности в узкую полосу, равную ширине нагреваемой шейки.

Вторичная обмотка зажата между двумя изоляционными шайбами 4 и 11. Вода подводится через штуцеры 2 к внутренней полости шайбы 11, проходит вверх вдоль щели между закаливаемой деталью 6 и вторичной обмоткой 8 и выходит наружу через отверстия в шайбе 7. Такой индуктор-трансформатор легко перестраивается для закалки шеек других диаметров и длин. Для этого необходимо сменить простую деталь — вторичную обмотку 8 — и столь же простые детали, поддерживающие и центрирующие вал 6. Закаливаемый вал 6 вверху направляется шайбой 7, снизу центруется оправкой 10, которая сидит на водяной турбинке 1, врачающей вал в процессе нагрева и охлаждения; шпильки 9 и шайбы 5 стягивают всю конструкцию в единый узел.

Индуктор-трансформатор, предназначенный для термообработки шеек коленчатых валов, приведен на рис. 10-15. Вторичная обмотка его состоит из двух полуколец 1 и 2, которые поддерживаются на валах 4 и изолированы от них втулками. Первичная обмотка 3 закреплена на каретке (не показана) и может перемещаться вдоль оси закаливаемой детали. Закалочная жидкость подается через штуцеры 6 и полости 5, а затем через отверстия в зазор между нагреваемой поверхностью и индуктором. Здесь она проходит вдоль оси детали и охлаждает последнюю.

Основные недостатки разъемных индукторов, описанных в гл. 8,— быстрый износ, деформация контакта и всего индуктора — вызваны тем, что для обеспечения надежности контакта приходится прикладывать усилие в несколько тонн. Половины вторичной обмотки индуктора, показанного на рис. 10-15, вообще не прикасаются друг к другу. Между ними должен быть зазор 1,0—1,5 мм, который обеспечивается изоляционной прокладкой 7.

Мгновенные направления токов в обмотках показаны схематически стрелками. Токи, протекающие по поверхности внутреннего отверстия, дополняют друг друга до кругового. Для установки шейки коленчатого вала первичная обмотка сдвигается вдоль оси, половины вторичной обмотки разводятся, поворачиваясь около

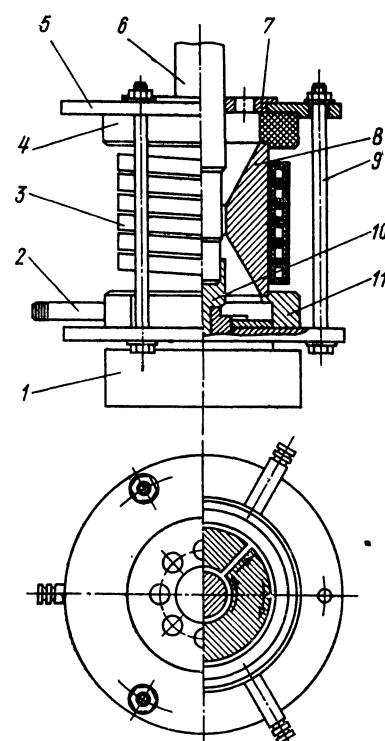


Рис. 10-14. Индуктор-трансформатор для закалки шеек валов электродвигателя

валов 4. Полукольца в разведенном положении показаны штриховыми линиями.

Такой же индуктор используется при термообработке кулачков распределительных валов. В этом случае внутренние отверстия вторичных полуобмоток имеют форму, повторяющую контур кулачка таким образом, чтобы зазор между полуобмотками и поверх-

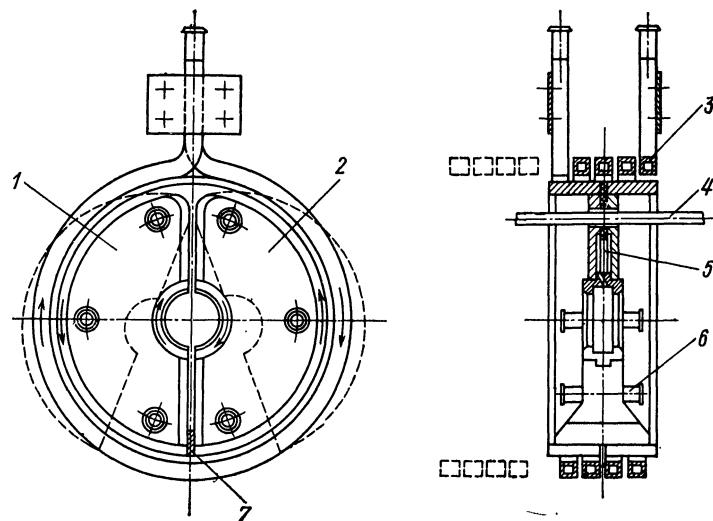


Рис. 10-15. Индуктор-трансформатор для закалки шеек коленчатых валов

ностью кулачка был 2—2,5 мм. При нагреве же в круглых цилиндрических индукторах (см. рис. 10-13) трудно получить закаленный слой одинаковой глубины по всей периферии кулачка.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ
**ОСНОВЫ РАСЧЕТА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ СКВОЗНОГО
НАГРЕВА СПЛОШНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ЗАГОТОВОК**

11-1. Основные соотношения

При сквозном нагреве под пластическую деформацию все сечение должно быть прогрето до температуры 900—1250° С, в связи с чем в конечной стадии нагрева весь металл становится немагнитным.

По условиям равномерности и быстроты нагрева частоту приходится выбирать таким образом, чтобы горячая глубина проник-

новения тока Δ_k была сравнительно близка к радиусу нагреваемого цилиндра. Поэтому при сквозном нагреве поверхностный эффект нельзя считать ярко выраженным, а электромагнитную волну плоской, как это делалось нами при рассмотрении поверхностной закалки и начальных стадий нагрева. Тем более это относится к нагреву изделий из немагнитных материалов.

В настоящей главе будут рассмотрены электромагнитные процессы в системе индуктор—цилиндр с постоянными по всему сечению магнитной проницаемостью и удельным сопротивлением. Такое допущение с достаточной точностью позволяет получить основные количественные характеристики системы при глубине прогрева x_k , большей, чем горячая глубина проникновения Δ_k (см. § 4-3 и 4-4), а также при нагреве немагнитных материалов. В последнем случае следует принимать значение удельного сопротивления, соответствующее температуре поверхности в рассматриваемый момент времени.

Важность рассмотрения последней стадии сквозного нагрева определяется ее длительностью, составляющей около 70% общего времени нагрева, а также тем, что в этой стадии к. п. д. индуктора имеет наименьшее значение вследствие потери нагреваемым объектом магнитных свойств. Поэтому частота должна выбираться по горячему режиму.

Основные соотношения мы получим для отрезка системы бесконечной длины. Соответствующие поправки будут внесены в дальнейшем.

Расчетная схема системы индуктор—нагреваемый цилиндр приведена на рис. 1-9.

Напряженность магнитного поля H направлена вдоль оси цилиндра; при условии бесконечной протяженности системы и осевой симметрии она зависит только от координаты R . Это же относится и к напряженности электрического поля.

Тогда уравнения (1-2) и (1-3) примут в цилиндрических координатах вид:

$$-\frac{d\dot{H}_m}{dR} = \gamma \dot{E}_m, \quad (11-1)$$

$$\frac{d\dot{E}_m}{dR} + \frac{\dot{E}_m}{R} = -j\omega\mu_0\mu\dot{H}_m. \quad (11-2)$$

Исключая \dot{E}_m уравнения (11-2), получим:

$$\frac{d^2\dot{H}_m}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{d\dot{H}_m}{dR} - j\omega\mu_0\mu\gamma\dot{H}_m = 0$$

или

$$\frac{d^2\dot{H}_m}{d(V-jm)^2} + \frac{1}{V-jm} \frac{d\dot{H}_m}{d(V-jm)} + \dot{H}_m = 0, \quad (11-3)$$

где $m = \sqrt{2}R/\Delta_2$ — относительная координата; R — переменный радиус.

Решение уравнения (11-3) имеет вид:

$$\dot{H}_m = c_1 J_0(\sqrt{-j}m) + c_2 N_0(\sqrt{-j}m). \quad (11-4)$$

Из формул (11-1) и (11-4) получим плотность тока:

$$\delta_m = \frac{\sqrt{-2j}}{\Delta_2} [c_1 J_1(\sqrt{-j}m) + c_2 N_1(\sqrt{-j}m)], \quad (11-5)$$

где J_0 и J_1 — символы функций Бесселя первого рода, нулевого и первого порядков; N_0 и N_1 — соответствующие функции Бесселя второго рода; Δ_2 — глубина проникновения тока в материал цилиндра.

Постоянные c_1 и c_2 определим из следующих условий:

- 1) на оси цилиндра при $R = 0$ плотность тока равна нулю;
- 2) на поверхности цилиндра при $R = R_2$ напряженность магнитного поля равна H_{me} .

На основании закона полного тока имеем:

$$H_{me} = \sqrt{2}\omega I_a/a.$$

Из первого условия и уравнения (11-5) имеем:

$$0 = c_1 J_1(0) + c_2 N_1(0).$$

Так как $J_1(0) = 0$, а $N_1(0) = -\infty$, то $c_2 = 0$.

Из второго условия получим:

$$H_{me} = c_1 J_0(\sqrt{-j}m_2),$$

откуда

$$c_1 = \frac{H_{me}}{J_0(\sqrt{-j}m_2)},$$

где $m_2 = \sqrt{2}R_2/\Delta_2$.

Подставив полученные значения постоянных интегрирования c_1 и c_2 в формулы (11-4) и (11-5), получим:

$$\dot{H}_m = H_{me} \frac{J_0(\sqrt{-j}m)}{J_0(\sqrt{-j}m_2)}, \quad (11-6)$$

$$\delta_m = \frac{\sqrt{-2j}}{\Delta_2} H_{me} \frac{J_1(\sqrt{-j}m)}{J_0(\sqrt{-j}m_2)}. \quad (11-7)$$

Выражение (11-7) приведено ранее в несколько измененном виде (см. § 9-2).

Так как $J_0(\sqrt{-j}m) = \operatorname{ber} m + j \operatorname{bei} m$, то выражения (11-6) и (11-7) можно представить в виде:

$$\dot{H}_m = H_{me} \frac{\operatorname{ber} m + j \operatorname{bei} m}{\operatorname{ber} m_2 + j \operatorname{bei} m_2}, \quad (11-8)$$

$$\delta_m = -\frac{\sqrt{2}H_{me}}{\Delta_2} \frac{\operatorname{ber}' m + j \operatorname{bei}' m}{\operatorname{ber} m_2 + j \operatorname{bei} m_2}. \quad (11-9)$$

Из этих выражений получим модули H_m и δ_m :

$$H_m = H_{me} \sqrt{\frac{\operatorname{ber}^2 m + \operatorname{bei}^2 m}{\operatorname{ber}^2 m_2 + \operatorname{bei}^2 m_2}}, \quad (11-10)$$

$$\delta_m = \frac{\sqrt{2}H_{me}}{\Delta_2} \sqrt{\frac{\operatorname{ber}'^2 m + \operatorname{bei}'^2 m}{\operatorname{ber}^2 m_2 + \operatorname{bei}^2 m_2}}. \quad (11-11)$$

Значения $\operatorname{ber} x$, $\operatorname{bei} x$, $\operatorname{ber}' x$, $\operatorname{bei}' x$ можно найти в таблицах (см. напр. [17, 50]).

При $m > 6$ $\operatorname{ber}^2 m + \operatorname{bei}^2 m \approx \operatorname{ber}'^2 m + \operatorname{bei}'^2 m \approx e^{\sqrt{2m}}/(2\pi m)$. Отсюда при $R_2 > 4\Delta_2$ ($m_2 > 6$) получаем формулы для плотности тока и напряженности магнитного поля:

$$\begin{aligned} H_m &\approx \frac{H_{me}}{\sqrt{R/R_2}} e^{\frac{R-R_2}{\Delta_2}} = \\ &= \frac{H_{me}}{\sqrt{1-x/R_2}} e^{-\frac{x}{\Delta_2}}, \\ \delta_m &\approx \frac{\sqrt{2}H_{me}}{\Delta_2 \sqrt{1-x/R_2}} e^{-\frac{x}{\Delta_2}}. \end{aligned}$$

При $m < 1$ $\operatorname{ber}^2 m + \operatorname{bei}^2 m \approx 1$, $\operatorname{ber}'^2 m + \operatorname{bei}'^2 m \approx m^2/4$. Тогда при $R_2 < \Delta_2$ ($m < 1$) будем иметь:

$$\delta_m \approx H_{me} R / \Delta_2^2, \quad H_m \approx H_{me}.$$

Таким образом, напряженность магнитного поля приблизительно постоянна по всему сечению.

На рис. 11-1 приведено распределение плотности тока по сечению цилиндра при различных значениях m_2 . Из кривых видно, что уже при $m_2 = 2$, что соответствует $\frac{R_2}{\Delta_2} = \sqrt{2}$, зависимость $\delta_m = f(R)$ близка к линейной. При этом и напряженность магнитного поля почти постоянна.

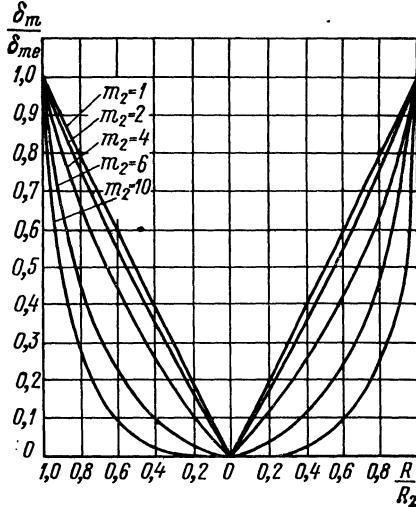


Рис. 11-1. Распределение плотности тока по сечению металлического цилиндра

11-2. Напряжение на индукторе

Напряжение U_a на зажимах отрезка a бесконечно длинного индуктора определяется общими выражениями (1-31), (1-40) и (1-42), в которых составляющие напряжения U_{r1} и U_s определяются, как и прежде. Необходимо вычислить составляющую напряжения U_{2m} , которая уравновешивает э. д. с., наведенную в индукторе магнитным потоком Φ_{2m} , проходящим внутри нагреваемого цилиндра.

В соответствии с формулой (1-37) эта составляющая

$$\dot{U}_{2M} = \frac{j\omega\omega\Phi_{2M}}{\sqrt{2}}.$$

Магнитный поток внутри цилиндра

$$\begin{aligned}\Phi_{2M} &= \int_0^{R_2} \mu_0 \mu \dot{H}_m 2\pi R dR = \frac{2\pi\mu_0\mu H_{me}}{\operatorname{ber} m_2 + j \operatorname{bei} m_2} \times \\ &\times \int_0^{R_2} (\operatorname{ber} m + j \operatorname{bei} m) R dR = \pi\mu_0\mu \Delta_2^2 m_2 H_{me} \frac{\operatorname{bei}' m_2 - j \operatorname{ber}' m_2}{\operatorname{ber} m_2 + j \operatorname{bei} m_2}.\end{aligned}$$

Разделив действительную и мнимую части и выразив H_{me} через ток в индукторе, получим:

$$\dot{U}_{2M} = j\omega\omega \frac{\Phi_{2M}}{\sqrt{2}} = I_u \left(w^2 \pi \rho_2 \frac{m_2^2}{a} A + j w^2 \pi \rho_2 \frac{m_2^2}{a} B \right) = I_u (r'_2 + j x'_{2M}),$$

где

$$A = \frac{2}{m_2} \frac{\operatorname{ber} m_2 \operatorname{ber}' m_2 + \operatorname{bei} m_2 \operatorname{bei}' m_2}{\operatorname{ber}^2 m_2 + \operatorname{bei}^2 m_2}, \quad (11-12)$$

$$B = \frac{2}{m_2} \frac{\operatorname{ber} m_2 \operatorname{bei}' m_2 - \operatorname{bei} m_2 \operatorname{ber}' m_2}{\operatorname{ber}^2 m_2 + \operatorname{bei}^2 m_2}. \quad (11-13)$$

Составляющие сопротивления цилиндра, приведенные к току длинного индуктора, равны:

$$r'_2 = w^2 \pi \rho_2 \frac{m_2^2}{a} A, \quad x'_{2M} = w^2 \pi \rho_2 \frac{m_2^2}{a} B. \quad (11-14)$$

Учитывая, что $m_2 = \frac{\sqrt{2}R_2}{\Delta_2} = \frac{D_2}{\sqrt{2}\Delta_2}$, можно представить сопротивления в виде:

$$r'_2 = w^2 \frac{\pi D_2}{a} \frac{\rho_2}{\Delta_2} \frac{m_2 A}{\sqrt{2}}, \quad x'_{2M} = w^2 \frac{\pi D_2}{a} \frac{\rho_2}{\Delta_2} \frac{m_2 B}{\sqrt{2}}. \quad (11-15)$$

При $m_2 > 6$ $A \approx B \approx \frac{\sqrt{2}}{m_2}$. Тогда формулы (11-15) переходят в формулу (1-38).

В табл. 11-1 и на рис. 11-2 приведены значения A и B в зависимости от m_2 . В табл. 11-2 даны приближенные формулы для вычисления A и B .

Таблица 11-1

Значения расчетных коэффициентов A и B

m_2	A	B	m_2	A	B	m_2	A	B
0,0	0,0	1,0	3,0	0,36	0,50	10,0	0,13	0,14
0,5	0,031	0,99	3,5	0,33	0,41	15,0	0,09	0,09
1,0	0,12	0,98	4,0	0,29	0,36	20,0	0,0707	0,0707
1,5	0,25	0,91	5,0	0,24	0,28	25,0	0,0565	0,0565
2,0	0,34	0,77	6,0	0,21	0,24	30,0	0,047	0,047
2,5	0,38	0,62	8,0	0,16	0,18	40,0	0,0353	0,0353

В реальном случае конечной длины индуктора и загрузки используется схема замещения индуктора, приведенная на рис. 5-5, и формулы приведения сопротивлений нагрузки (5-12) — (5-17). Таким образом, как и прежде:

$$r'_2 = cr_2 = c\omega^2 \pi \rho_2 \frac{m_2^2}{a_2} A, \quad (11-16)$$

$$\begin{aligned} x_n &= x_{1M} + c \times \\ &\times \left[x_s + x_{2M} + \frac{(x_s + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \right], \end{aligned} \quad (11-17)$$

где x_{2M} — находится по формуле (11-15), при $a = a_2$; x_s — реактивность рассеяния, находится по формуле (5-18); x_0 — определяется по формуле (5-25).

Рис. 11-2. Расчетные графики к формулам (11-14) и (11-15)

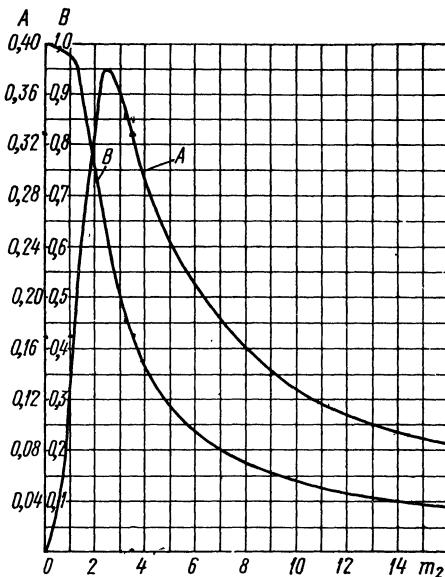


Таблица 11-2
Приближенные значения коэффициентов A и B

m_2	A	B	Ошиб- ка, %
$m_2 < 1$	$m_2^2/8$	1	< 1
$m_2 > 3$	$\left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2m_2} \right) \frac{2}{m_2}$	$\frac{\sqrt{2}}{m_2}$	< 6
$m_2 > 6$	$\sqrt{2}/m_2$	$\sqrt{2}/m_2$	< 5

11-3. Электрический к. п. д. индуктора

Выражение для электрического к. п. д. найдем обычным путем:

$$\eta_n = \frac{r'_2}{r_1 + r'_2} = \frac{1}{1 + r_1/r'_2}.$$

При $d_1 > 1,6 \Delta_1$

$$r_1 \approx \frac{\pi D_1}{a_1} w^2 \frac{\rho_1}{\Delta_1}.$$

Тогда, если индуктор достаточно длинный и $a_1 = a_2$, то имеем:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \frac{\sqrt{2}}{m_2 A}}$$

или после упрощений:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2} \frac{\sqrt{2}}{m_2 A}}} \quad (11-18)$$

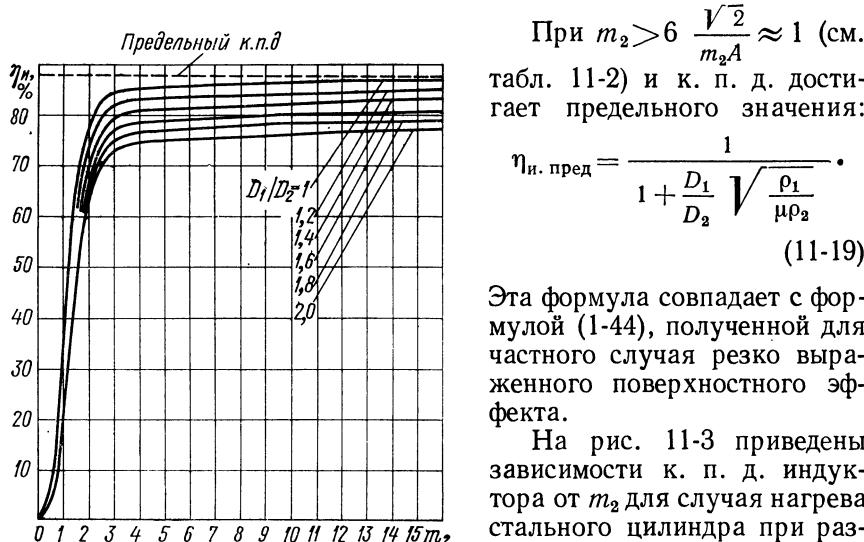


Рис. 11-3. Зависимость электрического к. п. д. индуктора от частоты при различных зазорах

При $m_2 > 6$ $\frac{\sqrt{2}}{m_2 A} \approx 1$ (см. табл. 11-2) и к. п. д. достигает предельного значения:

$$\eta_{i, \text{пред}} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}} \quad (11-19)$$

Эта формула совпадает с формулой (1-44), полученной для частного случая резко выраженного поверхностного эффекта.

На рис. 11-3 приведены зависимости к. п. д. индуктора от m_2 для случая нагрева стального цилиндра при различных отношениях диаметров D_1 и D_2 . В расчетах принято, что температура цилиндра по всему сечению около 800°C и, следовательно,

$\rho_2 \approx 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$, $\mu = 1$. Удельное сопротивление меди ρ_1 принято равным $2 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Если $\frac{a_1}{D_1} < 10$ и $a_1 > a_2$, то будем иметь:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{r_1}{c r_2}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{c} \frac{D_1}{D_2} \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2} \frac{\sqrt{2}}{m_2 A}}} \quad (11-20)$$

где c — коэффициент приведения активного сопротивления цилиндра.

В общем случае, когда толщина стенки провода индуктора не ограничивается какими-либо условиями, активное сопротивление

его выражается формулой (5-30). Учитывая также неплотность намотки витков индуктора получим:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{1}{c} \frac{D_1}{g D_2} \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2} \frac{2K \cos \varphi}{m_2 A}}}, \quad (11-21)$$

где $g = b_1 w / a_1$ — коэффициент заполнения; b_1 — осевая высота витка; $K, \cos \varphi = f(d_1/\Delta_1)$ (значения приведены в табл. 4-1 и 4-3 при $m = -1$).

С увеличением m_2 или частоты (что то же самое), если все размеры остаются постоянными, глубина проникновения тока в медь падает и формула (11-21) переходит в формулу (11-20).

Приведенные на рис. 11-3 зависимости $\eta_i = f(m_2)$ вычислены при $a_1/a_2 = 1,1$, $g = 0,85$, $c = 1$ и $d_1/\Delta_1 > 2$.

11-4. Выбор частоты

Выбор частоты при сквозном нагреве определяют два основных фактора: 1) электрический к. п. д. индуктора, который не должен сильно отличаться от предельного; 2) время нагрева, которое должно быть минимальным (с уменьшением времени нагрева резко снижается рост окалины и увеличивается производительность).

Очевидно, что наибольшая глубина проникновения тока соответствует прогреву сечения стального цилиндра выше точки магнитных превращений. Поэтому целесообразно при выборе частоты принимать $\mu = 1$ и $\rho_2 = 10^{-6}$ ом·м, что примерно соответствует температуре 800—850°С. Тогда можно считать ρ и μ постоянными по всему сечению, что позволяет воспользоваться формулами (11-19) — (11-21).

Если индуктор достаточно длинный и $D_2/a < 0,1$, то для оценки нижнего предела частоты можно использовать графики на рис. 11-3.

Считая, что к. п. д. индуктора должен составлять около 0,9 его предельного значения и принимая в качестве среднего значения $D_1/D_2 = 2$ (обычно $D_1/D_2 = 1,5 \div 2,5$), получим из рис. 11-3:

$$m_2 \geqslant 2,5.$$

Тогда нижний предел частоты определится соотношением:

$$f \geqslant \frac{3 \cdot 10^6 \rho_2}{\mu D_2^2}. \quad (11-22)$$

Подставив значения $\rho_2 = 10^{-6}$ ом·м и $\mu = 1$, получим для стали:

$$f \geqslant \frac{3}{D_2^2}. \quad (11-23)$$

Однако если $\frac{D_2}{a} > 0,1$, то коэффициент приведения активного сопротивления $c < 1$ и зависит от частоты (см. § 5-3), стремясь к $c_{\text{пред}}$ при $f \rightarrow \infty$.

В этом случае предельный к. п. д. индуктора

$$\eta_{и. пред} = \frac{1}{1 + \frac{1}{c_{пред}} \frac{D_1}{gD_2} \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2}}} . \quad (11-24)$$

Так как $c_{пред} = f(D_1/a_1, D_1/D_2, a_1/a_2)$, то каждому соотношению размеров соответствует свое значение предельного к. п. д., которое достигается при различных частотах.

Задаваясь определенным значением отношения $\eta_{и}/\eta_{и. пред}$, получим выражение для наименьшей допустимой частоты:

$$f \geq \frac{F_0}{D_2^2}, \quad (11-25)$$

где $F_0 = f\left(\frac{D_1}{a_1}, \frac{D_1}{D_2}, \frac{a_1}{a_2}, \frac{\rho_1}{\mu\rho_2}\right) = f_1\left(\frac{D_2}{a_2}, \frac{D_1}{D_2}, \frac{a_1}{a_2}, \frac{\rho_1}{\mu\rho_2}\right)$.

Ниже приведены значения F_0 , $m^2/сек$ (вычисленные при условиях $a_1 = a_2$, $D_1/D_2 = 2 \div 2,5$, $\rho_2 = 10^{-6}$ ом·м, $\mu = 1$) для случая нагрева стального цилиндра при разных значениях D_2/a :

D_2/a	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0
F_0	3	5,6	8,3	11,3	15,3	19	53

Таким образом, при $D_1/D_2 = 2 \div 2,5$ формулой (11-22) можно пользоваться только при $D_2/a < 0,1$. При $D_1/D_2 = 1,4 \div 1,6$ она может применяться при $D_2/a < 0,2$.

Эти данные могут быть использованы для приближенного определения минимальной частоты при нагреве любых немагнитных материалов. В этом случае в формулу (11-25) вместо F_0 следует подставить коэффициент

$$F = F_0 \rho_2 \cdot 10^6, \quad (11-26)$$

где ρ_2 — удельное сопротивление нагреваемого материала, ом·м.

Если $\rho_2 < 10^{-6}$ ом·м, то $\eta_{и} \leq 0,9 \eta_{и. пред}$. Например, при нагреве медного цилиндра $\eta_{и} \approx 0,8 \eta_{и. пред}$.

Верхний предел частоты можно получить, рассмотрев распределение плотности тока и мощности по сечению цилиндра при различных частотах. При $m_2 \leq 1$ распределения плотности тока и напряженности магнитного поля перестают зависеть от частоты при дальнейшем ее понижении (см. рис. 11-1). Следовательно, независимым от частоты становится и распределение мощности по сечению. Очевидно, что понятие глубины проникновения тока в этих условиях теряет прежний расчетный и физический смысл. Введем глубину активного слоя ξ и по аналогии с глубиной проникновения тока зададим ее такой, чтобы в слое выделялось 86,5% всей энергии, поступающей в цилиндр. Тогда при резком проявлении поверхностного эффекта $\xi = \Delta_2$, а при низких частотах $\xi < \Delta_2$, причем формально глубина проникновения тока Δ_2 может быть больше радиуса или диаметра цилиндра.

$$\text{При } m_2 < 1 \quad \delta_m = \frac{H_{me}}{\Delta_2^2} R.$$

Ток в слое dR на расстоянии R от оси цилиндра на единицу высоты (рис. 11-4)

$$dI^{(1)} = \delta_m dR.$$

Мощность на единицу высоты цилиндра

$$\begin{aligned} P^{(1)} &= \frac{1}{2} \int_0^{R_2} (\delta_m dR)^2 \frac{\rho_2 2\pi R}{dR \cdot 1} = \pi \rho_2 \int_0^{R_2} \delta_m^2 R dR = \\ &= \pi \rho_2 \frac{H_{me}^2}{\Delta_2^4} \int_0^{R_2} R^3 dR = \frac{\pi \rho_2 H_{me}^2}{4} \left(\frac{R_2}{\Delta_2}\right)^4, \text{ вт/м.} \end{aligned}$$

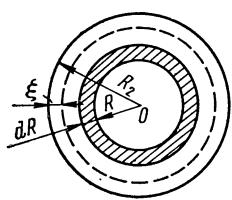


Рис. 11-4. Пояснение к выводу выражений (11-30) и (11-31)

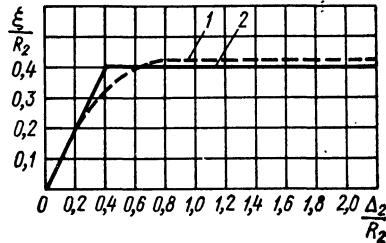


Рис. 11-5. Зависимость глубины активного слоя от частоты для цилиндра
1 — вычисленная; 2 — приближенная

Мощность на единицу высоты цилиндра, выделенная в слое ξ ,

$$P_{0 \div \xi}^{(1)} = \pi \rho_2 \frac{H_{me}^2}{\Delta_2^4} \int_{R_2 - \xi}^{R_2} R^3 dR = \frac{\pi \rho_2 H_{me}^2}{4} \left(\frac{R_2}{\Delta_2}\right)^4 \left[1 - \left(1 - \frac{\xi}{R_2}\right)^4\right].$$

По условию имеем:

$$\frac{P_{0 \div \xi}^{(1)}}{P^{(1)}} = 1 - \left(1 - \frac{\xi}{R_2}\right)^4 = 0,865.$$

Отсюда получаем:

$$\xi = \xi_{\text{пред}} \approx 0,4R_2. \quad (11-27)$$

В более общей форме для любых частот этот расчет был выполнен Г. А. Разореновым [36], которым показано, что, $\xi \approx \xi_{\text{пред}} \approx 0,4 R_2$ уже при $m_2 \leq 3,5$, что соответствует $R_2 \leq 2,5 \Delta_2$. При $R_2 > 2,5 \Delta_2$, $\xi \approx \Delta_2$. Зависимость $\xi/R_2 = f(\Delta_2/R_2)$, приведенная на рис. 11-5, может быть приближенно заменена ломаной линией. Тогда верхний предел частоты, обеспечивающей наибольшую глубину активного слоя, а следовательно,

и наименьшее время нагрева, при заданных температурах поверхности и оси цилиндра, определится из соотношений:

$$\frac{R_2}{\Delta_2} < 2,5$$

или

$$f < \frac{6 \cdot 10^6 \rho_2}{\mu D_2^2}. \quad (11-28)$$

Применимельно к нагреву стальных цилиндрических заготовок до температуры выше 750°C получим:

$$f < \frac{6}{D_2^2}. \quad (11-29)$$

Неравенства (11-23) и (11-29) можно объединить в одно:

$$\frac{3}{D_2^2} < f < \frac{6}{D_2^2}, \quad (11-30)$$

которое и определяет полосу оптимальных частот при нагреве длинных цилиндров.

Однако в практике в качестве нижнего предела следует пользоваться неравенством (11-25) (значения F_0 см. на стр. 176). Верхний предел частоты в формуле (11-30) имеет смысл только при $\frac{D_2}{a} < 0,2$. Для более коротких цилиндров частота ограничивается лишь снизу [неравенство (11-25)].

11-5. Выбор длины и числа витков индуктора

Опытным путем установлено, что равномерный нагрев заготовок по всей длине может быть обеспечен, если длина индуктора выбрана из соотношения:

$$a_1 = a_2 + (1 \div 1,5) D_1. \quad (11-31)$$

Если в индукторе находится одновременно несколько заготовок, то

$$a_2 = n a'_2. \quad (11-32)$$

В формулах (11-31) и (11-32) приняты обозначения: a_1 — длина индуктора; a_2 — общая длина заготовок, помещенных в индуктор; a'_2 — длина одной заготовки; n — число заготовок, одновременно нагреваемых в индукторе; D_1 — диаметр индуктора; D_2 — диаметр заготовки.

Обычно в случае нагревателя периодического действия в индуктор загружается одна заготовка. Если при заданной производительности промежуток времени между выходами заготовок из индуктора (темп выдачи заготовок) должен составлять t_0 , а время нагрева, определенное расчетом, равно t_k , то при $t_0 < t_k$ следует установить N индукторов:

$$N = t_k / t_0. \quad (11-33)$$

В нагревателях методического действия число одновременно нагреваемых заготовок находится по аналогичной формуле:

$$n = t_k/t_0, \quad (11-34)$$

где t_k — полное время нагрева заготовки; t_0 — темп выдачи.

Определив n , находим по формулам (11-31) и (11-32) длину индуктора a_1 . Если длина индуктора получается чрезмерно большой, то для удобства размещения в цехе ставят несколько более коротких индукторов, выдающих заготовки поочередно.

Число витков индуктора определяется напряжением генератора и потребляемой мощностью. Чем большее мощность, тем меньше число витков при том же напряжении.

При расчете и проектировании индуктора необходимо иметь в виду, что плотность тока в индуктирующем проводе не должна превышать 150 A/mm^2 ; она рассчитывается на активное сечение $S_a = b\Delta_1$ при $d_1 > 2\Delta_1$ и $S_a \approx bd_1$ при $d_1 < 1,5\Delta_1$, где b — осевая ширина витка; d_1 — толщина передней (внутренней) стенки провода; Δ_1 — глубина проникновения тока в медь.

Уменьшить плотность тока можно несколькими способами:

1) путем уменьшения подводимой мощности и соответственного снижения производительности, что приводит к необходимости увеличения числа нагревательных постов;

2) увеличением длины индуктора в нагревателях методического действия при сохранении прежней мощности и производительности;

3) размещением обмотки при частоте 50 Гц в нескольких слоях.

При повышенных частотах последний способ нельзя рекомендовать вследствие резкого повышения потерь в обмотках, особенно во внутренних слоях, которые могут оказаться нагруженными даже сильнее, чем однослойная обмотка индуктора такой же длины с тем же общим числом витков.

11-6. Определение внутреннего диаметра индуктора. Полный к. п. д. индуктора

Для получения высокого электрического к. п. д. индуктора, как видно из рис. 11-3, следует стремиться к наименьшему значению отношения D_1/D_2 . При сквозном нагреве, проводимом при малых удельных мощностях в течение сравнительно длительного времени и до высоких температур ($1100\text{--}1300^\circ \text{C}$), необходимо учитывать и термический к. п. д., так как нельзя пренебречь тепловыми потерями в окружающее пространство. Если отсутствует тепловая изоляция, то потери оказываются одного порядка с полезной энергией, затрачиваемой на нагрев заготовок. Опыт и расчет показывают, что наибольший полный к. п. д. индуктора

$$\eta = \eta_e \eta_t$$

(где η_e — электрический к. п. д.; η_t — термический к. п. д.) достигается при $D_1/D_2 \approx 1,4 \div 1,8$, если в качестве изоляции применяется шамот или жаростойкий бетон.

Под термическим к. п. д. понимается соотношение:

$$\eta_t = \frac{P_T}{P_2} = \frac{P_T}{P_T + \Delta P_T},$$

где P_T — полезная мощность; P_2 — полная мощность в заготовке; ΔP_T — мощность тепловых потерь.

Электрический к. п. д. $\eta_u = P_2/P_u$,

где P_u — мощность, подведенная к индуктору.

Максимум полного к. п. д. выражен слабо и он остается почти неизменным при $D_1/D_2 = 1,25 \div 2,0$. (11-35)

Тепловые потери можно легко определить, если тепловой поток через тепловую изоляцию стационарен. Это справедливо для нагревателя методического действия, через который заготовки идут непрерывно. С течением времени температура на обеих сторонах стенки изолирующего цилиндра принимает постоянные значения. Это также приблизительно справедливо и для нагревателя периодического (прерывистого) действия.

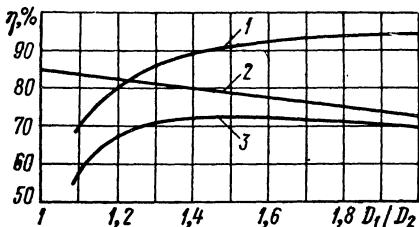


Рис. 11-6. Зависимость к. п. д. индуктора от отношения диаметров индуктора и заготовки

1 — $\eta_t = f(D_1/D_2)$; 2 — $\eta_u = f(D_1/D_2)$;

3 — $\eta = \eta_t \eta_u = f(D_1/D_2)$

$$\Delta P_T = \frac{2\pi\lambda a_1}{\ln \frac{D_1}{D_2}} (T_0 - T), \quad (11-36)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала тепловой изоляции; a_1 — длина изолирующего цилиндра; D_1 и D_2 — соответственно внешний и внутренний диаметры изолирующего цилиндра; T_0 — температура внутренней стороны цилиндра; T — температура внешней стороны цилиндра.

Будем считать, что температура внутренней стороны изолирующего цилиндра равна конечной температуре заготовки, а температура его наружной стороны приблизительно равна температуре индуктирующего провода, который прилегает к изолирующему цилинду.

Тогда имеем: $T_0 \approx 1300^\circ \text{C}$, $T \approx 60^\circ \text{C}$. В среднем коэффициенты теплопроводности шамота и бетона $\lambda = 1,12 \div 1,2 \text{ вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$.

Тогда мощность тепловых потерь

$$\Delta P_T \approx 3,74 \frac{a_1}{\lg \frac{D_1}{D_2}}, \text{ квт.} \quad (11-37)$$

На рис. 11-6 представлены зависимости термического, электрического и полного к. п. д. от отношения диаметров индуктора и заготовки. Зависимости вычислены для случая нагрева заготовки диаметром 10 см на частоте 500 гц, которая близка к верхней границе полосы оптимальных частот.

Максимум полного к. п. д., как видно из рис. 11-6, достигается при $D_1/D_2 \approx 1,6$; при изменении D_1/D_2 от 1,2 до 2 полный к. п. д. не более чем на 4%, а при изменении D_1/D_2 от 1,3 до 2 — не более чем на 2,5%.

В реальных условиях внутренний диаметр теплоизолирующего цилиндра выбирается больше диаметра заготовки, исходя из следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} D_3 &= (1,1 - 1,2) D_2, \\ D_3 - D_2 &> 1 \text{ см}, \end{aligned} \right\} \quad (11-38)$$

где D_3 — внутренний диаметр теплоизолирующего цилиндра. Диаметр D_3 следует подставлять в формулу (11-37) вместо D_2 .

Учитывая соотношения (11-38), следует выбирать диаметр индуктора по верхнему пределу формулы (11-35).

11-7. Расчет охлаждения индуктора

Индукторы для сквозного нагрева всегда изготавливаются многовитковыми и представляют для воды, протекающей через них, большое гидравлическое сопротивление. Для того чтобы обеспечить необходимое для охлаждения индуктора количество воды при заданном давлении на входе, требуется выбрать соответствующее внутреннее сечение трубки. Его можно определить расчетным путем по известному количеству тепла, которое должно быть отведено водой.

Индуктор нагревается током, проходящим по нему, и теплом, теряемым нагреваемой заготовкой через тепловую изоляцию.

Порядок расчета следующий.

1. Полное количество тепла, нагревающего индуктор,

$$\Delta P = P_T \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right), \text{ квт},$$

где P_T — полезная мощность в заготовке; η — полный к. п. д. индуктора.

2. Количество охлаждающей воды.

$$W = \frac{0,24 \Delta P}{T_2 - T_1} 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{сек},$$

где T_1 — температура воды на входе в индуктор, °C; T_2 — температура воды на выходе. Она не должна быть выше 50° C, так как иначе возможно местное парообразование и перегорание индуктора.

3. Скорость воды

$$v = W/s, \text{ м/сек}, \quad (11-39)$$

где v — линейная скорость воды; s — площадь отверстия трубы, м^2 . Обычно $v = 1 \div 1,5 \text{ м/сек}$.

4. Проверка на турбулентность: наилучшее охлаждение обеспечивается при вихревом (турбулентном) движении воды, что осуществляется при достаточной скорости ее течения. При этом происходит интенсивное перемешивание воды в трубке. При турбулентном движении воды должно удовлетворяться неравенство [15, 45]:

$$\text{Re} = \frac{vD_0}{\mu'} > 2300, \quad (11-40)$$

где Re — критерий Рейнольдса; v — скорость воды, м/сек ; μ' — кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{сек}$; D_0 — гидравлический эквивалент диаметра, м ,

$$D_0 = 4s/F, \text{ м}, \quad (11-41)$$

где s — площадь отверстия, м^2 ; F — внутренний периметр трубы, участвующий в теплообмене, м .

Если трубка цилиндрическая, то $D_0 = D$, где D — внутренний диаметр трубы.

В индукторах обычно применяется прямоугольная трубка и тепло выделяется на одной стороне, обращенной внутрь индуктора. Однако вследствие хорошей теплопроводности меди можно считать весь периметр участвующим в теплообмене.

Кинематическая вязкость зависит от температуры. Определяется она при средней температуре

$$T = (T_2 + T_1)/2.$$

Ниже приведены значения кинематической вязкости (в $\text{м}^2/\text{сек}$) в зависимости от температуры, $^{\circ}\text{C}$:

T	$\mu' \cdot 10^6$	20	40	60	80	100
		1,01	0,661	0,482	0,368	0,296

Если $\text{Re} < 2300$, следует увеличить внутреннее сечение трубы или скорость движения воды. В последнем случае возможно придется делать несколько подводов воды, с тем чтобы уменьшить гидравлическое сопротивление и понизить давление.

5. Перепад давления по длине трубы [15, 45]

$$\Delta p \approx 4,9 \cdot 10^2 \frac{\lambda_1 v^2 l}{D_0}, \text{ Н/м}^2, \quad (11-42)$$

где λ_1 — коэффициент сопротивления при шероховатости первого рода; l — длина трубы индуктора, м ; $l = \pi D_{1cp} w$ (D_{1cp} — средний диаметр витка).

С течением времени внутренняя стенка трубы покрывается на-
кипью, осаждающейся в виде мелких неровностей, что и учиты-
вается коэффициентом сопротивления

$$\lambda_1 = 10^{-2} (k/D_0)^{0.314}, \quad (11-43)$$

где k — коэффициент шероховатости первого рода (шероховатость первого рода, так называемая зернистая — худший вид шерохова-
тости); $k = 1,5 \div 5 \text{ м}$.

Большее значение относится к старым трубкам. В среднем можно считать, что $k = 3 \text{ м}$.

6. Число ветвей охлаждения индуктора находится следующим образом. Наибольший допустимый перепад давления определяется техническими данными системы охлаждения. При питании индуктора водой от городского водопровода перепад давления не должен превышать $2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. Поэтому, если из расчета по формуле (11-42) получается перепад давления выше заданного, оказывается необходимо делить индуктор по охлаждению на несколько секций. Текло, выделяющееся в каждой из n секций, $\Delta P_n = \Delta P/n$, а потребное количество и скорость воды: $W_n = W/n$ и $v_n = v/n$

Тогда перепад давления в секции

$$\Delta p_n = \Delta p/n^3. \quad (11-44)$$

Так как Δp_n задается, а Δp известно из расчета по формуле (11-42), то легко определить число секций

$$n = \sqrt[3]{\Delta p / \Delta p_n}. \quad (11-45)$$

Необходимо проверить, удовлетворяется ли условие турбулент-
ного течения воды (11-40) при скорости $v_n = v/n$, и, если нужно,
увеличить последнюю. При этом снова находится перепад давления
и число ветвей охлаждения.

11-8. Расчет индуктора

Для расчета заданы диаметр заготовки $D_2 = 10 \text{ см}$; длина заготовки $a_2 = 30 \text{ см}$; частота $f = 2500 \text{ гц}$; удельная мощность $p_0 = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ квт/см}^2$; время нагрева $t_k = 300 \text{ сек}$; напряжение на индукторе $U_i = 750 \text{ в}$; темп вы-
дачи заготовок $t_0 = 200 \text{ сек}$.

Удельная мощность и время нагрева определены из предварительного теплового расчета (§ 2-5). В примере рассчитывается индуктор для нагрева-
теля периодического действия.

1. Диаметр индуктора

$$D_1 = (1,5 \div 2,5) D_2 = 1,7 \cdot 0,1 = 0,17 \text{ м.}$$

2. Длина индуктора:

для нагревателя периодического действия

$$a_1 = a_2 + (1 \div 1,5) D_1 = 0,3 + 0,17 = 0,47 \text{ м};$$

для нагревателя методического действия число заготовок в индукторе $n = t_k/t_0$, следовательно $a_1 = n a'_2 + (1 \div 1,5) D_1$.

3. Горячая глубина проникновения тока

$$\Delta_k = 0,5/V\bar{f} = 0,5/V\sqrt{2500} = 0,01 \text{ м};$$

$$m_2 = D_2/(V\sqrt{2}\Delta_k) = 7,07.$$

В этом случае, так как $m_2 > 4$ ($D_2/\Delta_k > 5, 6$), может быть использован и порядок расчета, приведенный в § 5-6.

4. Активное и внутреннее реактивное сопротивления цилиндра:

$$r_2 = \pi\rho_2 m_2^2 A/a_2 = \pi \cdot 10^{-6} \cdot 7,07^2 \cdot 0,18/0,3 = 9,43 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$x_{2M} = r_2 B/A = 9,43 \cdot 10^{-5} \cdot 0,207/0,18 = 10,85 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$A = 0,18$; $B = 0,207$ — находятся по табл. 11-1 или из рис. 11-3. Для стали при 800°C $\rho_2 \approx 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

5. Реактивное сопротивление:

$$x_0 = x_{10} k_1 a_1 / (a_1 - a_2 k_1) = 18,25 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$x_{10} = \omega \mu_0 S_1 / a_1 = \omega \pi^2 D_1^2 10^{-7} / a_1 = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$k_1 = f(D_1/a_1) = f(0,362) = 0,863$ — находится из рис. 5-6.

6. Реактивность рассеяния индуктора:

$$x_s = \omega \pi^2 (D_1^2 - D_2^2) \cdot 10^{-7} / a_2 = 9,75 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

7. Коэффициент приведения активного сопротивления цилиндра

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2M}}{x_0}\right)^2} = 0,393.$$

8. Приведенное активное сопротивление цилиндра

$$r'_2 = cr_2 = 0,393 \cdot 9,43 \cdot 10^{-5} = 3,86 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

9. Приведенное реактивное сопротивление

$$x'_2 = c \left[x_s + x_{2M} + \frac{(x_s + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \right] = 6,47 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

10. Толщина индуцирующего провода выбирается по возможности близкой к оптимальной, равной $d_1 \approx 1,6 \Delta_1$;

$$\Delta_1 = 0,07/V\bar{f} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d_{1\text{опт}} = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Толщину передней стенки выбираем равной $d_1 = 2 \text{ мм}$.

11. Активное и внутреннее реактивное сопротивления индуцирующего провода:

$$r_{1\text{п}} = \rho_1 \pi D_1' / (a_1 d_1 g) = 2 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,17 / (0,47 \cdot 0,002 \cdot 0,85) = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$D_1' = D_1 + \Delta_1 \text{ при } d_1 > \Delta_1; D_1' = D_1 + d_1 \text{ при } d_1 < \Delta_1.$$

Обычно $d_1 \ll D_1$, $\Delta_1 \ll D_1$ и $D_1' \approx D_1$; $\rho_1 \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$ $d_1/\Delta_1 = 1,43$; $k_r = 1,33$; $k_x = 1,25$ (см. рис. 5-8);

$$r_1 = r_{1\text{п}} k_r = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ ом}; x_{1M} = 1,68 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

12. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_3 = r_1 + r'_2 = 5,64 \cdot 10^{-5} \text{ ом}; x_3 = x_{1M} + x'_2 = 66,4 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$z_3 = \sqrt{x_3^2 + r_3^2} = 66,7 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

13. Коэффициент полезного действия индуктора

$$\eta_i = r_2' / r_3 = 3,86 / 5,64 = 0,685.$$

14. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_i = r_3 / z_3 = 5,64 / 66,7 = 0,0848.$$

15. Полезная средняя мощность

$$P_T = p_0 \pi D_2 a_2' n = 5,4 \cdot 10^5 \pi \cdot 0,1 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 50,8 \text{ квт.}$$

16. Тепловые потери через изолирующий цилиндр

$$\Delta P_T = 3,74 a_1 / \lg(D_1 / D_2) = 8 \text{ квт.}$$

17. Полная средняя мощность в заготовке

$$P_2 = P_T + \Delta P_T = 50,8 + 8 = 58,8 \text{ квт.}$$

Если индуктор имеет металлические направляющие, то потери в них учитываются увеличением мощности:

$$P_2 = 1,05 (P_T + \Delta P_T). \quad (11-46)$$

18. Ток в индукторе:

$$I_i' = \sqrt{P_2 / r_2'} = \sqrt{58,8 \cdot 10^3 / (3,86 \cdot 10^{-5})} = 39100 \text{ а.}$$

19. Плотность тока в индукторе $\delta_i \approx I_i' 10^{-6} / (a_1 \Delta_1 g) = 3,91 \cdot 10^{-4}$.

$\cdot 10^{-6} / (0,47 \cdot 0,0014 \cdot 0,85) \approx 70 \text{ а/мм}^2$; если $d_1 > \Delta_1$; $\delta_i \approx I_i' 10^{-6} / (a_1 d_1 g)$, если $d_1 \leq \Delta_1$.

20. Напряжение на индукторе

$$U_i' = I_i' z_3 = 3,91 \cdot 10^4 \cdot 6,67 \cdot 10^{-4} = 26,05 \text{ в.}$$

21. Полный к. п. д. индуктора

$$\eta_t = P_T / P_2 = 50,8 / 58,8 = 0,865; \eta = \eta_i \eta_t = 0,592.$$

22. Мощность, подведенная к индуктору,

$$P_i = P_2 / \eta_i = P_T / \eta = 58,8 / 0,685 = 86 \text{ квт.}$$

23. Число витков индуктора

$$w = U_i' / U_i = 750 / 26,05 = 28,8 \text{ вит.}$$

Принимаем $w = 29$ вит.; высота витка

$$b = a_1 g / (w + 1) = 0,47 \cdot 0,85 / 30 = 0,0133 \text{ м.}$$

24. Ток в индукторе

$$I_i = I_i' / w = 3,91 \cdot 10^4 / 29 = 1350 \text{ а.}$$

25. Активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_i = w^2 r_3 = 4,74 \cdot 10^{-2} \text{ ом}; x_i = w^2 x_3 = 55,8 \cdot 10^{-2} \text{ ом};$$

$$z_i = w^2 z_3 = 56,1 \cdot 10^{-2} \text{ ом.}$$

26. Количество охлаждающей воды

$$W = 0,24 \Delta P \cdot 10^{-3} / (T_2 - T_1) = 0,24 \cdot 35 \cdot 10^{-3} / 30 = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{сек};$$

$$\Delta P = P_T (1 / \eta - 1) = 50,8 (1 / 0,592 - 1) = 35 \text{ квт};$$

$T_2 - T_1 = 30^\circ \text{ С}$ — разность температур воды на выходе и входе.

27. Площадь отверстия трубы

$$s = W/v = 2,8 \cdot 10^{-4} / 2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 1,4 \text{ см}^2.$$

Принимаем скорость воды $v = 2 \text{ м/сек}$, обычно $v = 1 \div 2 \text{ м/сек}$.

Если выбрать трубку с размерами $19 \times 13,5 \times 2$, то $s = 0,95 \cdot 1,5 = 1,425 \text{ см}^2$. Такая прямоугольная трубка примерно соответствует цилиндрической диаметром $1,8 \text{ см}$.

28. Проверка на турбулентность:

$$D_0 = 4s/F = 4 \cdot 1,425 \cdot 10^{-4} / [2(0,95 + 1,5) \cdot 10^{-2}] \approx 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$Re = vD_0/\mu' = 2 \cdot 1,16 \cdot 10^{-2} / (0,66 \cdot 10^{-6}) = 35200 > 2300,$$

т. е. движение воды турбулентное.

29. Перепад давления по длине трубы:

$$\lambda_1 = 10^{-2} (k/D_0)^{0,314} = 10^{-2} [3/(1,16 \cdot 10^{-2})]^{0,314} = 5,68 \cdot 10^{-2};$$

принимаем $k = 3 \text{ м}$;

$$l_h = \pi D_{1cp} w = \pi 0,189 \cdot 29 = 17,2 \text{ м};$$

$$\Delta p = 4,9 \cdot 10^3 \lambda_1 v^2 l_h / D_0 = 4,9 \cdot 10^3 \cdot 5,68 \cdot 10^{-2} \cdot 2^2 \cdot 17,2 / (1,16 \cdot 10^{-2}) = 1,65 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2.$$

Чтобы учесть возможные местные уменьшения сечения трубы при пайке, а также повороты у выводов, следует полученный результат увеличить в 1,5 раза:

$$\Delta p' = 1,5 \cdot 1,65 \cdot 10^5 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2.$$

30. Число ветвей охлаждения следует выбирать равным двум, так как перепад давления больше давления в городском водопроводе ($1,986 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$).

В общем случае число ветвей $n = \sqrt[3]{\Delta p / \Delta p_n}$,

где Δp_n — допустимый перепад давления.

Скорость воды в каждой ветви уменьшается $v_n = v/n$. Поэтому необходимо провести повторную проверку на турбулентность.

31. Число индукторов в нагревателе

$$N = t_k/t_0 = 300/200 = 1,5.$$

Следовательно, нагреватель должен иметь два индуктора.

11-9. Нагрев пучка цилиндров

Вместо цилиндра радиусом R_2 поместим в длинный индуктор N цилиндров радиусом $R_n = R_2/n$ (рис. 11-7). Тогда при плотном расположении цилиндров $N = \pi n^2 / 4 \approx 0,78 n^2$.

Допустим, что электромагнитные процессы в цилиндрах протекают независимо. Тогда полная мощность в пучке цилиндров

$$P_N = \sum_{n=1}^N P_n = 0,78 n^2 I_u^2 \omega^2 \pi \rho_2 m_n^2 A_n / a, \quad (11-47)$$

где

$$m_n = \frac{\sqrt{2} R_n}{\Delta_2} = \frac{\sqrt{2} R_2}{\Delta_2 n} = \frac{m_2}{n};$$

$A_n = f(m_n)$ — находится по табл. 11-1.

Формула (11-47) может быть представлена в виде:

$$P_N = 0,78 \omega^2 I_u^2 \pi \rho_2 m_2^2 A_n / a.$$

Для сплошного цилиндра радиуса R_2 имеем:

$$P_2 = I_u^2 r_2 = \omega^2 I_u^2 \pi \rho_2 m_2^2 A / a,$$

где $A = f(m_2)$.

Отношение мощностей

$$\frac{P_N}{P_2} = 0,78 \frac{A_n}{A}.$$

Очевидно, что к. п. д. индуктора при замене одного цилиндра радиусом R_2 пучком цилиндров радиусом R_n останется неизменным, если при прежнем токе в индукторе останется неизменной по-

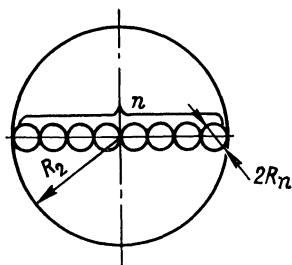


Рис. 11-7. Расположение цилиндров в пучке

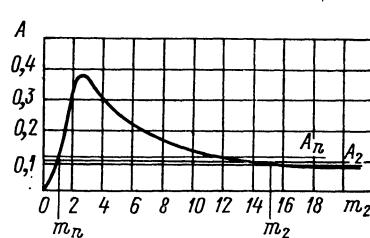


Рис. 11-8. Пояснение к выбору частоты и соотношения размеров цилиндров

лезнная мощность. Тогда условие неизменности к. п. д. индуктора примет вид:

$$\frac{P_N}{P_2} = 0,78 \frac{A_n}{A} = 1$$

и

$$A = 0,78 A_n. \quad (11-48)$$

Параметр m_2 выбирается таким образом, чтобы для большого цилиндра обеспечивался к. п. д. индуктора, близкий к предельному. После этого по формуле (11-48) определяем A_n и графически находим m_n (рис. 11-8) слева от максимума кривой.

При нахождении соотношений размеров цилиндров может быть три случая:

1) заданы диаметр индуктора и частота; тогда известно m_2 и из рис. 11-8 находятся m_n , а затем R_n и n ;

2) задан радиус R_n и частота; тогда по известному m_n из того же графика находятся m_2 , R_n и n ;

3) заданы R_n и ρ_2 ; для любой частоты определяются соответствующие m_n , m_2 , n и R_2 , при этом задаются такой частотой, чтобы соблюдалось $m_n < 1,2$; при соблюдении этого условия, как то видно из формулы (11-48) и табл. 11-1, к. п. д. индуктора близок к предельному.

В практике цилиндры нагреваются в пучке в том случае, когда при данной частоте невозможно получить высокий к. п. д., нагревая один цилиндр, а также, если требуется повысить производительность нагревателя. Нагрев пучка цилиндров представляет некоторую аналогию индукционной печи в начале плавки.

К. п. д. индуктора запишется в виде:

$$\eta_{\text{и}} = \frac{1}{1 + \frac{r_1}{0,78n^2r_n}} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{g0,78D_n} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2} \frac{\sqrt{2}}{m_2A_n}}}$$

или

$$\eta_{\text{и}} = \left(1 + \frac{D_1}{gND_n} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2} \frac{\sqrt{2}}{m_nA_n}} \right)^{-1},$$

где $N = 0,78 n^2$ — число цилиндров; D_n — диаметр малого цилиндра.

Принципиально, при плотном расположении цилиндров можно подобрать их число так, что к. п. д. индуктора даже несколько превысит предельный к. п. д. при нагреве одного цилиндра. Практически это, как правило, невыполнимо по условиям размещения цилиндров.

Расчет индуктора проводится так же, как было указано в § 11-8. Изменения вносятся только в пп. 4 и 6 порядка расчета:

$$r_2 = 0,78n^2r_n = 0,78n^2\omega^2\pi\rho_2m_n^2A_n/a_2$$

или

$$r_2 = 0,78\omega^2\pi\rho_2m_n^2A_n/a_2, \text{ ом};$$

$$x_{2M} = r_2B_n/A_n, \text{ ом};$$

$$x_s = \omega\pi^2(D_1^2 - ND_n^2) \cdot 10^{-7}/a_2, \text{ ом}$$

или

$$x_s = \omega\pi^2(D_1^2 - 0,78D_n^2) \cdot 10^{-7}/a_2, \text{ ом}.$$

Обычно цилиндры заполняют полость диаметром D_2 неплотно и $N < 0,78 n^2$, где $n = D_2/D_n$. Тогда для расчета следует пользоваться формулами:

$$r_2 = N\omega^2\pi\rho_2m_n^2A_n/a_2, \quad x_{2M} = r_2B_n/A_n,$$

$$x_s = \omega\pi^2(D_1^2 - ND_n^2) 10^{-7}/a_2.$$

В этом случае к. п. д. индуктора снижается, но остается выше, чем при нагреве одного цилиндра диаметром D_n .

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ
ОСНОВЫ РАСЧЕТА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА
ЗАГОТОВОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

12-1. Основные соотношения

Общая постановка вопроса, принятая в настоящей главе, совпадает с изложенной в § 11-1.

Основные соотношения будут получены для широкой пластины большой длины, помещенной в длинный индуктор с прямоугольной формой поперечного сечения. Это позволит считать поле в зазоре между индуктором и пластиной равномерным, вне индуктора равным нулю и ограничиться рассмотрением процессов на широких гранях пластины. Будем также считать, что магнитная проницаемость и удельное сопротивление постоянны во всех точках сечения.

Поправки, касающиеся соотношения размеров граней и соотношения длины пластины с соответствующими размерами индуктора, будут внесены при составлении практической схемы расчета.

На рис. 12-1 приведен эскиз системы индуктор — нагреваемая плата и расположение осей координат (см. также рис. 1-10).

Используя уравнения (1-7), (1-8) и (1-9), получим напряженность магнитного поля внутри пластины:

$$H_m = A_1 e^{\alpha_1 x} + A_2 e^{\alpha_2 x},$$

где $\alpha_{1,2} = \pm k(1+j) = \pm \alpha$;

$$k = \frac{1}{\Delta_2} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu}{2\rho_2}}.$$

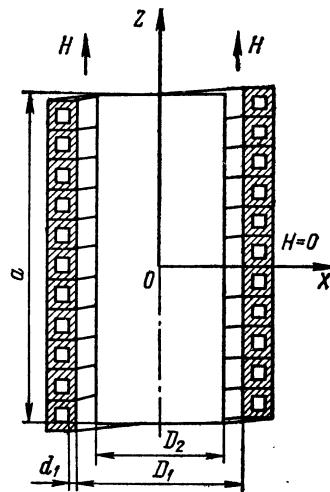


Рис. 12-1. Эскиз системы индуктор — пластина

Из условий симметрии имеем:

$$x = \pm D_2/2, \quad H_m = H_{me}$$

и

$$A_1 e^{+\alpha D_2/2} + A_2 e^{-\alpha D_2/2} = A_1 e^{-\alpha D_2/2} + A_2 e^{+\alpha D_2/2}.$$

Следовательно,

$$A_1 = A_2 = A.$$

Отсюда получим [39]:

$$H_{me} = 2A \operatorname{ch}(\alpha D_2/2)$$

и

$$H_m = H_{me} \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch}(\alpha D_2/2)}. \quad (12-1)$$

На основании уравнения (1-7) имеем:

$$\delta_m = -\frac{dH_m}{dx} = -\alpha H_{me} \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{ch}(\alpha D_2/2)} \quad (12-2)$$

или

$$\delta_m = \dot{\delta}_{me} \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh}(\alpha D_2/2)}, \quad (12-3)$$

так как

$$\dot{\delta}_{me} = \pm \alpha H_{me} \frac{\operatorname{sh}(\alpha D_2/2)}{\operatorname{ch}(\alpha D_2/2)}. \quad (12-4)$$

Модули этих выражений равны:

$$H_m = H_{me} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(2x/\Delta_2) + \cos(2x/\Delta_2)}{\operatorname{ch}(D_2/\Delta_2) + \cos(D_2/\Delta_2)}}, \quad (12-5)$$

$$\delta_m = \frac{\sqrt{2} H_{me}}{\Delta_2} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(2x/\Delta_2) - \cos(2x/\Delta_2)}{\operatorname{ch}(D_2/\Delta_2) + \cos(D_2/\Delta_2)}}, \quad (12-6)$$

$$\delta_m = \dot{\delta}_{me} \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(2x/\Delta_2) - \cos(2x/\Delta_2)}{\operatorname{ch}(D_2/\Delta_2) - \cos(D_2/\Delta_2)}}. \quad (12-7)$$

При относительно высоких частотах, когда $D_2/\Delta_2 > 4$, имеем:

$$H_m \approx H_{me} e^{k(x-D_2/2)} = H_{me} e^{-x'/\Delta_2}, \quad \delta_m = \dot{\delta}_{me} e^{-x'/\Delta_2},$$

где $x' = \frac{D_2}{2} - x$ — расстояние от поверхности пластины.

При относительно низких частотах, соответствующих $D_2/\Delta_2 < 1$, получим:

$$\operatorname{ch} \frac{D_2}{\Delta_2} \approx 1 + \left(\frac{D_2}{\Delta_2}\right)^2 / 2, \quad \cos \frac{D_2}{\Delta_2} \approx 1 - \left(\frac{D_2}{\Delta_2}\right)^2 / 2$$

и

$$H_m \approx H_{me}, \quad \delta_m \approx \frac{2x}{D_2} \dot{\delta}_{me}.$$

Таким образом, так же, как и в цилиндре, напряженность магнитного поля постоянна во всем сечении, а плотность тока линейно убывает к середине пластины. Качественно картина распределения плотности тока соответствует приведенной на рис. 11-1.

12-2. Напряжение на индукторе

Составляющие напряжения U_u на зажимах длинного индуктора U_{r1} и U_s вычисляются, как и прежде (см. § 1-8).

Составляющая напряжения, которая уравновешивает э. д. с., наведенную в индукторе магнитным потоком Φ_{2M} , проходящим через поперечное сечение пластины [см. формулу (1-37)],

$$U_{2M} = j\omega \Phi_{2M} / \sqrt{2}.$$

Используя формулу (12-1), получим:

$$\Phi_{2M} = \mu_0 \mu_2 b_2 \int_0^{D_2/2} H_m dx = \frac{2\mu_0 \mu_2 H_{me}}{\operatorname{ch}(\alpha D_2/2)} \int_0^{D_2/2} \operatorname{ch} \alpha x dx.$$

Учитывая, что $H_{me} = \sqrt{2}\omega I_n/a$, после простых преобразований получим:

$$\dot{\Phi}_{2M} = \sqrt{2} b_2 \mu_0 \mu_2 \frac{\omega I_n}{a} \left[X \left(\frac{D_2}{\Delta_2} \right) - jR \left(\frac{D_2}{\Delta_2} \right) \right],$$

$$R \left(\frac{D_2}{\Delta_2} \right) = R = \frac{\operatorname{sh}(D_2/\Delta_2) - \sin(D_2/\Delta_2)}{\operatorname{ch}(D_2/\Delta_2) + \cos(D_2/\Delta_2)}, \quad (12-8)$$

$$X \left(\frac{D_2}{\Delta_2} \right) = X = \frac{\operatorname{sh}(D_2/\Delta_2) + \sin(D_2/\Delta_2)}{\operatorname{ch}(D_2/\Delta_2) + \cos(D_2/\Delta_2)}. \quad (12-9)$$

Тогда имеем:

$$\dot{U}_{2M} = I_n \omega^2 \frac{2b_2}{a} \frac{\rho_2}{\Delta_2} (R + jX) = I_n (r_2 + jx_{2M}).$$

Составляющие сопротивлений пластины, приведенные к току длинного индуктора, равны:

$$r_2 = \omega^2 2b_2 \rho_2 R / (a \Delta_2), \quad (12-10)$$

$$x_{2M} = \omega^2 2b_2 \rho_2 X / (a \Delta_2). \quad (12-11)$$

Множители R и X представляют собой поправки к сопротивлениям, вычисленным при условии резко выраженного поверхностного эффекта.

Если

$$\frac{D_2}{\Delta_2} \geqslant 3,$$

$$R \approx X \approx 1. \quad (12-12)$$

Если

$$\frac{D_2}{\Delta_2} < 1,$$

$$R \approx (D_2/\Delta_2)^3/6, \quad X \approx D_2/\Delta_2. \quad (12-13)$$

Значения R и X приведены в табл. 12-1.

Формулы (12-10) и (12-11) обеспечивают достаточную точность вычислений при соотношении сторон пластины $b_2/D_2 > 5$.

Если $5 > b_2/D_2 > 3$, то вместо $2b_2$ следует подставлять эффективный периметр пластины

$$F_{2g} = 2(b_2 + D_2) - 4\xi, \quad (12-14)$$

где ξ — глубина активного слоя (см. рис. 12-4).

Таблица 12-1

D_2/Δ_2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	3,0	4,0	5,0	∞
R	0	0,0013	0,011	0,0358	0,089	0,160	0,266	0,396	0,540	0,812	1,09	1,050	1,009	1,0
X	0	0,200	0,400	0,598	0,790	0,970	1,123	1,246	1,325	1,354	1,12	0,996	0,976	1,0

Таким образом, имеем:

$$r_2 = w^2 F_{23} \rho_2 R / (a \Delta_2), \quad (12-15)$$

$$x_{2M} = w^2 F_{23} \rho_2 X / (a \Delta_2). \quad (12-16)$$

При $b_2/D_2 < 3$ ошибка при вычислении r_2 и x_{2M} возрастает в особенности при относительно низких частотах. При $b_2/D_2 = 1$ и $D_2/\Delta_2 = 4$ она, например, составляет + 20% при вычислении r_2 .

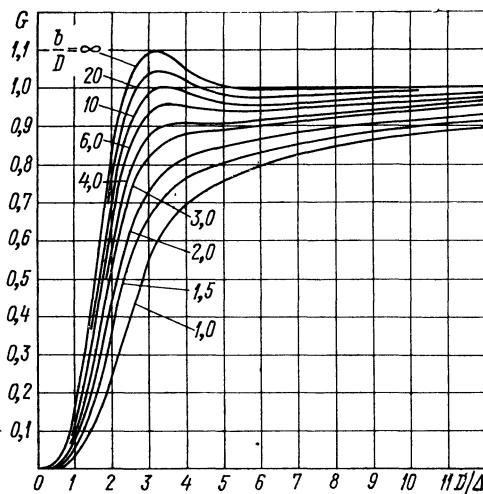


Рис. 12-2. График функции G для вычисления активного сопротивления пластины

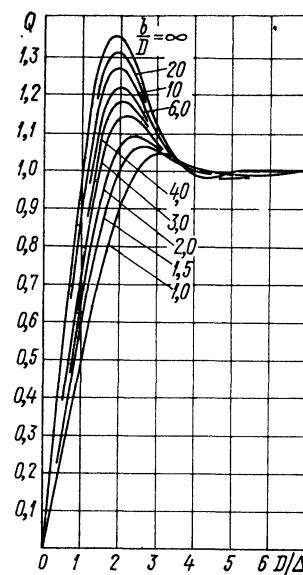


Рис. 12-3. График функции Q для вычисления внутреннего реактивного сопротивления пластины

и — 25% при вычислении x_{2M} . При уменьшении D_2/Δ_2 рост ошибок продолжается.

Более точно можно определить r_2 и x_{2M} узких пластин по формулам [33, 38, 48]:

$$r_2 = w^2 F_{23} \rho_2 G / (a \Delta_2), \quad (12-17)$$

$$x_{2M} = w^2 F_{23} \rho_2 Q / (a \Delta_2), \quad (12-18)$$

где $G, Q = f(D_2/\Delta_2, b_2/D_2)$; $F_{23} = 2(b_2 + D_2)$ — периметр пластины.

Графики функций G и Q приведены на рис. 12-2 и 12-3. При $b_2/D_2 > 20$ они превращаются в функции R и X .

Для учета конечной длины индуктора и пластины используется схема замещения на рис. 5-5 и формулы (5-12) — (5-17).

Таким образом, имеем:

$$r'_2 = cr_2, \quad r_u = r_1 + r'_2; \\ x_u = x_{1m} + C \left[x_s + x_{2m} + \frac{(x_s + x_{2m})^2 + r_2^2}{x_0} \right]; \\ r_1 = r_{1n} k_r, \quad x_{1m} = r_{1n} k_x.$$

В приведенных формулах r_2 и x_{2m} находятся по формулам (12-15) и (12-16) или (12-17) и (12-18). Условное сопротивление индуктирующего провода постоянному току находится из соотношения:

$$r_{1n} = w^2 F_1 \rho_1 / (ga_1 d_1), \quad (12-19)$$

где $F_1 = 2(b_1 + D_1)$ — периметр витка индуктора; g — коэффициент заполнения.

Реактивность рассеяния x_s находится в соответствии с общей формулой (5-18) и равна:

$$x_s = \omega \mu_0 (S_1 - S_2) w^2 / a_2 \approx \omega \mu_0 (b_1 D_1 - b_2 D_2) w^2 / a_2, \quad (12-20)$$

где b_1 и D_1 — ширина и высота окна индуктора.

Знак приближенного равенства в формуле (12-20) учитывает отступление окна индуктора от прямоугольной формы.

Реактивное сопротивление x_0 рассчитывается по формуле (5-25) по площади поперечного сечения индуктора $S_1 \approx b_1 D_1$.

12-3. Электрический к. п. д. индуктора

Если в проводе индуктора поверхностный эффект выражен резко, т. е. $d_1 > 1,5 \Delta_1$, то

$$r_1 \approx w^2 F_1 \rho_1 / (ga\Delta_1).$$

Тогда, используя формулу (12-15) или (12-17), получим электрический к. п. д. индуктора в виде:

$$\eta_u = \left(1 + \frac{F_1}{gF_{2n}} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2}} \frac{1}{R} \right)^{-1} \quad (12-21)$$

или

$$\eta_u = \left(1 + \frac{F_1}{gF_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2}} \frac{1}{G} \right)^{-1}. \quad (12-22)$$

При $D_2/\Delta_2 > 3$, если $b_2/D_2 > 4$, и при $D_2/\Delta_2 > 7$, если $b_2/D_2 = 1$, к. п. д. достигает предельного значения:

$$\eta_u = \eta_{u, \text{пред}} = \left(1 + \frac{F_1}{gF_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2}} \right)^{-1}, \quad (12-23)$$

что совпадает с формулой (1-48).

Как видно из табл. 12-1, при $D_2/\Delta_2 = \pi$ наблюдается максимум функции R , что приводит к появлению слабого максимума к. п. д. при нагреве широких пластин ($b_2/D_2 > 10$). Однако при ре-

ально применяемых зазорах этот максимум практически отсутствует.

Зависимость к. п. д. от частоты или от отношения D_2/Δ_2 подобна зависимости, приведенной на рис. 11-3.

При нагреве пластины с любым отношением сторон с учетом длины пластины и индуктора

$$\eta_i = \left(1 + \frac{1}{c} \frac{F_1}{gF_2} \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2}} \frac{1}{G_*} \right)^{-1}, \quad (12-24)$$

если $d_1 > 1,5 \Delta_1$ и

$$\eta_i = \left(1 + \frac{1}{c} \frac{F_1}{gF_2} \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2}} \frac{\sqrt{2}K \cos \varphi}{G} \right)^{-1}, \quad (12-25)$$

если $d_1 < 1,5 \Delta_1$.

12-4. Выбор частоты

При выборе частоты остаются в силе соображения, приведенные в § 11-4.

Определим нижний предел частоты. Если индуктор достаточно длинный, а ширина пластины велика ($b_2/D_2 > 10$), то из формулы (12-21) и табл. 12-1 получим, что при отношении периметров индуктора и пластины $F_1/F_2 = 2 \div 2,5$, соответствующем обычно применяемым зазорам, к. п. д. индуктора составляет 0,9—0,95 предельного значения, если

$$\frac{D_2}{\Delta_2} \geqslant 2.$$

Тогда нижний предел частоты определится неравенством:

$$f \geqslant \frac{10^6 \rho_2}{\mu D_2^2}. \quad (12-26)$$

Подставив значения $\rho_2 = 10^{-6}$ ом·м и $\mu = 1$, получим для стали:

$$f \geqslant \frac{1}{D_2^2}. \quad (12-27)$$

Таким образом, минимальная частота оказывается значительно ниже, чем для цилиндра [формулы (11-26) и (11-27)].

Однако с уменьшением ширины пластины даже при длинном индукторе нижний предел частоты, как это следует из формулы (12-22) и графиков на рис. 12-2, повышается и при $b_2/D_2 = 1$ достигает того же значения, что и для цилиндра. При этом в формулы (11-22) и (11-23) следует вместо D_2 подставлять сторону квадрата.

При уменьшении длины индуктора повышение предельной частоты продолжается и она выражается неравенством, подобным неравенству (11-25):

$$f \geqslant \frac{F}{D_2^2}. \quad (12-28)$$

Значения коэффициента F , вычисленные подобно тому, как было указано в § 11-4, при $D_1/D_2 = 2,5$, приведены в табл. 12-2.

Таблица 12-2
Значения коэффициента F для определения нижнего предела частоты при нагреве стальной пластины

D_2/a	D_2/b_2				
	0	0,1	0,2	0,5	1,0
0	1,0	1,0	1,0	1,8	3,0
0,1	1,0	1,07	1,2	2,4	5,0
0,25	1,13	1,40	1,60	3,25	8,0
0,5	1,53	2,05	2,48	4,77	13,0
1,0	2,3	3,3	4,85	14,0	25,0

Из табл. 12-2 видно, что формулой (12-27) можно пользоваться только при $D_2/b_2 \leq 0,2$ и $D_2/a \leq 0,1$.

Для немагнитных материалов, у которых $\rho_2 \neq 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{м}$, следует вместо F подставлять коэффициент

$$F' = F\rho_2 \cdot 10^6, \quad (12-28a)$$

где ρ_2 — удельное сопротивление нагреваемого материала, $\text{ом}\cdot\text{м}$.

Верхний предел частоты получим, рассмотрев зависимость глубины активного слоя ξ от частоты.

Полная удельная мощность, сообщаемая пластине,

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho_2 \int_0^{D_2/2} \delta_m^2 dx. \quad (12-29)$$

Мощность в активном слое ξ , отнесенная к единице поверхности, выражается:

$$P_{0/\xi} = \frac{1}{2} \rho_2 \int_{\frac{D_2}{2} - \xi}^{D_2/2} \delta_m^2 dx. \quad (12-30)$$

После подстановки в формулы (12-29) и (12-30) выражения для плотности тока (12-7) и несложных преобразований получим:

$$P_0 = \frac{\delta_{me}^2 \rho_2 \Delta_2}{4} \frac{\sinh(D_2/\Delta_2) - \sin(D_2/\Delta_2)}{\cosh(D_2/\Delta_2) - \cos(D_2/\Delta_2)}, \quad (12-31)$$

$$P_{0/\xi} = \frac{\delta_{me}^2 \rho_2 \Delta_2}{4} \left\{ \frac{\sinh(D_2/\Delta_2) - \sin(D_2/\Delta_2)}{\cosh(D_2/\Delta_2) - \cos(D_2/\Delta_2)} - \frac{\sinh[(D_2 - 2\xi)/\Delta_2] - \sin[(D_2 - 2\xi)/\Delta_2]}{\cosh(D_2/\Delta_2) - \cos(D_2/\Delta_2)} \right\}. \quad (12-32)$$

По определению глубины активного слоя имеем:

$$\frac{p_0 + \xi}{p_0} = 1 - \frac{\operatorname{sh} \frac{D_2}{\Delta_2} \left(1 - \frac{2\xi}{D_2}\right) - \sin \frac{D_2}{\Delta_2} \left(1 - \frac{2\xi}{D_2}\right)}{\operatorname{sh} \frac{D_2}{\Delta_2} - \sin \frac{D_2}{\Delta_2}} = 0,865. \quad (12-33)$$

Уравнение (12-33) позволяет легко определить ξ . На рис. 12-4 представлена зависимость $\frac{\xi}{D_2} = f\left(\frac{\Delta_2}{D_2}\right)$, вычисленная по уравнению (12-33). Из рисунка видно:

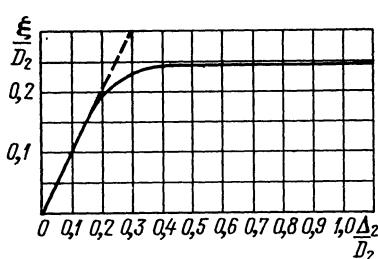


Рис. 12-4. Зависимость эффективной глубины активного слоя от частоты

если $0 < \frac{D_2}{\Delta_2} < 5$,

$$0,242 \geq \frac{\xi}{D_2} \geq 0,2, \quad (12-34)$$

если $\frac{D_2}{\Delta_2} > 5$,

$$\xi \approx \Delta_2. \quad (12-35)$$

Из (12-34) получим верхний предел частоты:

$$f < \frac{6 \cdot 10^6 \rho_2}{\mu D_2^2}. \quad (12-36)$$

Для стали после точки магнитных превращений будем иметь:

$$f < \frac{6}{D_2^2}. \quad (12-37)$$

Выражения (12-36) и (12-37) аналогичны соответствующим выражениям (11-28) и (11-29), полученным для цилиндра.

Выражениями (12-36) и (12-37) следует пользоваться, если они не противоречат условию (12-28).

12-5. Выбор размеров и числа витков индуктора

Длина и число витков индуктора выбираются так, как указано в § 11-5 [см. формулы (11-31) — (11-34)].

При выборе высоты окна индуктора для нагрева заготовок квадратного сечения следует руководствоваться формулой (11-35). Для более широких заготовок ($b_2/D_2 > 1$) пределы могут быть расширены, так как зависимость электрического к. п. д. индуктора от высоты окна D_1 ослабевает. Тогда имеем:

$$\frac{D_1}{D_2} = 1,25 \div 3. \quad (12-38)$$

Высота окна в тепловой изоляции D_3 выбирается по соотношениям (11-38).

Мощность тепловых потерь через тепловую изоляцию подсчитывается по формуле:

$$\Delta P_T = \lambda a_1 F_{из} (T_0 - T) / d_{из}, \quad (12-39)$$

где λ — коэффициент теплопроводности тепловой изоляции; a_1 — длина индуктора; $d_{из}$ — толщина тепловой изоляции; T_0 и T — соответственно температуры внутренней и внешней сторон теплоизолирующей стенки; $F_{из}$ — средний периметр тепловой изоляции.

Принимая для всех величин, входящих в формулу (12-39), те же значения, что и в § 11-6, получим:

$$\Delta P_T \approx 1,35 \frac{a_1 F_{из}}{d_{из}}, \text{ квт.} \quad (12-40)$$

12-6. Расчет индуктора

Порядок расчета, приведенный в § 11-8, остается без изменения. Поэтому приведем лишь численный пример расчета индуктора для нагрева стальной пластины в горячем режиме с соответствующими пояснениями.

Задана стальная пластина с размерами $D_2 = 10 \text{ см}$, $b_2 = 100 \text{ см}$, $a_2 = 100 \text{ см}$, нагревается до температуры $T_0 = 1300^\circ \text{C}$ при максимальном перепаде температуры $\Delta T = 100^\circ \text{C}$ и при частоте $f = 500 \text{ Гц}$. Напряжение на индукторе $U_n = 1500 \text{ в}$.

Определим время нагрева и среднюю мощность. Находим расчетную толщину пластины D_2' :

$$\Delta_k = \frac{0,5}{\sqrt{f}} = 0,022 \text{ м}; \quad \frac{D_2}{\Delta_k} = 4,55; \quad \xi \approx 0,22 D_2 = 0,22 \text{ м}; \quad D_2' = D_2 - \xi = 0,078 \text{ м.}$$

Так как $b_2/D_2 = 10$, то для определения времени нагрева используем формулу (2-65):

$$t_k = 11,5 \cdot 10^4 \cdot D_2'^3 = 11,5 \cdot 10^4 \cdot 0,078^3 = 700 \text{ сек.}$$

При $b_2/D_2 < 5$, вместо коэффициента 11,5 следует подставить в формулу коэффициент $K = f(D_2/b_2)$ из графика 2-6.

Средняя полезная мощность [формула (2-56)] равна: $G = D_2 b_2 a_2 \gamma = 0,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 780 \text{ кг}$;

$$P_T = 8,4 \cdot 10^5 \frac{780}{700} = 9,38 \cdot 10^5 \text{ вт} = 938 \text{ квт};$$

$$p_0 = \frac{9,38 \cdot 10^5}{2(0,1 + 1) \cdot 1} = 4,26 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2.$$

Перейдем к расчету индуктора:

1. Размер окна индуктора: $D_1 = 2 \cdot 0,1 = 0,2 \text{ м}$; $2\Delta D = 2\Delta b = 0,1 \text{ м}$;
 $b_1 = b_2 + 2\Delta b = 1,1 \text{ м}$.

2. Длина индуктора $a_1 = 1,0 + 0,2 = 1,2 \text{ м}$.

3. Горячая глубина проникновения тока: $\Delta_k = 0,022 \text{ м}$; $D_2/\Delta_k = 4,55$.

4. Активное и внутреннее реактивное сопротивления пластины.

Из рис. 12-2 и 12-3 находим: $G = f(D_2/\Delta_2, b_2/D_2) = f(4,55; 10) = 0,95$;
 $Q = f(4,55; 10) = 1$.

При $\frac{b_2}{D_2} > 20$ следует пользоваться функциями R и X (табл. 12-1 и рис. 12-2).

По формулам (12-17) и (12-18) находим:

$$r_2 = \frac{2(1,0 + 0,1)}{1} \cdot \frac{10^{-6}}{0,022} \cdot 0,95 = 9,5 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$x_{2M} = \frac{r_2}{0,95} = 10 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

5. Реактивное сопротивление x_0 :

$$x_{10} = 2\pi \cdot 500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{1,1 \cdot 0,2}{1,2} = 72,3 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

из рис. 5-7 находим $k_1 = f(D_1/a_1, D_1/b_1) = f(0,167; 0,182) = 0,866$;

$$x_0 = 72,3 \cdot 10^{-5} \frac{1,2 \cdot 0,866}{1,2 - 0,866 \cdot 1,0} = 223 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

6. Реактивность рассеяния

$$x_s = 2\pi \cdot 500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{1,1 \cdot 0,2 - 1,0 \cdot 0,1}{1,0} = 47,4 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

7. Коэффициент приведения активного сопротивления пластины

$$c = \frac{1}{\left(\frac{9,5}{223}\right)^2 + \left(1 + \frac{10 + 47,4}{223}\right)^2} = 0,633.$$

8. Приведенное активное сопротивление $r'_2 = 0,633 \cdot 9,5 \cdot 10^{-5} = 6,01 \cdot 10^{-5} \text{ ом}$.

9. Приведенное реактивное сопротивление вторичной цепи

$$x'_2 = 0,633 \left[(47,4 + 10) \cdot 10^{-5} + \frac{57,4^2 + 9,5^2}{223} \cdot 10^{-5} \right] = 45,9 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

10. Толщина индуктирующего провода

$$\Delta_1 = \frac{0,07}{\sqrt{500}} = 3,13 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Выбираем толщину передней стенки $d_1 = 3 \text{ мм}$.

11. Активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктора:

$$\frac{d_1}{\Delta_1} = 0,96; \quad k_r \approx 1; \quad k_x \approx 0,6;$$

$$r_1 \approx r_{1n} = 2 \cdot 10^{-8} \frac{2(0,2 + 1,1)}{1,2 \cdot 0,003 \cdot 0,85} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$x_{1M} = 0,6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

12. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора: $r_9 = (1,7 + 6,01) \cdot 10^{-5} = 7,71 \cdot 10^{-5} \text{ ом}$; $x_9 = (1,02 + 45,9) \cdot 10^{-5} = 46,92 \cdot 10^{-5} \text{ ом}$;

$$z_9 = \sqrt{46,92^2 + 7,71^2} \cdot 10^{-5} = 47,5 \cdot 10^{-5} \text{ ом}.$$

$$13. \text{ К. п. д. индуктора } \eta_i = \frac{6,01}{7,71} = 0,78.$$

14. Коэффициент мощности индуктора $\cos \varphi_i = \frac{7,71}{47,5} = 0,162$.

15. Полная полезная мощность на нагрев пластины $P_T = 938 \text{ квт}$.

16. Тепловые потери через изоляцию: $d_{из} = 0,04 \text{ м}; F_{из} = 2(D_1 + b_1) - 4d_{из} = 2,44 \text{ м}$;

$$\Delta P_t = 1,35 \cdot \frac{1,2 \cdot 2,44}{0,04} = 99 \text{ квт.}$$

17. Полная мощность в пластине $P_2 = 938 + 99 = 1037 \text{ квт}$.

18. Ток в индукторе

$$I_i' = \sqrt{\frac{1037 \cdot 10^3}{6,01 \cdot 10^{-5}}} = 13,19 \cdot 10^4 \text{ а.}$$

19. Плотность тока в индукторе

$$\delta_i = \frac{13,19 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 0,003 \cdot 0,85} = 43 \text{ а/мм}^2.$$

20. Напряжение на индукторе $U_i' = 13,19 \cdot 10^4 \cdot 47,5 \cdot 10^{-5} = 62,6 \text{ в.}$

21. Полный к. п. д. индуктора: $\eta_t = \frac{938}{1037} = 0,904; \eta = 0,78 \cdot 0,904 = 0,704$.

22. Полная мощность, подведенная к индуктору, $P_i = \frac{1037}{0,78} = 1330 \text{ квт.}$

23. Число витков индуктора $w = \frac{1500}{62,6} = 24 \text{ вит.}; \text{ высота витка}$

$$b \approx \frac{1,2}{25} 0,85 = 0,0408 \text{ м.}$$

24. Ток в индукторе $I_i = \frac{13,19 \cdot 10^4}{24} = 5500 \text{ а.}$

25. Активное, реактивное и полное сопротивления индуктора: $r_i = 24^2 \cdot 7,71 \cdot 10^{-5} = 4,44 \cdot 10^{-2} \text{ ом}; x_i = 24^2 \cdot 46,92 \cdot 10^{-5} = 27 \cdot 10^{-2} \text{ ом}; z_i = 24^2 \cdot 47,5 \cdot 10^{-5} = 27,3 \cdot 10^{-2} \text{ ом.}$

26. Количество охлаждающей воды:

$$\Delta P = 938 \left(\frac{1}{0,704} - 1 \right) = 392 \text{ квт};$$

$$W = \frac{0,24 \cdot 392}{30} 10^{-3} = 3,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек.}$$

27. Площадь отверстия трубы с размерами $41 \times 38 \times 3$ (что соответствует цилиндрической трубке с диаметром 5 см): $s = 3,5 \cdot 3,2 = 11,2 \text{ см}^2$; скорость воды

$$v = \frac{3,13 \cdot 10^{-3}}{11,2 \cdot 10^{-4}} = 2,8 \text{ м/сек.}$$

28. Проверка на турбулентность:

$$D_0 = \frac{4 \cdot 11,2 \cdot 10^{-4}}{2(3,5 + 3,2) \cdot 10^{-2}} = 3,34 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$Re = \frac{2,8 \cdot 3,34 \cdot 10^{-2}}{0,66 \cdot 10^{-6}} = 142000 > 2300,$$

т. е. движение воды турбулентное.

29. Перепад давления по длине трубки:

$$\lambda_1 = 10^{-2} \left(\frac{3}{(3,34 \cdot 10^{-2})} \right)^{0,314} = 4,1 \cdot 10^{-2};$$

$$l = [2(0,2 + 1,1) + 4 \cdot 0,038] \cdot 24 = 66 \text{ м};$$

$$\Delta p = \frac{4,1 \cdot 10^{-2} \cdot 2,8^2 \cdot 66 \cdot 4,9}{3,34 \cdot 10^{-2}} \cdot 10^2 = 3,12 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2.$$

$$\Delta p' = 1,5 \cdot 3,12 \cdot 10^5 = 4,68 \cdot 10^5 \text{ Н/м}.$$

Перепад давления слишком велик и индуктор следует разделить на две секции. Тогда скорость воды уменьшается в два раза, а перепад давления в восемь раз. Условие турбулентности при этом сохраняется ($Re = 71\,000$).

12-7. Нагрев пакета пластин

Как было показано в § 11-9, при нагреве цилиндров можно получить к. п. д. индуктора, даже несколько превышающий предельный, если поместить в него вместо одного цилиндра большого диаметра пучок цилиндров малого диаметра.

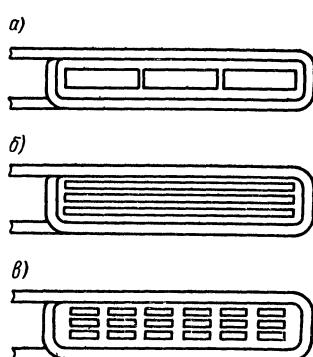


Рис. 12-5. Расположение пластин в индукторе: а — не приводит к существенному повышению к. п. д. при $b/D > 3$; б — способствует повышению к. п. д.; в — способствует повышению к. п. д. при $b_N/(nD_n) > 3$

Подобное же явление наблюдается и при нагреве пластин [39]. В последнем случае, однако, особое значение приобретает вопрос о взаимном расположении пластин. Если, например, расположить пластины в один ряд, как показано на рис. 12-5, а, то повышения к. п. д. не произойдет, так как при малой толщине пластин активные сопротивления индуктора и нагрузки увеличатся почти в одинаковой степени. На рис. 12-5, б пластины расположены одна над другой. Если ширина пластин в несколько раз превосходит толщину пакета, то будет достигнуто заметное повышение к. п. д., так как сопротивление индуктора возрастет незначительно, в то время как сопротивление пакета будет пропорционально числу пластин.

Если ширина пластин относительно велика $\left(\frac{D_2}{b_2} < 0,1 \right)$, то для активного

и внутреннего реактивного сопротивления пакета можно написать:

$$r_2 = nr_{2n} \approx \frac{2b_2}{a_2} \frac{\rho_2}{\Delta_2} nR_n, \quad x_{2m} = nx_{2mn} = r_2 \frac{X_n}{R_n},$$

где n — число пластин в пакете; R_n , $X_n = f(D_n/\Delta_2)$; D_n — толщина пластины.

К. п. д. индуктора

$$\eta_i = \left(1 + \frac{1}{c} \frac{b_1}{gb_2} \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2} \frac{1}{nR_n}} \right)^{-1}. \quad (12-41)$$

Однако, если толщина пакета $D_2 \approx nD_n$ будет близкой к его ширине, выражение (12-41) окажется несправедливым. Тогда полезно расположить пластины, как показано на рис. 12-5, в. В этом случае n в формуле (12-41) соответствует числу слоев в пакете, а $b_2 = Nb_N$, где N число пластин в слое. Такое расположение однако неудобно для практического применения вследствие значительного усложнения конструкции нагревательных постов.

В табл. 12-3 приведено число слоев пластин в пакете (n), необходимое для получения предельного к. п. д. индуктора, а также $\eta_{ii} = 0,9 \eta_{ii\text{ пред}}$ и $\eta_{ii} = 0,8 \eta_{ii\text{ пред}}$ в зависимости от относительной толщины пластины D_n/Δ_2 .

Таблица 12-3

Число пластин в пакете, необходимое для получения заданного к. п. д.

nR_n	η_{ii}	n при D_n/Δ_2									
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0
1	$\eta_{ii\text{ пред}}$	∞	1000	91	28	12	6	4	2-3	2	1
0,54	$0,9\eta_{ii\text{ пред}}$	∞	540	50	15	6	3	2	2	1	1
0,4	$0,8\eta_{ii\text{ пред}}$	∞	396	36	11	5	2-3	1-2	1-2	1	1

Практическое применение имеет, однако, лишь область $\frac{D_n}{\Delta_2} > 0,8$, так как укладка большого числа пластин в индукторе в особенности в автоматизированных нагревателях представляет большие неудобства. Например, при $f = 8000$ гц наименьшая толщина стальных пластин составит 4,5 мм.

В общем случае пластин любой ширины имеем:

$$r_2 = nN r_{2n} = \frac{F_2}{a_2} \frac{\rho_2}{\Delta_2} nG_n x_{2m} = r_2 \frac{Q_n}{G_n},$$

$$F_2 = N 2 (b_N + D_n),$$

где n — число слоев; N — число пластин в слое; G_n и $Q_n = f (D_n/\Delta_2, b_N/D_n)$:

К. п. д. индуктора

$$\eta_{ii} = \left(1 + \frac{1}{c} \frac{F_1}{gF_2} \frac{a_2}{a_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu\rho_2}} \frac{1}{nG_n} \right)^{-1}.$$

Индуктор рассчитывается подобно тому, как было указано в § 11-9 для пучка цилиндров.

Необходимо указать, что все сказанное справедливо только при условии электрической изоляции между слоями пластин.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ
РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

13-1. Изменение потребляемой мощности в процессе нагрева и этапы нагрева

В индукторе нагревателя периодического действия заготовки нагреваются по одной от исходной температуры до заданной. По мере повышения температуры заготовки меняется удельное сопротивление ее материала, причем у большинства металлов и сплавов оно возрастает.

Относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов по достижении точки магнитных превращений падает до единицы. Вследствие этого изменяются электрические параметры заготовки и эквивалентные параметры индуктора; потребление энергии заготовкой оказывается непостоянным (см. § 2-1), так же как и загрузка генератора.

Обычно напряжение генератора стабилизировано и напряжение на индукторе можно считать приблизительно постоян-

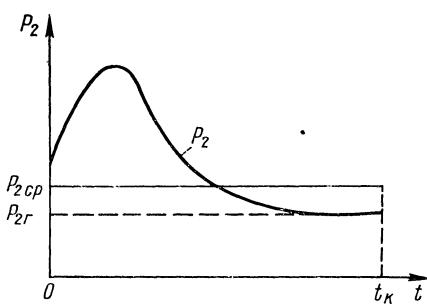


Рис. 13-1. Зависимость передаваемой в заготовку мощности от времени при сквозном нагреве

ным. Характерные зависимости потребляемой заготовкой мощности от времени $P_2 = f(t)$ при $U_i = \text{const}$ приведены на рис. 13-1. Вид кривой зависит от соотношения размеров индуктора и заготовки, от относительной длины системы, а также от степени проявления поверхностного эффекта. При больших зазорах, применяемых при сквозном нагреве, мощность, потребляемая в начальных стадиях нагрева стальных заготовок, всегда больше, чем в конце.

Расчеты и опыт показывают, что при относительном разнообразии зависимостей $P_2 = f(t)$ отношение мощности в горячем режиме P_{2r} к средней мощности за цикл нагрева P_{2cp} колеблется в узких пределах. Для ориентировочных расчетов можно принять [38]:

$$P_{2r} \approx 0,72 P_{2cp}. \quad (13-1)$$

Тогда, рассчитав индуктор на эту мощность только в горячем режиме, мы обеспечим весь нормальный цикл нагрева и требуемую среднюю мощность P_{2cp} .

Тогда в примерах, приведенных в § 11-8 и 12-6, необходимо при вычислении I'_i вместо P_2 подставить $P_{2r} = 0,72 P_2$. В результате снизится напряжение на условном одновитковом индукторе U'_i и увеличится число витков w . Расчет охлаждения индуктора остается

без изменения, так как средние тепловые потери определяются средней потребляемой мощностью.

При нагреве заготовок из немагнитных материалов мощность P_2 монотонно возрастает или падает в процессе нагрева в соответствии с характером изменения удельного сопротивления приблизительно пропорционально $\sqrt{\rho_2}$. При нагреве немагнитных металлов и сплавов электрический расчет индуктора обычно целесообразно производить по среднему значению удельного сопротивления, как было указано в предыдущих двух главах (§ 11-8 и 12-6).

В тех случаях, когда необходимо знать пределы активной и реактивной мощности, подводимой к индуктору, что важно, например, при разработке системы для поддержания постоянного коэффициента мощности питающей линии, следует расчет индуктора проводить по этапам нагрева.

Разобьем цикл нагрева (см. рис. 13-1) на четыре этапа.

1. Холодный режим — начало нагрева; заготовка полностью ферромагнитна, удельное сопротивление равно исходному.

2. Первый промежуточный режим; температура поверхности заготовки $T_0 = 650 \div 700^\circ\text{C}$, заготовка ферромагнитна, удельное сопротивление $\rho_2 \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ ом}\cdot\text{м}$. По результатам ряда расчетов, а также экспериментов принимаем, что режим соответствует в среднем моменту времени $t_1 \approx 0,12 t_k$, где t_k — полное время нагрева.

3. Второй промежуточный режим, соответствующий прогреву заготовки на глубину $x_k = 0,5 \Delta_k$, который достигается в момент времени $t_2 \approx 0,22 t_k$.

4. Горячий режим, при котором $x_k \geq \Delta_k$, достигается в момент времени $t_3 \approx 0,3 t_k$ и продолжается до окончания нагрева.

В соответствии с этими четырьмя режимами и будет построен расчет индуктора.

13-2. Расчет индуктора на постоянное напряжение по этапам нагрева

К началу электрического расчета известны размеры заготовки D_2 и a_2 для цилиндра, D_2 , b_2 , a_2 для заготовки прямоугольного поперечного сечения, частота, средняя потребляемая мощность $P_{2\text{ср}}$ и полное время нагрева t_k . Определяются, как было указано раньше, размеры индуктора.

Электрический расчет индуктора начинается с четвертого этапа — горячего режима.

1. **Горячий режим.** Для удельного сопротивления на этом этапе целесообразнее всего принять его среднее значение в интервале температур $800 \div 1300^\circ\text{C}$ $\rho_2 \approx 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{м}$. По формуле (13-1) определяется ориентировочное значение мощности, передаваемой в заготовку в горячем режиме, $P_{2\text{г}}$ и удельной мощности p_{04} , которая равна:

для цилиндра

$$p_{04} = P_{2\text{г}} / (\pi D_2 a_2), \text{ вт}/\text{м}^2; \quad (13-2)$$

для пластины

$$p_{04} = P_{2r}/[2(b_2 + D_2)], \text{ см}^2/\text{м}^3. \quad (13-3)$$

Далее рассчитывается условный одновитковый индуктор так же, как в § 11-8 и 12-6, но на мощность P_{2r} . В результате расчета находится напряжение на индукторе U'_n , которое является базовым и остается неизменным во всех остальных режимах.

Реактивное сопротивление x_0 , реактивность рассеяния x_s , активное и внутреннее реактивное сопротивление провода r_1 и x_{1m} от режима не зависят и используются при расчете индуктора для всех этапов нагрева.

2. Холодный режим. Для всех сталей принимается удельное сопротивление $\rho_2 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Так как полная и удельная мощности в холодном режиме неизвестны, находим их методом последовательного приближения.

Задаемся удельной мощностью $p_{01} = 2p_{04}$ и, следовательно, $P_2 = 2P_{2r}$.

По формуле (3-39) и кривой намагничивания на рис. 3-5 находим μ_e .

Находим глубину проникновения тока $\Delta_2 = 503 \sqrt{\rho_2/(\mu_e f)}$ и сопротивления заготовки, которые при ярко выраженном поверхностном эффекте равны:

для цилиндра

$$\left. \begin{aligned} r_2 &= 1,37\pi D_2 \rho_2 / (a_2 \Delta_2), \quad x_{2m} = r_2 / 1,37; \\ r_2 &= 1,37 \cdot 2 (b_2 + D_2) \rho_2 / (a_2 \Delta_2). \end{aligned} \right\} \quad (13-4)$$

Далее находим по известным формулам коэффициент приведения активного сопротивления c , приведенные сопротивления r'_2 и x'_2 , эквивалентные сопротивления индуктора r_3 , x_3 и z_3 , ток условного одновиткового индуктора $I'_n = \sqrt{P_2 \cdot 10^3 / r'_2}$ и напряжение на индукторе $U'_n = I'_n z'_3$.

Полученное напряжение U'_n обычно не совпадает с базовым. Тогда следует задаться двумя другими значениями p_{01} так, чтобы в одном случае напряжение получилось больше, а в другом меньше базового, и повторить расчет для этих значений p_{01} . Построив зависимость $U'_n = f(p_{01})$, получим требуемое значение p_{01} , опустив перпендикуляр на ось абсцисс из точки пересечения этой кривой с линией базового напряжения (см. рис. 13-2).

После этого производим окончательный расчет индуктора в холодном режиме.

3. Первый промежуточный режим. Принимается удельное сопротивление $\rho_2 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$. Расчет проводится так же, как для холодного режима.

4. Второй промежуточный режим. Глубина прогрева $x_k = 0,5 \Delta_k$. Так же, как при поверхностном нагреве, принимаем удельное сопротивление $\rho_2 = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Так как глубина прогрева сравнительно велика, а удельная мощность мала, принимаем в качестве среднего значения $m = -0,8$, что соответствует относительной магнитной проницаемости ферромагнитной сердечины $\mu_2 = 81$. Тогда из табл. 4-1 — 4-4 имеем:

$$K = 1,345; \cos \varphi = 0,959; \sin \varphi = 0,285.$$

Активное и внутреннее реактивное сопротивления заготовки будут равны:
для цилиндра

$$r_2 = \frac{\pi D'_2}{a_2} 2,81 \cdot 10^{-6} \sqrt{f} \cos \varphi = \frac{\pi D'_2}{a_2} 3,59 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}, \text{ ом,} \quad (13-5)$$

для пластины

$$r_2 = F_{23} \cdot 3,59 \cdot 10^{-6} \sqrt{f} / a_2, \text{ ом,} \quad (13-6)$$

$$x_{2M} = r_2 \operatorname{tg} \varphi = 0,298 r_2, \quad (13-7)$$

где D'_2 — расчетный диаметр, определяемый по формуле (5-9), или (5-10); F_{23} — эффективный периметр, $F_{23} = 2(b_2 + D_2) - 4\xi$, $\xi = M\Delta_k$ — глубина активного слоя. В рассматриваемом случае

$$\xi = 0,55\Delta_k.$$

При этом дополнительным условием является требование (см. § 11-4 и 12-4):

$$\xi \leqslant 0,2D_2.$$

Таким образом, усредненная магнитная проницаемость мы считаем, что электрические параметры не зависят от мощности. При возможном колебании значений m от $-0,75$ до $-0,95$ это не приводит к существенным ошибкам.

Далее определяем c , r'_2 , x'_2 , x_3 , r_3 , z_3 . Ток условного одновиткового индуктора находим по базовому напряжению:

$$I'_u = U'_u / z_3.$$

Находим мощность передаваемую в заготовку, $P_2 = I'^2 r'_2$ и строим зависимость $P_2 = f(t)$ по моментам времени, указанным в § 13-1 (см. рис. 13-3). Площадь, ограниченная кривой $P_2 = f(t)$, должна быть равна $P_{2cp} t_k$, т. е. энергии, полученной из предварительного теплового расчета:

$$\int_0^{t_k} P_2 dt = P_{2cp} t_k.$$

При расхождении, обычно не превышающем 5—10%, соответственно на 2,5—5% изменяется напряжение U'_u , не пересчитывая параметров индуктора в холодном и первом промежуточном режимах, которые в этих пределах мало зависят от мощности.

В заключение находим число витков и проводим расчет охлаждения индуктора. Для создания запаса по охлаждению расчет проводим по наибольшим полным потерям, которые обычно соответствуют горячему режиму.

13-3. Расчет индуктора

Порядок расчета индуктора будет приведен совместно с примером расчета для цилиндра. При расчете горячего режима используем, пример расчета из § 11-8.

Для расчета заданы: $D_2 = 10 \text{ см}$; $a_2 = 30 \text{ см}$; частота $f = 2500 \text{ гц}$; средняя полезная мощность $P_m = 50,8 \text{ квт}$, время нагрева $t_k = 300 \text{ сек}$; напряжение на индукторе 750 в .

Рассчитывается условный одновитковый индуктор.

Горячий режим.

Используется пп. 1—17 расчета, приведенного в § 11-8, или при расчете заготовок с прямоугольным поперечным сечением § 11-9.

18. Мощность, передаваемая в заготовку в горячем режиме и удельная мощность:

$$P_{2r} = 0,72P_{2cp} = 0,72 \cdot 58,8 = 42,2 \text{ квт};$$

$$p_{04} = \frac{P_{2r}}{\pi D_2 a_2} = \frac{42,2 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,1 \cdot 0,3} = 45 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2;$$

для пластины

$$p_{04} = \frac{P_{2r}}{2(b_2 + D_2)a_2}.$$

19. Ток в индукторе

$$I'_u = \sqrt{\frac{P_{2r} \cdot 10^3}{r'_2}} = \sqrt{\frac{42,2 \cdot 10^3}{3,86 \cdot 10^{-5}}} = 33100 \text{ а.}$$

20. Плотность тока в индукторе

$$\delta_u \approx \frac{I'_u \cdot 10^{-6}}{a_1 \Delta_1 g} = \frac{3,31 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 0,0014 \cdot 0,85} = 59 \text{ а/мм}^2.$$

21. Базовое напряжение на индукторе $U'_u = I'_u z_9 = 3,31 \cdot 10^4 \cdot 6,67 \times 10^{-4} = 22,1 \text{ в.}$

22. Полный к. п. д. индуктора:

$$\eta_t = \frac{P_{2r} - \Delta P_T}{P_{2r}} = \frac{42,2 - 8,0}{42,2} = 0,81;$$

$$\eta = \eta_i \eta_t = 0,685 \cdot 0,81 = 0,555.$$

23. Полная мощность, подводимая к индуктору,

$$P_u = \frac{P_{2r}}{\eta_i} = \frac{42,2}{0,685} = 61,8 \text{ квт.}$$

Холодный режим.

24. Относительная магнитная проницаемость.

Принимаем $\rho_{01} = 2\rho_{04} = 90 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$;

$$H_e^2 \sqrt{\mu_e} = 3,67 \cdot 10^2 \frac{\rho_{01}}{\sqrt{\rho_{2f}}} = 3,67 \cdot 10^2 \frac{90 \cdot 10^4}{\sqrt{2 \cdot 10^{-7} \cdot 2500}} = 1,48 \cdot 10^{10};$$

Из рис. 3-5 находим $\mu_e = 31,1$;
Глубина проникновения тока

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_e f}} = 503 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-7}}{31,1 \cdot 2500}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

25. Активное и внутреннее реактивное сопротивления заготовки:

$$r_2 = \frac{F_2 \cdot 1,37 \cdot \rho_2}{\alpha_2 \Delta_2} = \frac{\pi \cdot 0,1}{0,3} \cdot 1,37 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 10^{-4}} = 3,59 \cdot 10^{-4} \text{ ом;}$$

$$x_{2M} = \frac{r_2}{1,37} = 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ ом;}$$

для пластины $F_2 = 2 (b_2 + D_2)$.

26. Коэффициент приведения активного сопротивления

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2M}}{x_0}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{3,59}{18,25}\right)^2 + \left(1 + \frac{9,75 + 2,62}{18,25}\right)^2} = 0,35.$$

27. Приведенное активное сопротивление $r'_2 = cr_2 = 0,35 \cdot 3,59 \cdot 10^{-4} = 1,255 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$

28. Приведенное реактивное сопротивление вторичной цепи

$$x'_2 = c \left[x_s + x_{2M} + \frac{(x_s + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \right] = \\ = 0,35 \left(12,37 + \frac{12,37^2 + 3,59^2}{18,25} \right) 10^{-4} = 7,52 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

29. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_3 = r_1 + r'_2 = (0,178 + 1,255) \cdot 10^{-4} = 1,433 \cdot 10^{-4} \text{ ом;}$$

$$x_3 = x_{1M} + x'_2 = (0,168 + 7,52) \cdot 10^{-4} = 7,59 \cdot 10^{-4} \text{ ом;}$$

$$z_3 = \sqrt{x_3^2 + r_3^2} = \sqrt{7,59^2 + 1,433^2} \cdot 10^{-4} = 7,83 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

30. Ток в индукторе:

$$I'_n = \sqrt{P_{2x} \cdot 10^3 / r'_2}, \text{ а;}$$

$$P_{2x} = 2P_{2f} = 84,4 \text{ кВт;}$$

$$I'_n = \sqrt{\frac{84,4 \cdot 10^3}{1,433 \cdot 10^{-4}}} = 2,59 \cdot 10^4 \text{ а.}$$

31. Напряжение на индукторе $U'_n = I'_n z_3 = 2,59 \cdot 10^4 \cdot 7,83 \cdot 10^{-4} = 20,25 \text{ в.}$

Полученное напряжение меньше базового.

Задаваясь значениями удельной мощности $p_{01} = 2,5$, $p_{04} = 112,5 \times 10^4 \text{ вт/м}^2$ и $p_{01} = 3p_{04} = 135 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$, проделываем для каждого значения расчет по пп. 24–31.

В результате находим напряжение на индукторе: в первом случае $U'_n = 23,13 \text{ в;}$ во втором случае $U'_n = 26,8 \text{ в.}$

Из графика $U'_u = f(p_{01})$, приведенного на рис. 13-2 (кривая 1), находим:
 $p_{01} = 104 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$; $P_2 = 97 \text{ квт}$.

Проведя для этого значения удельной мощности повторный расчет по пп. 24—30, будем иметь:

$$\begin{aligned} \mu_e &= 28; \Delta_2 = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}; r_2 = 3,38 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; x_{2M} = 2,47 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; \\ c &= 0,355; r'_2 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; x'_2 = 7,42 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; r_3 = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; x_3 = \\ &= 7,59 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; z_3 = 7,71 \cdot 10^{-4} \text{ ом}; I'_u = 28600 \text{ а.} \end{aligned}$$

Можно, не проводя последнего пересчета, получить необходимые величины графически, построив зависимости r'_2 , r_3 , x_3 , z_3 , I'_u от p_{01} .

32. К. п. д. индуктора

$$\eta_u = r'_2/r_3 = 0,87.$$

33. Мощность, подведенная к индуктору,

$$P_u = P_2/\eta_u = 111,5 \text{ квт.}$$

34. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \Phi_u = r_3/z_3 = 0,179.$$

Первый промежуточный режим.

Пп. 35—42 повторяют пп. 24—31 предыдущего раздела, но удельное сопротивление $\rho_2 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$.

Задаемся удельными мощностями: $p_{02} = 2p_{04} = 90 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$; $p_{02} = 3p_{04} = 135 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$; $p_{02} = 4p_{04} = 180 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$.

Тогда имеем: $U'_u = 18,4$; $U'_u = 22,9$; $U'_u = 27,8 \text{ в.}$

Построив зависимость $U'_u = f(p_{02})$ (кривая 2 на рис. 13-2), получаем: $p_{02} = 127 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$; $P_2 = 119,6 \text{ квт.}$

Проведя для этого значения удельной мощности повторный расчет или графическое построение, получаем: $\mu_e = 36,2$; $\Delta_2 = 13,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $r_2 = 6,62 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$; $x_{2M} = 4,82 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$; $c = 0,298$; $r'_2 = 1,97 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$; $x'_2 = 8,52 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$; $r_3 = 2,15 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$; $x_3 = 8,69 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$; $z_3 = 8,95 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$; $I'_u = 24700 \text{ а.}$

43. К. п. д. индуктора

$$\eta_u = \frac{r'_2}{r_3} = \frac{1,97}{2,15} = 0,918.$$

44. Мощность, подведенная к индуктору,

$$P_u = \frac{P_2}{\eta_u} = \frac{119,6}{0,918} = 131 \text{ квт.}$$

45. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \Phi_u = \frac{r_3}{z_3} = \frac{2,15}{8,95} = 0,24.$$

Второй промежуточный режим.

46. Расчетный диаметр или периметр заготовки. Принимаем $\rho_2 = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$; $\Delta_k = \frac{0,5}{\sqrt{f}} = 0,01 \text{ м}$; $\xi = 0,55\Delta_k = 0,0055 \text{ м}$.

Для цилиндра $D'_2 = D_2 - \xi = 0,1 - 0,0055 = 0,0945 \text{ м}$; для пластины $F_{23} = 2(b_2 + D_2) - 4\xi$, где $\xi < 0,2D_2$.

47. Активное и внутреннее реактивное сопротивления заготовки: для цилиндра

$$r_2 = \frac{\pi D'_2}{a_2} 3,59 \cdot 10^{-6} \sqrt{f} = \frac{\pi \cdot 0,0945}{0,3} 3,59 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

для пластины

$$r_2 = \frac{F_{23}}{a_2} \cdot 3,59 \cdot 10^{-6} \sqrt{f} \text{ ом};$$

$$x_{2M} = 0,298r_2 = 0,298 \cdot 1,78 \cdot 10^{-4} = 0,53 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

48. Коэффициент приведения активного сопротивления

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2M}}{x_0}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{1,78}{18,25}\right)^2 + \left(1 + \frac{9,75 + 0,53}{18,25}\right)^2} = 0,408.$$

49. Приведенное активное сопротивление $r'_2 = cr_2 = 0,728 \cdot 10^{-4} \text{ ом}$.

50. Приведенное реактивное сопротивление вторичной цепи

$$\begin{aligned} x'_2 &= c \left[x_s + x_{2M} + \frac{(x_s + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \right] = \\ &= 0,408 \cdot \left(10,28 + \frac{10,28^2 + 1,78^2}{18,25} \right) \cdot 10^{-4} = 6,65 \cdot 10^{-4} \text{ ом}. \end{aligned}$$

51. Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора:

$$r_3 = r_1 + r'_2 = (0,178 + 0,728) \cdot 10^{-4} = 0,906 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$x_3 = x_{1M} + x'_2 = (0,168 + 6,65) \cdot 10^{-4} = 6,82 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$z_3 = \sqrt{x_3^2 + r_3^2} = \sqrt{6,82^2 + 0,906^2} \cdot 10^{-4} = 6,88 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

52. Ток в индукторе

$$I'_u = \frac{U'_u}{z_3} = \frac{22,1}{6,88 \cdot 10^{-4}} = 32200 \text{ а.}$$

53. Мощность, передаваемая в заготовку, $P_2 = I_u r'_2 = (3,22 \cdot 10^4)^2 \times 0,728 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} = 75,3 \text{ квт}$.

54. К. п. д. индуктора

$$\eta_u = \frac{r'_2}{r_3} = \frac{0,728}{0,906} = 0,804.$$

55. Мощность, подведенная к индуктору,

$$P_u = \frac{P_2}{\eta_u} = \frac{75,3}{0,804} = 93,8 \text{ квт},$$

56. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \Phi_i = \frac{r_3}{z_3} = \frac{0,906}{6,88} = 0,132.$$

57. Проверка соответствия полученной средней мощности исходному значению и корректировка расчетного режима нагрева. Из графика $P_2 = f(t)$, построенного по значениям мощности для моментов времени $t_1 = 0,12t_k = 36$ сек, $t_2 = 0,22t_k = 66$ сек, $t_3 = 0,3t_k = 90$ сек и $t_k = 300$ сек (рис. 13-3), путем графического интегрирования получаем:

$$P_{2cp} = \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} P_2 dt = \frac{S}{t_k} = 57,4 \text{ квт},$$

причем S — площадь графика в соответствующем масштабе.

Так как полученное значение P_{2cp} меньше исходного значения, то мощности во всех точках увеличиваются в $\frac{P_{2cp, \text{исх}}}{P_{2cp}} = \frac{58,8}{57,4} = 1,024$ раза. Ба-

зовое напряжение и ток индуктора увеличиваются в $\sqrt{1,024} = 1,012$ раза. Новое значение базового напряжения $U'_i = 1,012 \cdot 22,1 = 22,4$ в.

58. Число витков индуктора

$$w = \frac{U_i}{U'} = \frac{750}{22,4} = 33,5 \text{ вит.};$$

учитывая падение напряжения в подводящих шинах принимаем $w = 33$ вит.

Высота витка

$$b = \frac{0,47}{34} \cdot 0,85 = 0,0118 \text{ м.}$$

Рис. 13-3. Проверка соответствия расчета заданному значению средней мощности

59. Режим работы индуктора. Для каждого этапа нагрева по уточненному значению базового напряжения находятся значения токов в индукторе $(I_i = \frac{1,012 I'_i}{w})$, значения подводимой к индуктору и передаваемой в нагреваемый объект мощности и мощности потерь в проводе индуктора ($\Delta P_i = I_i^2 r_1$). Полученные данные сводятся в табл. 13-1.

Таблица 13-1

Режимы работы индуктора

Этап нагрева	Ток в индукторе, а	К. п. д. индуктора, %	Передаваемая мощность, квт	Мощность подводимая к индуктору, квт	Потери в индукторе, квт
Холодный режим	877	87,0	99,2	114,2	15,0
Первый промежуточный режим	758	91,8	122,4	134,2	11,8
Второй промежуточный режим	988	80,4	77,1	96,0	18,9
Горячий режим	1015	68,5	43,2	63,3	20,1

60. Активное, реактивное, полное сопротивления индуктора и коэффициент мощности:

$$r_i = w^2 r_3, \quad x_i = w^2 x_3, \quad z_i = w^2 z_3; \\ \cos \Phi_H = r_i/z_i.$$

Данные для всех режимов сводятся в табл. 13-2.

Таблица 13-2
Эквивалентные параметры индуктора

Этап нагрева	Активное сопротивление, ом	Реактивное сопротивление, ом	Полное сопротивление, ом	Коэффициент мощности
Холодный режим	0,15	0,825	0,838	0,179
Первый промежуточный режим	0,234	0,944	0,973	0,24
Второй промежуточный режим	0,0985	0,742	0,748	0,132
Горячий режим	0,0613	0,721	0,725	0,0848

Далее проводится расчет охлаждения индуктора, как было указано в § 11-8 и 12-6. Расчет проводится для горячего режима, которому соответствуют наибольшие потери в проводе индуктора (см. табл. 13-1).

Полные потери, определяющие количество охлаждающей воды,

$$\Delta P = \Delta P_i + \Delta P_T = 20,1 + 8 = 28,1 \text{ квт}.$$

Сравнение результатов проведенного расчета с результатами расчета по средней мощности (§ 11-8) показывает, что во втором случае число витков индуктора получается преуменьшенным. Лучшие результаты дает ориентировочный расчет по мощности в горячем режиме $P_{2g} \approx 0,72P_{2cp}$. В рассматриваемом случае, как это видно из пп. 19—23, получаем базовое напряжение $U'_i = 22,1$ в и $w = 34$ вит.

13-4. Приближенный расчет индуктора для нагрева заготовок переменного сечения

При нагреве цилиндрической заготовки с переменным сечением, например при ступенчатом изменении диаметра (рис. 13-4), необходимо обеспечить на каждом участке выделение различной энергии при одном и том же времени нагрева. Наибольшая энергия, а следовательно, и мощность на единицу длины должны соответствовать участку с наибольшим диаметром. Это достигается соответствующим распределением напряженности магнитного поля по участкам, для чего индуктор выполняется с переменным шагом витков. На участке с наибольшим диаметром (D_{21} на рис. 13-4) шаг витков наименьший и напряженность поля наибольшая.

Ориентировочный расчет индуктора может быть выполнен подобно расчету индуктора для нагрева гладкого цилиндра той же массы и длины, если ввести соответствующие дополнения. Примерный ход расчета поясним на примере трехступенчатой заготовки, показанной на рис. 13-4.

Частота тока выбирается в соответствии с формулами (11-25), (11-26) и (11-28) (со значениями F_0 на стр. 176) по наименьшему диаметру (D_{22} на рис. 13-4) и полной длине заготовки.

Время нагрева находится по заданным температурам T_0 и T_n по формуле (2-54) или (2-55) по наибольшему диаметру (D_{21} на рис. 13-4), после чего находятся полезные мощности на каждом участке и полезные удельные мощности:

$$P_{T1} = 840G_1/t_k, \text{ квт}, \quad p_{01} = P_{T1} \cdot 10^3 / (\pi D_{21} a_{21}), \text{ вт}/\text{м}^2,$$

$$P_{T2} = 840G_2/t_k, \text{ квт}, \quad p_{02} = P_{T2} \cdot 10^3 / (\pi D_{22} a_{22}), \text{ вт}/\text{м}^2,$$

$$P_{T3} = 840G_3/t_k, \text{ квт}, \quad p_{03} = P_{T3} \cdot 10^3 / (\pi D_{23} a_{23}), \text{ вт}/\text{м}^2,$$

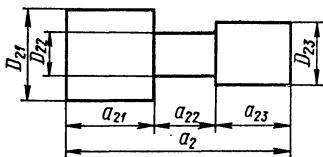


Рис. 13-4. Эскиз цилиндрической заготовки со ступенчатым изменением диаметра

где G_1, G_2, G_3 — массы участков, кг; t_k — время нагрева, сек; D_{21}, D_{22}, D_{23} — диаметры участков, м; a_{21}, a_{22}, a_{23} — длины участков, м.

Полная длина индуктора a_1 и его внутренний диаметр D_1 определяются по формулам (11-31) и (11-35) по наибольшему диаметру заготовки и по ее полной длине a_2 , после чего по формуле (11-37) находятся тепловые потери ΔP_T .

Средняя мощность, передаваемая в заготовку,

$$P_{2cp} = P_{T1} + P_{T2} + P_{T3} + \Delta P.$$

На первом этапе рассчитывается индуктор для нагрева эквивалентного гладкого цилиндра той же массы с диаметром

$$D_2 = 2 \sqrt{(G_1 + G_2 + G_3) / (\pi \gamma a_2)},$$

где γ — плотность материала заготовки, кг/м³.

Расчет выполняется для горячего режима, как указано в § 11-8, по заданному напряжению на индукторе, в результате чего находится полное число витков w .

При нагреве заготовок из немагнитных материалов в электрический расчет подставляется мощность P_{2cp} , при нагреве стальных — мощность $P_{2r} = 0,72P_{2cp}$ (см. § 13-1).

На втором этапе находится распределение витков по участкам. Для этого определяются полные удельные мощности по участкам, средняя удельная мощность и средние удельные витки.

Средняя удельная мощность

$$p_{0cp} = P_{2cp} \cdot 10^3 / [\pi (D_{21} a_{21} + D_{22} a_{22} + D_{23} a_{23})], \text{ вт}/\text{м}^2.$$

Средняя удельная мощность тепловых потерь

$$\Delta p_{Tcp} \approx \Delta P_T \cdot 10^3 / (\pi D_2 a_2), \text{ вт}/\text{м}^2. \quad (13-8)$$

Полные удельные мощности по участкам равны:

$$p_1 = p_{01} + \Delta p_{Tcp}, \quad p_2 = p_{02} + \Delta p_{Tcp}, \quad p_3 = p_{03} + \Delta p_{Tcp}.$$

Средние удельные витки

$$w'_{\text{ср}} = w/a_1, \text{ вит/м.}$$

Индуктор делится на участки:

$$a_{11} = a_{21} + \Delta a, \quad a_{12} = a_{22}, \quad a_{13} = a_{23} + \Delta a,$$

где $\Delta a = (a_1 - a_2)/2$.

Удельные витки на участках находятся по удельным мощностям:

$$w'_1 = w'_{\text{ср}} \sqrt{p_1/p_{0\text{ср}}}, \quad w'_2 = w'_{\text{ср}} \sqrt{p_2/p_{0\text{ср}}}, \quad w'_3 = w'_{\text{ср}} \sqrt{p_3/p_{0\text{ср}}}.$$

Полные числа витков на участках равны:

$$w_1 = w'_1 a_{11}, \quad w_2 = w'_2 a_{12}, \quad w_3 = w'_3 a_{13}.$$

Числа витков округляются до целых и производится проверка:

$$w_1 + w_2 + w_3 = w.$$

В заключение выбирается трубка и рассчитывается охлаждение индуктора по участкам.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ С ПОСТОЯННЫМ ШАГОМ ВИТКОВ ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

14-1. Особенности расчета индуктора

В индукторе нагревателя методического действия несколько относительно коротких заготовок размещаются одна за другой. По мере нагрева они выталкиваются по одной и заменяются холодными. Таким образом, в процессе нагрева каждая заготовка перемещается через определенные заданные промежутки времени t_0 на длину одной заготовки и проходит через весь индуктор. Время t_0 обычно называют темпом выдачи. С полным временем нагрева t_k оно связано соотношением:

$$t_k = n t_0; \quad (14-1)$$

где n — число заготовок в индукторе.

Заготовки, расположенные у выходного конца индуктора и нагретые выше точки магнитных превращений, потребляют мощность, меньшую, чем заготовки находящиеся в ферромагнитном состоянии, расположенные со стороны загрузки. Однако полная потребляемая мощность остается постоянной, если не учитывать кратковременного переходного режима, сопровождающего перемещение заготовок (см. рис. 14-1).

Тепловой расчет не отличается от проведенного ранее в гл. 2. Время нагрева t_k находится по формулам (2-54), (2-55) в зависимости от перепада температуры ΔT . Средняя полезная мощность находится по формуле (2-56), в которой G — масса всех заготовок, кг. Эта мощность также равна:

$$P_T = 840G'/t_0, \text{ квт}, \quad (14-2)$$

где G' — масса одной заготовки, кг; t_0 — темп выдачи, сек.

По формуле (11-37) или (12-40) определяются тепловые потери ΔP_T , после чего по формуле (11-46) находится средняя мощность $P_{2\text{ср}}$ в заготовке.

Длина и диаметр индуктора определяются по формулам (11-31), (11-35) и (12-38).

Особенность электрического расчета опреде-

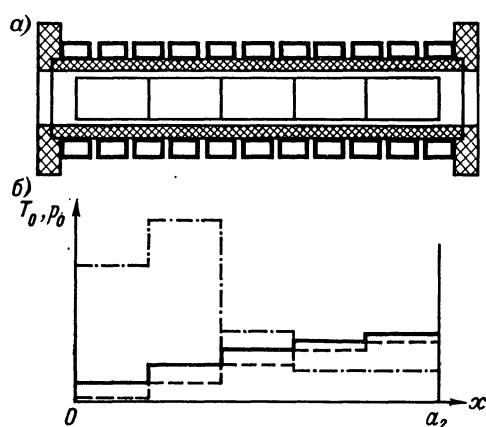


Рис. 14-1. Схема индуктора (а) и распределение температуры и удельной мощности вдоль столба заготовок (б)

сплошная линия — распределение температуры перед началом передвижения заготовок, штриховая — то же после передвижения заготовок, штрих-пунктирная — распределение удельной мощности после передвижения заготовок

переходе от одной заготовки к другой. Первые заготовки обладают магнитными свойствами. Остальные или частично ферромагнитны, или совсем немагнитны.

Рассмотрим участок a индуктора бесконечной длины, на котором расположен стык ферромагнитной и немагнитной заготовок (рис. 14-2). При одной и той же напряженности магнитного поля на поверхности заготовок магнитный поток внутри заготовок первого участка больше, так как их магнитное сопротивление меньше. Как и для соленоидов бесконечной длины принимаем напряженность внешнего поля H_b индуктора равной нулю. Тогда полный магнитный поток, проходящий через первый участок индуктора, будет больше, чем поток, проходящий через второй участок, т. е.

$$\Phi_1 > \Phi_2,$$

что противоречит принципу непрерывности магнитного потока.

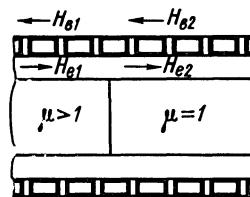


Рис. 14-2. Участок индуктора с разнородной по длине загрузкой

ляется изменением свойств заготовок при

Первые заготовки обладают магнитными свойствами. Остальные или частично ферромагнитны, или совсем немагнитны.

Рассмотрим участок a индуктора бесконечной длины, на котором расположен стык ферромагнитной и немагнитной заготовок (рис. 14-2). При одной и той же напряженности магнитного поля на поверхности заготовок магнитный поток внутри заготовок первого участка больше, так как их магнитное сопротивление меньше. Как и для соленоидов бесконечной длины принимаем напряженность внешнего поля H_b индуктора равной нулю. Тогда полный магнитный поток, проходящий через первый участок индуктора, будет больше, чем поток, проходящий через второй участок, т. е.

$$\Phi_1 > \Phi_2,$$

что противоречит принципу непрерывности магнитного потока.

Принцип непрерывности магнитного потока при $H_b = 0$ удовлетворится, если напряженности магнитного поля на участках не будут равны, причем

$$H_{me1} < H_{me2}.$$

Однако последнее условие противоречит закону полного тока, так как приводит к неравенству

$$(\omega' I_n)_1 < (\omega' I_n)_2, \quad (14-3)$$

что невозможно, ибо по всем виткам протекает один и тот же ток I_n , а число витков ω' на единицу длины индуктора постоянно. Отсюда следует, что магнитные потоки у границ участков должны разделяться и выходить наружу.

Таким образом, на самом деле напряженность внешнего поля $H_b > 0$ и длинный индуктор, заполненный заготовками с разными свойствами, представляет собой комбинацию коротких, магнитно связанных индукторов. При этом напряженности поля на участках в общем случае различны¹.

Измерения напряженности магнитного поля на поверхности столба заготовок с разными свойствами показывают, что если относительная магнитная проницаемость первого участка $\mu_e < 50$, то H_{me} меняется слабо. Измерения показывают также, что внешнее поле несколько усилено по сравнению с полем такого же индуктора, но с однородной загрузкой².

В реальных системах для сквозного индукционного нагрева $\mu_e = 15 \div 40$. Поэтому, как и прежде, можно принять $H_{me} = \text{const}$, а приведение параметров загрузки осуществить по полной длине индуктора.

14-2. Распределение удельной мощности по участкам индуктора

Столб заготовок длиной a_2 разделим на три зоны:

1) зону ферромагнитных заготовок со средней температурой $= 650^\circ \text{C}$, имеющих удельное сопротивление $\rho_2 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ ом} \cdot \text{м}$ и $\mu > 1$;

2) зону частично ферромагнитных заготовок, прогретых на глубину $x_k = 0,5 \Delta_k$, причем $\rho_2 = 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$ и $m = -0,8$, $\Delta_k = 0,5/\sqrt{f}$, $m = 1,345$, $\cos \varphi = 0,959$, $\sin \varphi = 0,285$;

3) зону немагнитных заготовок ($x_k > \Delta_k$), для них $\rho_2 = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$, $\mu = 1$.

Тепловые расчеты и экспериментально полученные зависимости температуры от времени для различных расстояний от поверхности показывают, что длины зон в среднем составляют (точнее см. [29, 40, 41]):

$$a_{21} = 0,105a_2; \quad a_{22} = 0,145a_2, \quad a_{23} = 0,75a_2. \quad (14-4)$$

¹ Для длинного одновиткового индуктора и в этом случае $H_b = 0$. Однако распределение тока по его длине неравномерно и соответствует неравенству (14-3).

² Измерения выполнены О. И. Карленковой.

Распределение удельной мощности по зонам найдем на основании общей формулы (3-34):

$$p_0 = \frac{1}{2} H_{me}^2 r_0 = H_e^2 r_0.$$

Подставляя соответствующее выражение для активного сопротивления единичного квадрата (r_0) и указанные выше средние физические свойства для каждой зоны, получим:

$$p_{01} = H_e^2 1,37 \rho_2 / \Delta_2 = 2,1 \cdot 10^{-6} H_e^2 \sqrt{\mu_e f} \text{ вт/м}^2, \quad (14-5)$$

$$p_{02} = H_e^2 2,81 \cdot 10^{-6} K \sqrt{f} \cos \varphi = 3,62 \cdot 10^{-6} H_e^2 \sqrt{f}, \text{ вт/м}^2; \quad (14-6)$$

для цилиндра

$$p_{03} = H_e^2 \pi \rho_2 m_2 A / (\pi D_2) = 1,57 \cdot 10^{-6} H_e^2 m_2 A \sqrt{f}, \text{ вт/м}^2; \quad (14-7)$$

для пластины

$$p_{03} = H_e^2 F_2 \rho_2 G / (F_2 \Delta_k) = 2,22 \cdot 10^{-6} H_e^2 G \sqrt{f}, \text{ вт/м}^2, \quad (14-8)$$

где $H_e = H_{me} / \sqrt{2}$ — действующее значение напряженности магнитного поля, на поверхности заготовки, а/м; F_2 — периметр поперечного сечения заготовки, в рассматриваемом случае пластины, м.

Установим связь между удельными мощностями по участкам и средней удельной мощностью. Имеем:

$$p_{0cp} = \frac{P_{2cp}}{F_2 a_2} = \frac{F_2 (p_{01} a_{21} + p_{02} a_{22} + p_{03} a_{23})}{F_2 a_2}.$$

На основании формулы (14-4) получим:

$$p_{0cp} = 0,105 p_{01} + 0,145 p_{02} + 0,75 p_{03}$$

или

$$p_{0cp} = 0,105 p_{01} \left(1 + 1,38 \frac{p_{02}}{p_{01}} + 7,15 \frac{p_{03}}{p_{01}} \right). \quad (14-9)$$

Отношение удельных мощностей, входящих в формулу (14-9), получим, воспользовавшись формулами (14-5) — (14-8):

$$\frac{p_{01}}{p_{02}} = 0,58 \sqrt{\mu_e}; \quad (14-10)$$

для цилиндра

$$\frac{p_{01}}{p_{03}} = 1,34 \frac{\sqrt{\mu_e}}{m_2 A}; \quad (14-11)$$

для пластины

$$\frac{p_{01}}{p_{03}} = 0,945 \frac{\sqrt{\mu_e}}{G}. \quad (14-12)$$

Средняя удельная мощность p_{0cp} задана через P_{2cp} . Нужно так определить p_{01} , а следовательно, H_e и μ_e , чтобы удовлетворялось выражение (14-9). Для этого, последовательно задаемся некоторыми значениями μ_e , из табл. 3-1 или рис. 3-5 находим H_e и по формулам (14-5) и (14-9) — (14-12) находим H_e . Построив зависимость $p_{0cp} = f(\mu_e)$ (рис. 14-3), зная базовое значение p_{0cp} , находим μ_e , H_e , p_{01} , p_{02} и p_{03} . После этого находим удельные реактивные мощности из соотношений:

$$p_{01r} = p_{01}/1,37, \quad (14-13)$$

$$p_{02r} = p_{02} \operatorname{tg} \varphi = 0,298 p_{02}, \quad (14-14)$$

для цилиндра

$$\begin{aligned} p_{03r} &= p_{03}B/A, \\ p_{03r} &= p_{03}Q/G. \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (14-15)$$

Полные активное и внутреннее реактивное сопротивления загрузки, приведенные к току весьма длинного индуктора ($H_b = 0$), равны:

$$r_2 = \frac{P_{2cp}}{I_u^2} = \frac{F_2(a_{21}p_{01} + a_{22}p_{02} + a_{23}p_{03})}{(a_2 H_e)^2}, \quad (14-16)$$

$$x_{2M} = \frac{P_{2r}}{I_u^2} = \frac{F_2(a_{21}p_{01r} + a_{22}p_{02r} + a_{23}p_{03r})}{(a_2 H_e)^2}. \quad (14-17)$$

Дальнейший расчет не отличается от приведенного в § 11-8 или в § 12-6. Расчет охлаждения индуктора проводится по средней мощности P_{2cp} .

При ориентировочном расчете можно для определения активного и внутреннего реактивного сопротивлений использовать приближенные выражения:

$$r_2 \approx 1,65 r_{2r}, \quad x_{2M} \approx 1,15 x_{2Mr}, \quad (14-18)$$

где r_{2r} и x_{2Mr} — активное и внутреннее реактивное сопротивления стальной ферромагнитной загрузки, вычисленные для горячего режима.

14-3. Расчет индуктора

Для расчета заданы диаметр заготовки $D_2 = 7,5 \text{ см}$; длина заготовки $a'_2 = 12 \text{ см}$; частота $f = 2500 \text{ Гц}$; масса заготовки $G' = 4,16 \text{ кг}$; темп выдачи заготовки $t_0 = 24 \text{ сек}$; перепад температуры $\Delta T = 100^\circ \text{ С}$; напряжение на индукторе $U_u = 750 \text{ в}$.

1. Время нагрева и число заготовок в индукторе:

$$\Delta_k = \frac{0,56}{Vf} = 0,0112 \text{ м}; \quad \frac{D_2}{\Delta_k} = 6,7 > 5; \quad \xi \approx \Delta_k; \quad D'_2 = D_2 - \xi = 0,0638 \text{ м};$$

$$t_k = KD'^2_2 = 5,9 \cdot 10^4 \cdot 0,0638^2 = 240 \text{ сек}; \quad n = \frac{t_k}{t_0} = \frac{240}{24} = 10.$$

2. Средняя полезная мощность

$$P_T = 840 \frac{G'}{t_0} = 840 \cdot \frac{4,16}{24} = 145,5 \text{ квт}.$$

3. Внутренний диаметр или высота щели индуктора:
 для цилиндра $D_1 = (1,5 \div 2,5)$ $D_2 = 1,6 \cdot 0,075 = 0,12$ м;
 для прямоугольной заготовки $D_1 = (1,3 \div 3)$ D_2 ; $D_3 - D_2 = 0,01$ м;
 $D_3 = 0,085$ м.

4. Длина индуктора $a_1 = n a'_2 + (1,0 \div 1,5) D_1 = 10 \cdot 0,12 + 0,12 = 1,32$ м.

5. Тепловые потери через изоляцию:
 для цилиндра

$$\Delta P_T = 3,74 \cdot \frac{a_1}{\lg \frac{D_1}{D_3}} = 3,74 \cdot \frac{1,320}{\lg \frac{0,12}{0,085}} = 33 \text{ квт};$$

для прямоугольной заготовки $\Delta P_T = 1,33 a_1 F_{из} / d_{из}$, квт,
 где $F_{из}$ — средний периметр изоляции, м; $d_{из}$ — толщина изоляции, м.

6. Средняя мощность в заготовке и средняя удельная мощность: $P_{2cp} = 1,05 (P_T + \Delta P_T) = 1,05 \cdot 178,5 = 187,5$ квт; коэффициент 1,05 учитывает потери в направляющих;

$$p_{0cp} = \frac{P_{2cp}}{F_2 a_2} = \frac{187,5 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,075 \cdot 1,2} = 6,32 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2.$$

7. Магнитная проницаемость первого участка, напряженность магнитного поля и распределение удельной мощности по участкам.

Для цилиндра

$$m_2 = \frac{D_2}{\sqrt{2} \Delta_k} = \frac{0,075}{\sqrt{2} \cdot 0,01120} = 4,73;$$

$$A = 0,25; B = 0,3;$$

для пластины находятся $G = f(D_2/\Delta_k, b_2/D_2)$ и $Q = f(D_2/\Delta_k, b_2/D_2)$
 или $R = f(D_2/\Delta_k)$, $X = f(D_2/\Delta_k)$, если

$$b_2/D_2 > 10.$$

Задаемся магнитной проницаемостью $\mu_e = 21$. Из рис. 3-5 или из табл. 3-1 находим напряженность магнитного поля:

$$H_e = 7,97 \cdot 10^4 \text{ а/м};$$

$$p_{01} = 2,1 \cdot 10^{-6} H_e^2 \sqrt{\mu_e f} = 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 7,97^2 \cdot 10^8 \sqrt{21 \cdot 2500} = 30,3 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2;$$

$$p_{0cp} = 0,105 p_{01} \left(1 + 1,38 \frac{p_{02}}{p_{01}} + 7,15 \frac{p_{03}}{p_{01}} \right);$$

$$\frac{p_{01}}{p_{02}} = 0,58 \sqrt{\mu_e} = 2,66,$$

для цилиндра

$$\frac{p_{01}}{p_{03}} = 1,34 \frac{\sqrt{\mu_e}}{m_2 A} = 1,34 \cdot \frac{\sqrt{21}}{4,73 \cdot 0,25} = 5,2;$$

для пластины

$$\frac{p_{01}}{p_{03}} = 0,945 \frac{\sqrt{\mu_e}}{G};$$

$$p_{0cp} = 0,105 \cdot 30,3 \cdot 10^5 \cdot \left(1 + \frac{1,38}{2,66} + \frac{7,15}{5,2} \right) = 9,2 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2,$$

что больше исходного значения.

Задаваясь значениями магнитной проницаемости $\mu_e = 39,7$ и $\mu_e = 27,5$ соответственно, получаем: $H_e = 3,99 \cdot 10^4$ а/м; $H_e = 6,0 \cdot 10^4$ а/м; $p_{0cp} = 2,63 \cdot 10^5$ вт/м² и $p_{0cp} = 5,52 \cdot 10^5$ вт/м².

Строим зависимость $p_{0cp} = f(\mu_e)$ (рис. 14-3) и получаем окончательно: $\mu_e = 25,3$; $H_e = 6,5 \cdot 10^4$ а/м. Находим

$$p_{01} = 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 6,5^2 \cdot 10^8 \sqrt{25,3 \cdot 2500} = 22,3 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2;$$

$$\frac{p_{01}}{p_{02}} = 0,58 \sqrt{25,3} = 2,92;$$

$$p_{02} = \frac{22,3}{2,92} = 7,65 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2;$$

$$\frac{p_{01}}{p_{03}} = 1,34 \frac{\sqrt{25,3}}{4,73 \cdot 0,25} = 5,71;$$

$$p_{03} = \frac{22,3}{5,71} = 3,91 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2;$$

$$p_{0cp} = 0,105 \cdot 22,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{1,38}{2,92} + \frac{7,15}{5,71} \right) = 6,38 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2,$$

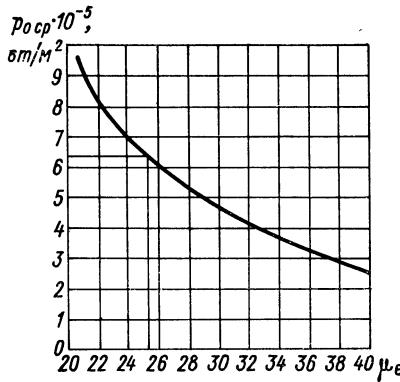


Рис. 14-3. Зависимость средней удельной мощности от магнитной проницаемости первого участка

что близко к значению, найденному из теплового расчета.

8. Распределение реактивной удельной мощности по участкам:

$$p_{01r} = \frac{p_{01}}{1,37} = \frac{22,3 \cdot 10^5}{1,37} = 16,3 \cdot 10^5 \text{ вар/м}^2;$$

$$p_{02r} = 0,298 p_{02} = 0,298 \cdot 7,65 \cdot 10^5 = 2,28 \cdot 10^5 \text{ вар/м}^2;$$

$$p_{03r} = \frac{B}{A} p_{03} = 3,91 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,3}{0,25} = 4,7 \cdot 10^5 \text{ вар/м}^2.$$

Для пластины $p_{03r} = p_{03}Q/G$.

9. Активное сопротивление загрузки, приведенное к току длинного индуктора

$$r_2 = \frac{P_{2cp}}{(a_2 H_e)^2} = \frac{187,5 \cdot 10^3}{(1,2 \cdot 6,5 \cdot 10^4)^2} = 3,09 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$$

10. Внутреннее реактивное сопротивление загрузки, приведенное к току длинного индуктора:

$$P_{2r} = F_2 a_2 \cdot 0,105 (p_{01r} + 1,38 p_{02r} + 7,15 p_{03r}) = \pi \cdot 0,075 \cdot 1,2 \cdot 0,105 (16,3 + 1,38 \cdot 2,28 + 7,15 \cdot 4,7) \cdot 10^5 = 158 \cdot 10^3 \text{ вар} = 158 \text{ квар};$$

$$x_{2M} = \frac{P_{2r} \cdot 10^3}{(a_2 H_e)^2} = \frac{158 \cdot 10^3}{(1,2 \cdot 6,5 \cdot 10^4)^2} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$$

Дальше расчет проводится по пунктам § 11-8 для цилиндра, или § 12-6 для пластины.

Определим r_2 и x_{2M} по приближенным формулам (14-18):

$$r_{2F} = \pi p_2 \frac{m_2^2 A}{a_2} = \pi \cdot 1,24 \cdot 10^{-6} \frac{4,73^2 \cdot 0,25}{0,12} = 1,818 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$x_{2M} = r_{2F} \frac{B}{A} = 1,818 \cdot 10^{-5} \frac{0,3}{0,25} = 2,18 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$r_2 = 1,65 \cdot 1,818 \cdot 10^{-5} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$x_{2M} = 1,15 \cdot 2,18 \cdot 10^{-5} = 2,62 \cdot 10^{-5} \text{ ом},$$

что весьма близко к значениям, полученным в пп. 9 и 10.

14-4. Расчет овального индуктора для непрерывно-последовательного нагрева тонкой ленты

Индуктор для нагрева ленты рассчитывается так же, как и нагреватель методического действия. При высокотемпературном нагреве стальной ленты нагреваемая зона, находящаяся в индукторе, как было указано раньше, разбивается на три участка.

Следует отметить лишь некоторые особенности рассматриваемого случая.

1. Относительная толщина ленты весьма мала: $b_2/D_2 > 20$. Поэтому при вычислении собственных сопротивлений r_2 и x_{2M} целесообразно пользоваться формулами (12-10) и (12-11), точность которых в этом случае не уступает точности формул (12-17) и (12-18). Именно по этой причине функции G и Q при $b_2/D_2 > 20$ не вычислены.

2. При нагреве ферромагнитной ленты ниже точки магнитных превращений расширяются возможности выбора частоты. Обычно для расчета задаются производительность или, что то же самое, скорость v движения ленты и требуемая конечная температура. Из теплового расчета определяются время нагрева t_k и мощность P_2 , передаваемая в ленту. Тогда минимальная длина индуктора $a = vt_k$, а удельная мощность $p_0 = P_2/2b_2a$.

По удельной мощности определяется относительная магнитная проницаемость, μ_e , после чего проверяется соответствие принятой частоты условию (12-28), обеспечивающему высокий к. п. д. индуктора.

Если принятая частота ниже требуемой, то следует увеличить длину индуктора, оставив неизменными мощность P_2 и скорость v , что приведет к уменьшению удельной мощности, к соответственному росту магнитной проницаемости и к снижению требуемой условием (12-28) частоты.

Этот прием может применяться также при последовательном (нагреватели методического действия) и непрерывно-последовательном низкотемпературном нагреве стальных изделий с любой формой поперечного сечения, например цилиндров.

14-5. Расчет овального индуктора для нагрева цилиндрических заготовок

Индуктор (рис. 14-4) работает по принципу индуктора методического действия, но заготовки передвигаются поперек индуктора: с одного бока загружаются холодные и с другого извлекаются нагретые. Ряд заготовок делится на зоны в направлении ширины индуктора. Количество заготовок в каждой зоне будет равно:

$$n_1 = 0,105n; \quad n_2 = 0,145n; \quad n_3 = 0,75n,$$

где n — полное число заготовок, определяемое по формуле (14-1).

Очевидно, что замечание о неравномерности магнитного поля вдоль индуктора в этом случае теряет силу.

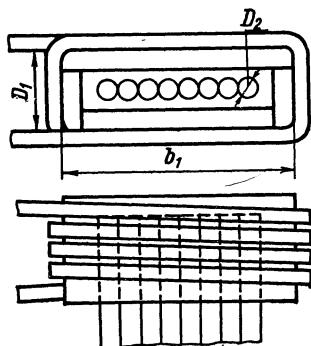


Рис. 14-4. Овальный индуктор для нагрева цилиндрических заготовок

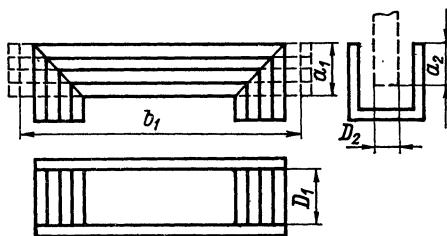


Рис. 14-5. Щелевой индуктор

Расчет индуктора подобен приведенному в § 14-3, но имеет некоторые особенности.

1. П. 4 порядка расчета дополняется выбором ширины щели индуктора

$$b_1 = nD_2 + \Delta b,$$

где $\Delta b = D_1 - D_2$ — зазор между заготовками и индуктором.

2. В п. 10 выражение для реактивной мощности примет вид:

$$P_{2r} = \pi D_2 a_2 (n_1 p_{01r} + n_2 p_{02r} + n_3 p_{03r})$$

или

$$P_{2r} = \pi D_2 a_2 n \cdot 0,105 (p_{01r} + 1,38 p_{02r} + 7,15 p_{03r}).$$

3. Реактивное сопротивление рассеяния рассчитывается по общей формуле [см. (5-18)]:

$$x_s = \omega \mu_0 (S_1 - S_2) / a_2.$$

В рассматриваемом случае:

$$S_1 = D_1 b_1, \quad S_2 = n \pi D_2^2 / 4.$$

Дальше расчет проводится, как указано в § 12-6, для индуктора прямоугольной или овальной формы.

Довольно часто применяются индукторы щелевого типа (рис. 14-5), достоинство которых заключается в простоте загрузочного и разгрузочного устройств. Индуктор рассчитывается так же, как и овальный, но при определении реактивных сопротивлений x_s и x_0 индуктор распрямляется по средней линии (рис. 14-5) так, что получается широкий овальный индуктор. К. п. д. щелевых индукторов несколько ниже, чем овальных, вследствие потерь в отогнутых лобовых частях. Поэтому их следует применять в тех случаях, когда суммарная длина обеих лобовых частей составляет менее 0,3 длины щели.

Разновидностью этих индукторов является индуктор для установок роторного типа, состоящих из двух спиралей, помещенных одна в другую. Спирали соединяются последовательно так, чтобы в промежутке между ними, куда помещаются нагреваемые объекты, магнитные поля их складывались.

Для расчета индуктор распрямляется по среднему диаметру.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ
**ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ
С ПЕРЕМЕННЫМ ШАГОМ ВИТКОВ
ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
(УСКОРЕННЫЙ НАГРЕВ)**

15-1. Время нагрева, средняя мощность в заготовках и основные размеры индуктора

Существенного сокращения времени нагрева, а следовательно, и сокращения длины индуктора можно добиться, используя режим с приблизительно постоянной температурой поверхности (см. § 2-2, 2-5). Этот режим нагрева может быть осуществлен, если выполнить индуктор с переменным шагом витков, увеличивающимся к его разгрузочному концу. Так как по всем виткам проходит один и тот же ток, то напряженность магнитного поля, а следовательно, и удельная мощность в начале индуктора будут максимальными, что обеспечит быстрый подъем температуры.

Температура поверхности заготовок поднимается до конечного значения в течение 10—30% общего времени нагрева, т. е. на участке индуктора, составляющем 10—30% его общей длины, и дальше почти не меняется (рис. 15-1), что обеспечивает более быстрый нагрев глубинных слоев. Такой режим нагрева получил название ускоренного [49].

В практически выполняемых конструкциях шаг намотки индуктора меняется ступенчато (см. рис. 15-1). Число ступеней не превышает четырех, а наиболее часто ограничиваются тремя, в некоторых случаях двумя ступенями [31].

В дальнейшем ограничимся рассмотрением нагрева заготовок с круговым и квадратным, приводящимся к круговому, сечениями.

Определение времени нагрева t_k производится в зависимости от заданного перепада температуры по формулам (2-60), после чего находится средняя полезная мощность P_T по формуле (2-56).

Длина и диаметр индуктора находятся соответственно по формулам (11-31) и (11-35).

Полная мощность P_2 , передаваемая в заготовки, определяется из соотношения:

$$P_2 = P_T + \Delta P_T, \quad (15-1)$$

где ΔP_T — тепловые потери, определяемые по формуле (11-37).

Потери в направляющих не учитываются ввиду приближенного характера расчета.

15-2. Разделение индуктора на участки и распределение удельной мощности вдоль столба заготовок

Ограничимся случаем трех участков. Длины участков по отношению к длине столба заготовок целесообразно выбирать в пределах:

$$a_{21} = (0,2 \div 0,3) a_2 = a_{22},$$

$$a_{23} = (0,4 \div 0,6) a_2,$$

где a_{21} , a_{22} , a_{23} — длины участков, на которые разбивается столб заготовок.

Длины участков индуктора соответственно равны:

$$a_{11} = a_{21} + \Delta a,$$

$$a_{12} = a_{22}, \quad a_{13} = a_{23} + \Delta a,$$

где $\Delta a = (a_1 - a_2)/2$.

Необходимо, чтобы на каждом участке размещалось целое число заготовок.

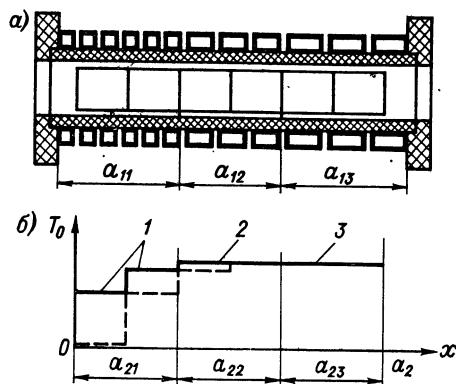


Рис. 15-1. Схема индуктора (a) и распределение температуры вдоль столба заготовок (б)

Сплошная линия — температура перед передвижением заготовок; штриховая — после передвижения заготовок

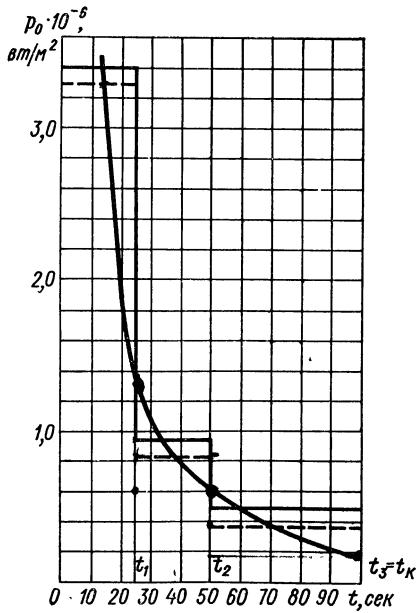


Рис. 15-2. Зависимость удельной мощности от времени

После разбивки столба заготовок на участки строится по формуле (2-17) зависимость $p_0 = f(t)$ (рис. 15-2). При этом время $t_1 = a_{21}t_\kappa/a_2$ соответствует концу первого участка, $t_2 = (a_{21} + a_{22})t_\kappa/a_2$ — второго и $t_3 = t_\kappa$ — концу столба заготовок.

Полученная зависимость заменяется ступенчатой кривой (штриховая линия), причем высота каждой ступени представляет собой среднюю удельную мощность на участке (рис. 15-2).

Средняя удельная мощность p_{01} на первом участке находится по формуле (2-18), на остальных двух участках удельные мощности p_{02} и p_{03} более удобно находить графически.

Считая $T_0 = 1300^\circ\text{C}$; $\lambda = 33,5 \text{ вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$, $a = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$, перепишем формулы (2-17) и (2-18) в виде

$$p_0 = \frac{8,7 \cdot 10^4}{R_2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau}, \text{ вт}/\text{м}^2,$$

$$p_{01} = 13,65 \cdot 10^9 \frac{R_2}{t_1} \left(0,25 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-v_n^2 \tau_1}}{v_n^2} \right), \text{ вт}/\text{м}^2.$$

Найдя по формуле (13-8) удельную мощность тепловых потерь Δp_T , определяем полные удельные мощности на каждом участке (ступенчатая сплошная линия):

$$p_1 = p_{01} + \Delta p_T, \quad p_2 = p_{02} + \Delta p_T, \quad p_3 = p_{03} + \Delta p_T,$$

чем и заканчиваем тепловой расчет.

15-3. Электрический расчет индуктора

Напряженность магнитного поля на участках можно ориентировочно определить, считая, что внешнее поле H_b индуктора равно нулю, а поверхностный эффект достаточно ярко выражен. Тогда ток в каждом участке заготовок будет равен:

$$I_{21} = a_{21}H_{e1}, \quad I_{22} = a_{22}H_{e2}, \quad I_{23} = a_{23}H_{e3},$$

где H_{e1} , H_{e2} , H_{e3} — действующие значения напряженности магнитного поля на поверхности заготовок соответствующего участка.

Ток в заготовках каждого участка и напряженность магнитного поля найдем, зная полную мощность в заготовках участка и его активное сопротивление.

На участке I (рис. 15-1, б) происходит подъем температуры от исходной до заданной T_0 на поверхности; на этом участке укладываются все переходные режимы.

Считаем, что сопротивление соответствует в среднем второму промежуточному режиму: $x_\kappa = 0,5\Delta_\kappa$, $\rho_2 = 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{м}$, $m = -0,8$. Тогда в соответствии с формулами (13-5) и (13-7), имеем:

$$r_{21} = \pi D_2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}/a_{21}, \text{ ом}, \quad x_{21M} = 0,298r_{21}.$$

Полная активная и внутренняя реактивная мощности равны:

$$P_{21} = p_1 \pi D_2 a_{21} = I_{21}^2 r_{21} = (a_{21} H_{e1})^2 r_{21}, \quad P_{21r} = 0,298 P_{21}.$$

Отсюда получим напряженность магнитного поля

$$H_{e1} = \frac{1}{a_{21}} \sqrt{\frac{P_{21}}{r_{21}}}, \quad a/m.$$

Участки 2 и 3 заполнены заготовками, потерявшими магнитные свойства. Для этих участков принимаем: $T_0 = 1200 \div 1300^\circ C$, $\rho_2 = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ом} \cdot \text{м}$, $\Delta_k = 0,56/\sqrt{f}$, м. Тогда для участка 2 имеем:

$$r_{22} = \pi \rho_2 m_2^2 A / a_{22}, \quad x_{22M} = r_{22} B / A,$$

$$P_{22} = p_2 \pi D_2 a_{22}, \quad P_{22r} = P_{22} B / A,$$

$$H_{e2} = \frac{1}{a_{22}} \sqrt{\frac{P_{22}}{r_{22}}}, \quad a/m.$$

Для участка 3 получим:

$$r_{23} = r_{22} a_{22} / a_{23}, \quad x_{23M} = x_{22M} a_{22} / a_{23},$$

$$P_{23} = p_3 \pi D_2 a_{23}, \quad P_{23r} = P_{23} B / A,$$

$$H_{e3} = \frac{1}{a_{23}} \sqrt{\frac{P_{23}}{r_{23}}}, \quad a/m.$$

Находим среднюю напряженность магнитного поля по длине столба заготовок:

$$H_e = \frac{a_{21} H_{e1} + a_{22} H_{e2} + a_{23} H_{e3}}{a_2}, \quad a/m.$$

Суммарные активная и внутренняя реактивная мощности в заготовках равны:

$$P_2 = P_{21} + P_{22} + P_{23}, \quad \text{вт}, \quad P_{2r} = P_{21r} + P_{22r} + P_{23r}, \quad \text{вар},$$

причем активная мощность P_2 должна соответствовать полученной раньше.

Средние значения активного и внутреннего реактивного сопротивлений равны:

$$r_2 = P_2 / (a_2 H_e)^2, \quad x_{2M} = P_{2r} / (a_2 H_e)^2.$$

Дальше рассчитывается условный одновитковый индуктор с равномерным шагом витков; как уже было показано раньше, для него определяются: x_s , x_0 , r'_2 , r_u , x_u , z_u , I_u , I'_u , U_u . По заданному напряжению на индукторе U_u находится число витков $w = U_u / U'_u$ и ток в индукторе $I_u = I'_u / w$.

В заключительной части расчета производиться разбивка полученных w витков по участкам.

Находим среднее число витков на единицу длины индуктора:

$$w' = w / a_1, \quad \text{витк/м}.$$

Участки соединены последовательно и ток в витках всех участков одинаков. Тогда, если не учитывать м. д. с., необходимую для проведения магнитного потока по пути обратного замыкания, получим, что число витков на единицу длины каждого участка пропорционально соответствующей напряженности магнитного поля.

Таким образом, имеем:

$$w'_1 = w' H_{e1} / H_e, \quad w'_2 = w' H_{e2} / H_e, \quad w'_3 = w' H_{e3} / H_e,$$

где w'_1, w'_2, w'_3 — число витков на единицу длины соответствующего участка.

Производим проверку распределения витков:

$$w = a_{11}w'_1 + a_{12}w'_2 + a_{13}w'_3,$$

где w — ранее найденное число витков индуктора.

Если суммирование дает преувеличенный результат, следует уменьшить w'_2 и w'_3 .

В заключительной части расчета по эскизу выбирается трубка для каждого участка, находятся активные сопротивления и потери для каждого участка, общие потери, к. п. д. индуктора и проводится по участкам гидравлический и тепловой расчет индуктора.

15-4. Расчет индуктора

Для расчета задано: диаметр заготовки $D_2 = 7,5$ см, длина заготовок $a_2' = 17$ см, частота $f = 2500$ Гц; масса заготовки $G' = 5,8$ кг, темп выдачи заготовки $t_0 = 25$ сек, перепад температуры $\Delta T = 100^\circ$ С, напряжение на индукторе $U_u = 750$ в.

1. Время нагрева t_k и число заготовок в индукторе:

$$\Delta_k = \frac{0,56}{\sqrt{f}} = 0,0112 \text{ м}; \quad \frac{D_2}{\Delta_k} = 6,7 > 5; \quad \xi \approx \Delta_k; \quad D'^2 = D_2 - \xi = 0,0638 \text{ м};$$

$$t_k = (2,5 \div 1,8) \cdot 10^4 D'^2 = 1,8 \cdot 10^4 \cdot 0,0638^2 = 101,5 \text{ сек.} \quad n = \frac{101,5}{25} = 4;$$

уточненное время нагрева $t_k = 4 \cdot 25 = 100$ сек.

2. Средняя полезная мощность

$$P_T = 840 G' / t_0 = 840 \cdot \frac{5,8}{25} = 195 \text{ квт.}$$

3. Внутренний диаметр индуктора: $D_1 = (1,5 \div 2,5) D_2 = 1,6 \cdot 0,075 = 0,12$ м; $D_3 = D_2 = 0,01$ м; $D_3 = 0,085$ м.

4. Длина индуктора $a_1 = na_2 + (1,0 \div 1,5) D_1 = 4 \cdot 0,17 + 0,12 = 0,8$ м.

5. Тепловые потери через изоляцию

$$\Delta P_T = 3,74 \frac{a_1}{\lg \frac{D_1}{D_3}} = 3,74 \cdot \frac{0,8}{\lg \frac{0,12}{0,085}} = 19,4 \text{ квт.}$$

6. Средняя мощность в заготовках $P_2 = P_T + \Delta P_T = 214,4$ квт.

7. Удельная мощность тепловых потерь

$$\Delta p_T = \frac{\Delta P_T \cdot 10^3}{\pi \cdot D_2 a_2} = \frac{19,4 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,075 \cdot 0,68} = 12,1 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2.$$

8. Разделение столба заготовок и индуктора на участки: $a_{21} = a_{22} = (0,2 \div 0,3) a_2 = 0,25 \cdot 0,68 = 0,17 \text{ м}$; $a_{23} = (0,5 \div 0,6) a_2 = 0,5 \cdot 0,68 = 0,34 \text{ м}$; $\Delta a = (a_1 - a_2)/2 = 0,06 \text{ м}$; $a_{11} = a_{21} + \Delta a = 0,23 \text{ м}$; $a_{12} = a_{22} = 0,17 \text{ м}$; $a_{13} = a_{23} + \Delta a = 0,4 \text{ м}$.

9. Распределение удельной мощности по участкам.

Удельная мощность в момент времени t

$$p_0 = \frac{8,7 \cdot 10^4}{R_2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 t}, \text{ вт/м}^2$$

средняя мощность на первом участке

$$p_{01} = 13,65 \cdot 10^6 \frac{R_2}{t_1} \left(0,25 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-v_n^2 \tau_1}}{v_n^2} \right), \text{ вт/м}^2;$$

$$v_1 = 2,405; v_2 = 5,520; v_3 = 8,654; v_4 = 11,79; v_5 = 14,93.$$

Кривые зависимости мощности от времени строятся по трем точкам:

$$\begin{aligned} t_1 &= a_{21} t_k / a_2 = 25 \text{ сек}; \tau_1 = a t_1 / R_2^2 = \frac{6,4 \cdot 10^{-6} \cdot 25}{0,0375^2} = 0,1136; t_2 = (a_{21} + a_{22}) \times \\ &\times t_k / a_2 = 50 \text{ сек}; \tau_2 = a t_2 / R_2^2 = 0,2272; t_3 = t_k = 100 \text{ сек}; \tau_3 = a t_k / R_2^2 = \\ &= 0,4544; \\ p_0' &= \frac{8,7 \cdot 10^4}{R_2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau_1} = \frac{8,7 \cdot 10^4}{0,0375} (e^{-5,8 \cdot 0,1136} + e^{-30,4 \cdot 0,1136} + \\ &+ e^{-75 \cdot 0,1136} + \dots) \approx 1,33 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_0'' &= \frac{8,7 \cdot 10^4}{R_2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau_2} = 0,232 \cdot 10^6 (e^{-5,8 \cdot 0,227} + e^{-30,4 \cdot 0,227} + \dots) \approx \\ &\approx 0,622 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_0''' &= \frac{8,7 \cdot 10^4}{R_2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-v_n^2 \tau_3} \approx 0,232 \cdot 10^6 \cdot e^{-5,8 \cdot 0,454} + \dots = 0,166 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2; \\ p_{01} &\approx 13,65 \cdot 10^6 \frac{0,375}{25} \left(0,25 - \frac{0,517}{25} \right) = 3,28 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2. \end{aligned}$$

По значениям p_0' , p_0'' , p_0''' строится график $p_0 = f(t)$ (см. рис. 15-2). Из графика определяются $p_{02} = 0,82 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$ и $p_{03} = 0,37 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$. Полные удельные мощности на участках равны: $p_1 = p_{01} + \Delta p_T = 3,28 \cdot 10^6 + 0,12 \cdot 10^6 = 3,4 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$; $p_2 = 0,82 \cdot 10^6 + 0,12 \cdot 10^6 = 0,94 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$; $p_3 = 0,37 \cdot 10^6 + 0,12 \cdot 10^6 = 0,49 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$.

10. Условные активные сопротивления участков:

$$r_{21} = \pi D_2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}/a_{21} = \frac{\pi \cdot 0,075}{0,17} \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,0375}{0,0112} = 4,72; A = 0,254; B = 0,302;$$

$$r_{22} = \pi \rho_2 m_2^2 A / a_{22} = \pi \cdot 1,24 \cdot 10^{-6} \frac{4,72^2}{0,17} \cdot 0,254 = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$r_{23} = r_{22} a_{22} / a_{23} = 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,17}{0,34} = 0,65 \cdot 10^{-4} \text{ ом}.$$

11. Распределение активной и реактивной мощностей по участкам:
 $P_{21} = p_1 \pi D_2 a_{21} = 120$ квт; $P_{21r} = 0,298 P_{21} = 35,8$ квар; $P_{22} = p_2 \pi D_2 a_{22} = 37,6$ квт; $P_{22r} = P_{22} B/A = 44,7$ квар; $P_{23} = p_3 \pi D_2 a_{23} = 39$ квт; $P_{23r} = P_{23} B/A = 46,3$ квар; $P_2 = P_{21} + P_{22} + P_{23} = 196,6$ квт (что почти не отличается от полученной при исходном тепловом расчете); $P_{2r} = P_{21r} + P_{22r} + P_{23r} = 126,8$ квар.

12. Действующее значение напряженности магнитного поля на участках и среднее значение:

$$H_{e1} = \frac{1}{a_{21}} \sqrt{\frac{P_{21} \cdot 10^3}{r_{21}}} = \frac{1}{0,17} \cdot \sqrt{\frac{120 \cdot 10^3}{2,5 \cdot 10^{-4}}} = 12,9 \cdot 10^4 \text{ а/м};$$

$$H_{e2} = \frac{1}{a_{22}} \sqrt{\frac{P_{22} \cdot 10^3}{r_{22}}} = \frac{1}{0,17} \cdot \sqrt{\frac{37,6 \cdot 10^3}{1,3 \cdot 10^{-4}}} = 10 \cdot 10^4 \text{ а/м};$$

$$H_{e3} = \frac{1}{a_{23}} \sqrt{\frac{P_{23} \cdot 10^3}{r_{23}}} = \frac{1}{0,34} \cdot \sqrt{\frac{39 \cdot 10^3}{0,65 \cdot 10^{-4}}} = 7,2 \cdot 10^4 \text{ а/м};$$

$$H_e = \frac{a_{21} H_{e1} + a_{22} H_{e2} + a_{23} H_{e3}}{a_2} = \frac{0,17 \cdot 12,9 \cdot 10^4 + 0,17 \cdot 10^5 + 0,34 \cdot 7,2 \cdot 10^4}{0,68} = 9,34 \cdot 10^4 \text{ а/м.}$$

13. Собственное активное и внутреннее реактивное сопротивление столба заготовок при условно равномерном магнитном поле:

$$r_2 = P_2 / (a_2 H_e)^2 = \frac{195 \cdot 10^3}{(0,68 \cdot 9,4 \cdot 10^4)^2} = 4,77 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$x_{2M} = P_{2r} / (a_2 H_e)^2 = \frac{126,8 \cdot 10^3}{(0,68 \cdot 9,4 \cdot 10^4)^2} = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$$

14. Приближенные значения активного и внутреннего реактивного сопротивлений индуктора: $\Delta_1 = \frac{0,0712}{\sqrt{f}} = 0,00142 \text{ м}$; считаем $d_1 = 2 \text{ мм}$; из графика на рис. 5—9 $k_r = 1,36$; $k_x = 1,15$;

$$r_{1n} = \frac{\rho_1 \pi D_1}{a_1 d_1 g} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,12}{0,8 \cdot 0,002 \cdot 0,85} = 5,53 \cdot 10^{-6} \text{ ом};$$

$$r_1 = r_{1n} k_r = 5,53 \cdot 10^{-6} \cdot 1,36 = 7,52 \cdot 10^{-6} \text{ ом};$$

$$x_{1M} = r_{1n} k_x = 5,53 \cdot 10^{-6} \cdot 1,15 = 6,37 \cdot 10^{-6} \text{ ом.}$$

15. Реактивное сопротивление рассеяния

$$x_s = \omega \mu_0 \frac{S_1 - S_2}{a_2} = 2\pi \cdot 2500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\pi}{4a_2} (D_1^2 - D_2^2) = \\ = 1,55 \cdot 10^{-2} \frac{0,12^2 - 0,075^2}{0,68} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

16. Коеффициент приведения активного сопротивления:

$$x_{10} = \omega \mu_0 \frac{S_1}{a_1} = \omega \mu_0 \frac{\pi D_1^2}{4a_1} = 1,55 \cdot 10^{-2} \frac{0,12^2}{0,8} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

$$k_1 = f(D_1/a_1) = f(0,15) = 0,939 \text{ (рис. 5-6);}$$

$$x_0 = x_{10} \frac{k_1 a_1}{a_1 - a_2 k_1} = 2,8 \cdot 10^{-4} \frac{0,939 \cdot 0,8}{0,8 - 0,68 \cdot 0,939} = 13 \cdot 10^{-4} \text{ ом;}$$

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_{2M}}{x_0}\right)^2} = \frac{1}{\left(\frac{0,477}{13}\right)^2 + \left(1 + \frac{2+0,31}{13}\right)^2} = 0,72.$$

17. Приведенное активное сопротивление столба заготовок $r'_2 = cr_2 = 0,72 \cdot 4,77 \cdot 10^{-5} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$

18. Реактивное сопротивление индуктора

$$\begin{aligned} x_3 &= c \left[x_s + x_{2M} + \frac{(x_s + x_{2M})^2 + r_2^2}{x_0} \right] + x_{1M} = \\ &= 0,72 \left(2,31 + \frac{2,31^2 + 0,477^2}{13} \right) \cdot 10^{-4} + 0,064 \cdot 10^{-4} = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ ом.} \end{aligned}$$

19. Активное сопротивление индуктора $r_3 = r_1 + r'_2 = 4,18 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$

20. Полное электрическое сопротивление индуктора

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2} = \sqrt{0,418^2 + 2,03^2 \cdot 10^{-4}} = 2,07 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

21. Ток в одновитковом индукторе

$$I'_u = \sqrt{\frac{P_2 \cdot 10^3}{r'_2}} = \sqrt{\frac{195 \cdot 10^3}{3,43 \cdot 10^{-5}}} = 75500 \text{ а.}$$

22. Напряжение на одновитковом индукторе $U'_u = I'_u z_3 = 75500 \cdot 2,07 \times 10^{-4} = 15,77 \text{ в.}$

23. Число витков и ток в индукторе:

$$w = \frac{U_u}{U'_u} = \frac{750}{15,77} = 47 \text{ вит;}$$

$$I_u = \frac{I'_u}{w} = \frac{75500}{47} = 1610 \text{ а.}$$

24. Распределение витков по участкам:

$$w' = \frac{w}{a_1} = \frac{47}{0,8} = 58,8 \text{ вит/м;}$$

$$w'_1 = w' \frac{H_{e1}}{H_e} = 81,3 \text{ вит/м; } w'_2 = w' \frac{H_{e2}}{H_e} = 63 \text{ вит/м;}$$

$$w'_3 = w' \frac{H_{e3}}{H_e} = 45,2 \text{ вит/м.}$$

$w_1 = a_{11} w'_1 = 18,7 \approx 19 \text{ вит. } w_2 = a_{12} w'_2 = 10,7 \approx 11 \text{ вит. } w_3 = w'_3 a_{13} = 18,1 \approx 17 \text{ вит.}$

25. Выбор трубки по участкам. Выбираем трубку прямоугольного сечения: 1) при намотке трубка сечением $14 \times 10 \times 2$ кладется на узкую сторону сечения; 2) та же трубка кладется на широкую сторону; 3) трубка сечением $21 \times 12 \times 2$ кладется на широкую сторону.

26. Собственные активные сопротивления участков и индуктора:

$$r_{11} = \rho_1 \frac{\pi D_1}{b_1 d_1} w_1 k_{r1} = \frac{\pi \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{0,01 \cdot 0,002} \cdot 19 \cdot 1,36 = 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

$$r_{12} = \rho_1 \frac{\pi D_1}{b_2 d_2} w_2 k_{r2} = \frac{\pi \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{0,014 \cdot 0,002} \cdot 11 \cdot 1,36 = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

$$r_{13} = \rho_1 \frac{\pi D_1}{b_3 d_3} w_3 k_{r3} = \frac{\pi \cdot 0,12 \cdot 2 \cdot 10^{-8}}{0,021 \cdot 0,002} \cdot 17 \cdot 1,36 = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

$$d_1 = d_2 = d_3 = 2 \text{ мм}; \quad k_{r1} = k_{r2} = k_{r3} = 1,36; \quad r_1 = r_{11} + r_{12} + r_{13} = \\ = 17,9 \cdot 10^{-3} \text{ ом}.$$

$$27. \text{ Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления индуктора: } r_u = r_1 + w^2 r'_2 = 17,9 \cdot 10^{-3} + 47^2 \cdot 3,43 \cdot 10^{-5} = 0,0936 \text{ ом}; \quad x_u = \\ = w^2 x_2 = 47^2 \cdot 2,03 \cdot 10^{-4} = 0,449 \text{ ом}; \quad z_u = \sqrt{r_u^2 + x_u^2} = 0,459 \text{ ом}.$$

$$28. \text{ К. п. д. индуктора } \eta_i = \frac{w^2 r'_2}{r_u} = 0,81.$$

$$29. \text{ Коэффициент мощности индуктора } \cos \varphi_i = \frac{r_u}{z_u} = 0,204.$$

$$30. \text{ Мощность, подводимая к индуктору, } P_i = \frac{P_2}{\eta_i} = I_u^2 r_u = 241 \text{ квт};$$

$$P_r = P_i \operatorname{tg} \varphi_i = 241 \cdot 4,85 = 1170 \text{ квар.}$$

31. Тепловыделение в участках индуктора:

$$\Delta P_1 = I_u^2 r_{11} \cdot 10^{-3} + \Delta P_T \frac{a_{11}}{a_1} = 1610^2 \cdot 9,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} + 19,4 \cdot \frac{0,23}{0,8} = 30,7 \text{ квт};$$

$$\Delta P_2 = I_u^2 r_{12} \cdot 10^{-3} + \Delta P_T \frac{a_{12}}{a_1} = 1610^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} + 19,4 \cdot \frac{0,17}{0,8} = 14,4 \text{ квт};$$

$$\Delta P_3 = I_u^2 r_{13} \cdot 10^{-3} + \Delta P_T \frac{a_{13}}{a_1} = 1610^2 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} + 19,4 \cdot \frac{0,4}{0,8} = 20,3 \text{ квт}.$$

Дальше рассчитывается охлаждение каждого участка индуктора.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ РАСЧЕТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА ПОЛЫХ ЦИЛИНДРОВ

16-1. Основные соотношения

Основные дифференциальные уравнения (11-1), (11-2), (11-3) и решение их для напряженности магнитного поля (11-4), а также для плотности тока (11-5) остаются без изменения. Коэффициенты c_1 и c_2 определяются из граничных условий.

Из первого граничного условия получаем, что напряженность магнитного поля на внешней поверхности цилиндра при $R = R_{22}$ (рис. 16-1) выражается через ток в индукторе:

$$R = R_{22}, \quad \dot{H}_m = H_{me} = \frac{\sqrt{2}\omega I_u}{a} = c_1 J_0(m_2 \sqrt{-j}) + c_2 N_0(m_2 \sqrt{-j}), \quad (16-1)$$

где $m_2 = \sqrt{2}R_{22}/\Delta_2$ — относительный радиус внешней окружности цилиндра.

Второе граничное условие получим, найдя плотность тока на внутренней поверхности цилиндра при $R = R_{21}$.

Используем уравнение (11-2) для области $R < R_{21}$ внутри полости цилиндра. Учитывая, что для этой области $\mu = 1$ и $\dot{H}_m = \dot{H}_{m1} = \text{const}$ (процесс, как и ранее, считается квазистационарным), получим:

$$\frac{d\dot{E}_m}{dR} + \frac{\dot{E}_m}{R} = -j\omega\mu_0 R \dot{H}_{m1}.$$

Отсюда получаем:

$$\dot{E}_m = -j\omega\mu_0 R \dot{H}_{m1}/2.$$

При $R = R_{21}$ имеем:

$$\dot{\delta}_{m1} = \frac{\dot{E}_{m1}}{\rho_2} = -\frac{j\omega\mu_0 R_{21}}{2\rho_2} \dot{H}_{m1}. \quad (16-2)$$

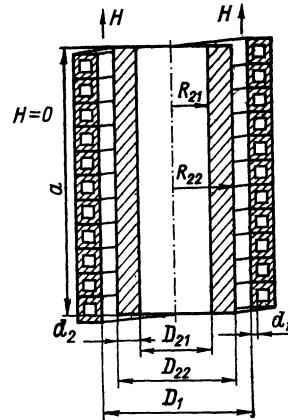


Рис. 16-1. Эскиз системы для нагрева полого цилиндра

Подставляя в условие (16-2) значения \dot{H}_{m1} и $\dot{\delta}_{m1}$ из уравнений (11-4) и (11-5), получим:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_{m1} &= \frac{\sqrt{-2j}}{\Delta_2} [c_1 J_1(m_1 \sqrt{-j}) + c_2 N_1(m_1 \sqrt{-j})] = \\ &= -\frac{j\omega\mu_0 R_{21}}{2\rho_2} [c_1 J_0(m_1 \sqrt{-j}) + c_2 N_0(m_1 \sqrt{-j})] \end{aligned}$$

или

$$c_1 \left[\frac{\sqrt{-2j}}{\Delta_2} J_1(m_1 \sqrt{-j}) + \frac{j\omega\mu_0 R_{21}}{2\rho_2} J_0(m_1 \sqrt{-j}) \right] +$$

$$+ c_2 \left[\frac{\sqrt{-2j}}{\Delta_2} N_1(m_1 \sqrt{-j}) + \frac{j\omega\mu_0 R_{21}}{2\rho_2} N_0(m_1 \sqrt{-j}) \right] = 0, \quad (16-3)$$

где $m_1 = \sqrt{2}R_{21}/\Delta_2$ — относительный радиус полости цилиндра.

Из совместного решения уравнений (16-1) и (16-3) находим постоянные c_1 и c_2 , которые выражаются через полный ток индуктора

и относительные радиусы m_1 и m_2 цилиндра. Этим полностью определяются значения H_m , E_m и δ_m в любой точке сечения цилиндра.

Если толщина d_2 стенки цилиндра относительно мала, то плотность тока может быть с достаточной точностью найдена из выражения (4-12). Такое упрощение возможно, когда $D_{22} \geq 5d_2$, что почти всегда соблюдается на практике. В этом случае для определения глубины активного слоя ξ можно пользоваться табл. 4-5, положив $m = -1$ (удельное сопротивление второй среды равно бесконечности).

16-2. Напряжение на индукторе

Магнитный поток Φ_{2m} , проходящий внутри полого цилиндра, можно разделить на две составляющие: магнитный поток $\Phi_{m.c}$, проходящий через сечение стенки цилиндра, и магнитный поток $\Phi_{m.p}$ — проходящий в полости цилиндра. Таким образом, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{2m} &= \Phi_{m.c} + \Phi_{m.p}, \\ \Phi_{m.c} &= 2\pi\mu_0\mu \int_{R_{21}}^{R_{22}} H_m R dR, \quad \Phi_{m.p} = \mu_0 H_{m1} \pi R_{21}^2, \end{aligned} \right\} \quad (16-4)$$

где H_{m1} — напряженность магнитного поля в полости цилиндра.

Как видно из формул (16-4), магнитный поток Φ_{2m} выражается через H_{me} и H_{m1} , а следовательно, через полный ток индуктора и относительные радиусы m_1 и m_2 .

Определяемая магнитным потоком Φ_{2m} в соответствии с формулой (1-37) составляющая напряжения

$$U_{2m} = \frac{j\omega\Phi_{2m}}{\sqrt{2}} = I_n (r'_2 + jx'_{2m}).$$

Сопротивления r'_2 и x'_{2m} могут быть записаны в виде, аналогичном формулам (11-14):

$$\left. \begin{aligned} r'_2 &= w^2\pi\rho_2 \frac{m_2^2}{a} \frac{2}{m_2} \frac{AC+BD}{C^2+D^2} = w^2\pi\rho_2 \frac{m_2^2}{a} A_{n.c}, \\ x'_{2m} &= w^2\pi\rho_2 \frac{m_2^2}{a} \frac{2}{m_2} \frac{BC-AD}{C^2+D^2} = w^2\pi\rho_2 \frac{m_2^2}{a} B_{n.c}, \end{aligned} \right\} \quad (16-5)$$

где A , B , C и D — выражаются через функции Бесселя первого и второго рода от m_1 и m_2 и через их производные. Кроме того они зависят от μ [37].

Таблицы $\frac{AC+BD}{C^2+D^2} = f(m_1, m_2)$, $\frac{BC-AD}{C^2+D^2} = g(m_1, m_2)$ составлены только для $\mu = 1$ [6, 37, 48], что однако вполне достаточно для практики, так как при нагреве стальных труб выше точки Кюри в начальных стадиях нагрева глубина проникновения тока всегда значительно меньше толщины стенки трубы и расчет может производиться по формулам для ярко выраженного поверхностного эффекта в ферромагнитной и двухслойной среде (см. гл. 3 и 4).

Для определения $A_{\text{п. ц}}$ и $B_{\text{п. ц}}$ более удобно, чем таблицами, пользоваться простыми приближенными формулами [25, 26], позволяющими получить достаточную точность при $m_2 > 2$ и $\Delta m < 1$ и при $m_2 > 3$ и $\Delta m < 2$:

$$A_{\text{п. ц}} \approx \frac{2}{m_2} \frac{\Delta m m_1 m_{\text{cp}}}{4 + (\Delta m)^2 m_1^2}, \quad B_{\text{п. ц}} \approx \frac{2}{m_2} \frac{2m_2 + m_1^2 (\Delta m)^{3/3}}{4 + (\Delta m)^2 m_1 m_{\text{cp}}}, \quad (16-6)$$

где $\Delta m = m_2 - m_1 = \sqrt{2}d_2/\Delta_2$ — относительная толщина стенки; $m_{\text{cp}} = \frac{m_2 + m_1}{2} = \frac{\sqrt{2}R_{\text{cp}}}{\Delta_2}$ — средний относительный радиус цилиндра.

При $\Delta m > 2$ полый цилиндр ведет себя, как сплошной, и $A_{\text{п. ц}} \approx A$, $B_{\text{п. ц}} \approx B$ (см. табл. 11-1).

Для индуктора конечной длины, как и прежде, используется схема замещения на рис. 5-5. Приведенное активное сопротивление загрузки r'_2 и реактивное сопротивление индуктора x_u вычисляются по формулам (11-16) и (11-17), в которых A и B заменяются для полого цилиндра на $A_{\text{п. ц}}$ и $B_{\text{п. ц}}$.

Таким образом, напряжение на индукторе

$$\dot{U}_u = I_u (r_1 + r'_2 + jx_u),$$

где r_1 — собственное сопротивление индуктирующего провода.

16-3. Электрический к. п. д. индуктора

Электрический к. п. д. индуктора определяется по формулам (11-18), (11-20) и (11-21) при условии замены в них коэффициента A на $A_{\text{п. ц}}$.

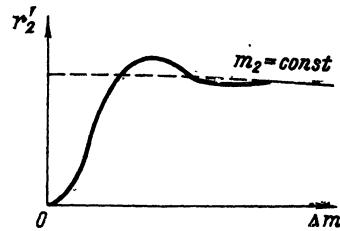


Рис. 16-2. Зависимость приведенного сопротивления полого цилиндра от частоты и относительной толщины стенки

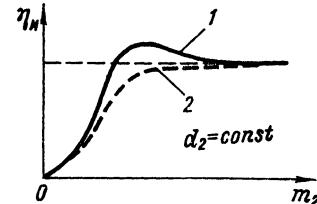


Рис. 16-3. Зависимость электрического к. п. д. индуктора от частоты при постоянной толщине стенки цилиндра

1 — полый цилиндр; 2 — сплошной цилиндр

Коэффициент $A_{\text{п. ц}}$, а следовательно, и сопротивление r_2 обращаются в нуль при стремлении к нулю параметров m_2 и Δm . При малых значениях Δm или, что тоже самое, малой толщине стенки

цилиндра последняя становится прозрачной для электромагнитной энергии и к. п. д. индуктора приближается к нулю.

Если $m_2 > 6$ и $\Delta m > 2$, то $A_{\text{п.ц}} \approx A \approx \sqrt{2}/m_2$ и к. п. д. индуктора равен предельному к. п. д. при нагреве сплошного цилиндра [формула (11-19)].

Следует, однако, отметить, что зависимость $r_2 = f(\Delta m)$ при $m_2 = \text{const}$ имеет максимум (рис. 16-2), что приводит и к появлению максимума к. п. д. индуктора (рис. 16-3). Максимум наблюдается при различных значениях m_2 в зависимости от соотношения R_{22}/R_{21} , но всегда при $d_2 < \Delta_2$ ($\Delta m < \sqrt{2}$), т. е. при слабо выраженным поверхностном эффекте в стенке цилиндра.

16-4. Выбор частоты

Определим частоту, при которой к. п. д. индуктора максимальен. Очевидно, что максимуму к. п. д. соответствует максимум отношения r_2'/r_1 . Если толщина индуктирующего провода d_1 меньше глубины проникновения тока Δ_1 , то r_1 не зависит от частоты и отношение r_2'/r_1 , а также к. п. д. монотонно возрастают с ростом частоты.

Когда $d_1 > \Delta_1$, $r_1 \approx k\sqrt{f}$, использовав для вычисления r_2 формулы (16-5) и (16-6), а также учитывая, что при $\mu = 1$ глубина проникновения тока в материал цилиндра $\Delta_2 = 500\sqrt{\rho_2/f}$, получим выражение для r_2'/r_1 .

Для упрощения ограничимся случаем $R_{22} \gg 10 d_2$, что соблюдается практически для всего сортамента выпускаемых труб. Это позволит заменить в формулах (16-5) и (16-6) m_1 и m_2 на $m_{\text{ср}}$. Тогда получим:

$$\frac{r_2'}{r_1} = C \frac{f^{3/2}}{4 + D_{2\text{ср}}^2 d_2^2 / (6,25 \cdot 10^{10} \rho_2)},$$

где постоянный коэффициент C объединяет все величины, не зависящие от частоты.

Оптимальную частоту найдем из соотношения:

$$\frac{d}{df} \left(\frac{r_2'}{r_1} \right) = 0.$$

Тогда имеем:

$$f_{\text{опт}} = \frac{8,65 \cdot 10^5 \rho_2}{D_{2\text{ср}} d_2}, \quad (16-7)$$

где $D_{2\text{ср}} = (D_{22} + D_{21})/2$ — средний диаметр цилиндра.

Максимум к. п. д. выражен не очень резко, и выбирать частоту можно в довольно широких пределах:

$$\frac{4 \cdot 10^5 \rho_2}{D_{2\text{ср}} d_2} < f < \frac{10 \cdot 10^5 \rho_2}{D_{2\text{ср}} d_2}. \quad (16-8)$$

Формулы (16-7) и (16-8) применимы для длинных индукторов, когда $D_1/a < 0,1$. С уменьшением длины индуктора оптимум сдвиг-

гается в сторону более высоких частот. Если $D_1/a \leq 1$, оптимум и полосу частот можно найти по формулам:

$$f_{\text{опт}} = \frac{8,65 \cdot 10^5 \rho_2}{D_{\text{ср}} d_2 k_2}, \quad \frac{4 \cdot 10^5 \rho_2}{D_{\text{ср}} d_2 k_2} < f < \frac{10 \cdot 10^5 \rho_2}{D_{\text{ср}} d_2 k_2}, \quad (16-9)$$

где $k_2 = f(D_2/a)$ находится из графика на рис. 5-6.

16-5. Время нагрева и средняя мощность

Расчет режима нагрева полых цилиндров представляет собой сложную задачу [19, 32]. Здесь приводится приближенный способ расчета.

Время нагрева t_k определяется заданными температурами: T_0 на внешней и T_d на внутренней поверхностих стенки цилиндра.

Если $D_{22}/d_2 > 5$, то для определения t_k можно использовать формулу (2-40) (полученную для плоской стенки, нагреваемой с одной стороны), которая в рассматриваемом случае примет вид:

$$t_k = \frac{d_2^2}{\alpha} \frac{\frac{S(\alpha, 0) - T_0}{T_d} S(\alpha, 1)}{\frac{T_0}{T_d} - 1}, \text{ сек.} \quad (16-10)$$

При расчете режима нагрева стальных труб до температуры выше 1000°C необходимо заданный перепад температуры $\Delta T = T_0 - T_d$ удваивать (см. § 2-5) и вместо реальной температуры подставлять ее расчетное значение $T'_d = T_d + 2\Delta T$.

Обычно при нагреве стальных труб $\Delta T = 20 \div 100^\circ\text{C}$. Тогда время нагрева при ΔT , равном 20, 50, 100°С будет соответственно равно:

$$\left. \begin{array}{l} t_k = 490 \cdot 10^4 d_2^2 [S(\alpha, 0) - 1,03S(\alpha, 1)], \text{ сек,} \\ t_k = 170 \cdot 10^4 d_2^2 [S(\alpha, 0) - 1,08S(\alpha, 1)], \text{ сек,} \\ t_k = 88 \cdot 10^4 d_2^2 [S(\alpha, 0) - 1,18S(\alpha, 1)], \text{ сек,} \end{array} \right\} \quad (16-11)$$

где $\alpha = \xi/d_2$ — относительная глубина активного слоя.

Глубина активного слоя ξ находится по формуле (2-19) и табл. 4-5 при $m = -1$ и $x_k = d_2$.

Графики функций $S(\alpha, 0)$ и $S(\alpha, 1)$ приведены на рис. 16-4.

После определения времени нагрева t_k по формулам (16-11) необходимо проверить соблюдается ли условие $\tau \geq 0,3$. Если окажется, что $\tau < 0,3$, то необходимо построить кривую $T_0/T'_d = f(t)$ и определить t_k графически, подобно тому, как это показано в § 2-4.

Как видно из табл. 4-5 при $k_1 x_k = \frac{d_2}{\Delta_2} \leq 0,5$ $\xi \approx d_2$. При этом $\alpha = 1$ и $S(\alpha, 0) = S(\alpha, 1) = 0$.

В этом случае выделение тепла по толщине стенки равномерно и время нагрева задается производительностью нагревателя. Уменьшение его ниже определенного значения ограничивается, однако, возникающими при нагреве термическими напряжениями.

Средняя полезная мощность P_T определяется по формуле (2-56) после чего, по формуле (11-36) или (11-37) находятся тепловые потери ΔP_T и полная средняя мощность $P_2 = P_T + \Delta P_T$.

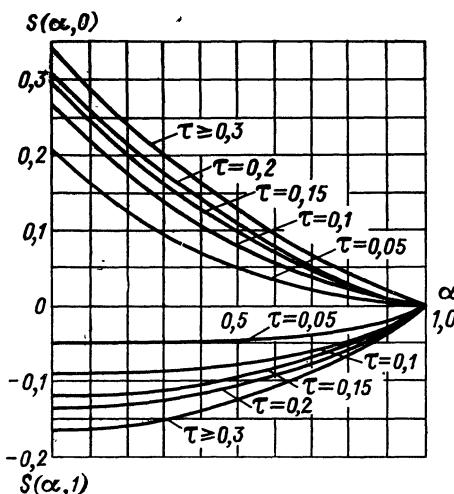


Рис. 16-4. Графики вспомогательных функций $S(\alpha, 0)$, $S(\alpha, 1) = f(\alpha)$ при различных значениях τ

разница между мощностью в горячем режиме P_{2r} и средней мощностью P_{2cp} .

При $d_2 \leq 0,5 \Delta_k$ и $0,5 \Delta_k < d_2 < \Delta_k$ вместо соотношения (13-1) соответственно имеем:

$$P_{2r} \approx 0,9P_{2cp}, \quad P_{2r} \approx 0,8P_{2cp}.$$

Второй промежуточный режим рассчитывается при $x_k = 0,5 d_2$ и $m = -0,8$.

В остальном расчет совпадает с приведенными в § 13-3, только A и B заменяются на $A_{п.ц}$ и $B_{п.ц}$, а время нагрева находится по формулам (16-11).

Если $d_2 > \sqrt{2}\Delta_k$, то расчет ведется так же, как для сплошного цилиндра.

Расчет индуктора для нагрева полого цилиндра из немагнитного материала выполняется по схеме, приведенной в § 11-8, с соответствующей заменой функций A и B по среднему в заданном интервале температур удельному сопротивлению материала. Время нагрева определяется по формуле (16-10).

Нагреватель для непрерывно-последовательного нагрева. Расчет индуктора выполняется, как указано в § 14-3, с учетом приведенных выше замечаний.

16-6. Расчет индуктора

Нагреватель периодического действия. При нагреве стального полого цилиндра выше точки магнитных превращений горячая глубина проникновения тока больше толщины его стенки ($\Delta_k > d_2$), что обеспечивается выбором частоты по формуле (16-9).

В этом случае электрические параметры загрузки и индуктора, а также мощность, передаваемая в загрузку меняются в процессе нагрева меньше, чем при нагреве сплошного цилиндра. Вследствие этого уменьшается и

Длина индуктора находится по формуле

$$a = vt_k,$$

где v — заданная скорость перемещения трубы; t_k — найденное из теплового расчета время нагрева.

Если $d_2 \leq \Delta_\kappa$, то для второй зоны принимается $x_\kappa = 0,5 d_2$ и, как и прежде, $m = -0,8$.

Для вычисления удельной мощности p_{02} теперь следует пользоваться общей формулой [левая часть формулы (14-6)]. Также нельзя пользоваться формулой (14-10) и правой частью формулы (14-14), относящимся только к частному случаю $x_\kappa = 0,5 \Delta_\kappa$.

Теперь вместо формулы (14-10) будем иметь:

$$\frac{p_{01}}{p_{02}} \approx \frac{0,75 \sqrt{\mu_e}}{K \cos \varphi},$$

где $K = f(x_\kappa/\Delta_\kappa, m)$, $\cos \varphi = f(x_\kappa/\Delta_\kappa, m)$ при $m = -0,8$ определяется по табл. 4-1 и 4-4. Эти замечания должны быть учтены в пп. 7 и 8 расчета. Приближенными формулами (14-18) в этом случае пользоваться нельзя.

При $d_2 > \sqrt{2} \Delta_\kappa$ расчет выполняется так же, как для сплошного цилиндра, за исключением определения времени нагрева t_k (§ 14-3, п. 1), которое находится по формулам (16-11).

Если цилиндр изготовлен из немагнитного материала, то расчет выполняется так же, как было указано для нагревателя периодического действия.

Индукторы для проходных печей. В проходных печах для нагрева труб под редуцирование и для других операций применяются секционированные системы. В секцию входит один или два индуктора, питающиеся от отдельных генераторов, соединенные параллельно или последовательно. Между индукторами располагаются ролики, подающие трубные заготовки.

Секции состоят из индукторов одинаковых размеров, содержат обычно одинаковое их число, и к ним подводится одинаковая мощность, с тем чтобы обеспечить полное использование генераторов. Тогда во всех секциях одинаковы и удельные мощности.

Если в печь поступают холодные (ферромагнитные) заготовки, то относительная длина зон сохраняется такой же, как при нагреве в обычных нагревателях методического действия или при непрерывно-последовательном нагреве.

Индукторы, входящие в определенную зону, рассчитываются на однородную нагрузку, соответствующую зоне, в которой они находятся.

В расчет полной мощности, передаваемой в заготовки, а также удельной мощности, необходимой для электрического расчета, входят и тепловые потери, приходящиеся на промежутки между индукторами.

Если стальные заготовки предварительно подогреты до температуры, близкой к точке Кюри, или в печь поступают заготовки

из немагнитного материала, то расчет каждого индуктора проводится так, как указано в § 11-8.

Для уточнения расчета желательно брать удельное сопротивление заготовки по средней температуре в пределах соответствующей секции, допустив для простоты линейный рост температуры вдоль печи.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ ИНДУКТОРЫ ДЛЯ НАГРЕВА КУЗНЕЧНЫХ ЗАГОТОВОК И ПРОКАТА

17-1. Выбор способа нагрева и типа индуктора

Сквозной нагрев в кузнечных и прокатных цехах осуществляется обычно при малой удельной мощности, передаваемой в заготовку. Только в течение небольшого начального периода нагрева она может превышать $0,2 \text{ квт}/\text{см}^2$.

Большие удельные мощности могут привести к оплавлению поверхности раньше, чем сердцевина достигнет ковочной температуры.

При малой удельной мощности тепловые потери с поверхности заготовки могут значительно снижать к. п. д. нагрева. Поэтому между поверхностью и медной водоохлаждаемой трубкой, образующей индуктирующий провод, должна быть помещена тепловая изоляция. Для равномерного сквозного нагрева заготовок диаметром 30—100 мм , которые чаще других заготовок нагреваются током частотой 1000—8000 гц , требуется от одной до пяти минут (гл. 11).

Производительность ковочных агрегатов обычно составляет 3—5 заготовок в минуту. Поэтому для обеспечения непрерывной загрузки ковочных агрегатов, как правило, в индукторе должно находиться несколько заготовок. При этом длина индуктора получается большей, так что на ней удается легко разместить индуктирующий провод с числом витков, достаточным для прямого подсоединения его к источнику тока (гл. 11).

Индукторы для нагрева по (одному) коротких концов заготовок (короче 200 мм) получают питание через понижающий трансформатор. Темп выдачи нагретых заготовок из индуктора должен соответствовать темпу работы ковочного агрегата. Для регулирования скорости нагрева заготовок в индукторе последний подключается к источнику ТВЧ через регулируемый автотрансформатор, который позволяет изменять в некоторых пределах напряжение на индукторе [48].

Нагрев заготовок по всей длине. Большинство заготовок в кузнечных и прокатных цехах имеют круглое, квадратное или прямоугольное поперечное сечение.

Для нагрева коротких заготовок длиной меньше 500 мм по всей длине используются обычно цилиндрические индукторы, в которых размещается несколько заготовок (гл. 14).

В индукторе заготовки лежат на трубчатых водоохлаждаемых направляющих. Иногда используются направляющие из жаростойких сплавов без водяного охлаждения.

Водоохлаждаемые направляющие более устойчивы в эксплуатации. Если заготовки нарезаны достаточно аккуратно, не имеют больших заусенцев, повреждающих направляющие, то смена водоохлаждаемых направляющих производится не чаще, чем один раз в шесть месяцев.

Вода, охлаждающая направляющие, уносит 3—5% мощности, подводимой к индуктору. Части поверхности заготовки, прилегающие к направляющим, отстают в нагреве. Во время передачи заготовок от индуктора к ковочному агрегату температура поверхности в значительной степени выравнивается. При нагреве простых конструкционных сталей оставшаяся неравномерность температуры не оказывается на качестве поковок. При нагреве некоторых легированных сталей водоохлаждаемые направляющие не могут быть использованы. Для уменьшения отсоса тепла и повышения износустойчивости на поверхности трубчатых направляющих в зоне скольжения заготовок наваривают полосы из стеллита высотой 2—3 мм и шириной 3—4 мм. Неохлаждаемые направляющие не отсасывают тепла от заготовок, но они изнашиваются довольно быстро (при тяжелых заготовках). Иногда их приходится сменять через 1—2 недели. Эти направляющие изготавливаются из металлической полосы в виде желоба, который свободно ложится на футеровку индуктора. Один конец полосы отгибается вниз, чтобы при проталкивании заготовок желоб не смешался. К индуктору желоб не крепится, поэтому его просто сменить.

Заготовки длиной более 500 мм можно нагревать также в цилиндрических индукторах, помещая их туда по несколько штук. При этом темп толкания заготовок значительно больше, чем при нагреве коротких заготовок. Цилиндрические индукторы для нагрева длинных заготовок должны изготавливаться с высокой равномерностью шага навивок витков, непостоянство этого шага может привести к неравномерности нагрева заготовок по длине. Неравномерность температуры по длине заготовок может быть также при использовании индукторов для ускоренного изотермического нагрева [49] с толкателями для перемещения заготовок, если длина заготовок отличается от длины зон индуктора.

Если заготовки длиннее 500 мм, в индукторе их помещается не более двух-трех. При подаче толкателем очередной холодной заготовки потребляемая индуктором мощность резко возрастает. Это неблагоприятно оказывается на работе источника ТВЧ.

По истечении некоторого времени заготовка теряет магнитные свойства, потребляемая мощность падает. Коэффициент использования установки по мощности оказывается низким. Чтобы избежать резких колебаний мощности, потребляемой индуктором, а также неравномерности нагрева заготовок по длине, вместо толкателей используют механизмы, обеспечивающие непрерывное пере-

мещение заготовок сквозь индуктор, например роликовые. Недостаток непрерывного перемещения — возможность остывания (и окисления) поверхности заготовок на выходе из индуктора.

Для нагрева заготовок длиной больше 500 мм иногда используют секционированные индукторы. Между секциями индуктора устанавливаются ведущие ролики; чтобы поверхность заготовок не охлаждалась и не окислялась при проходе над роликами, секции индуктора должны прилегать друг к другу с минимальным зазором.

Заготовки перемещаются по роликам с постоянной скоростью. Несколько роликов на выходе из индуктора имеют большую скорость вращения. Нагретая заготовка, попадая на эти ролики, бы-

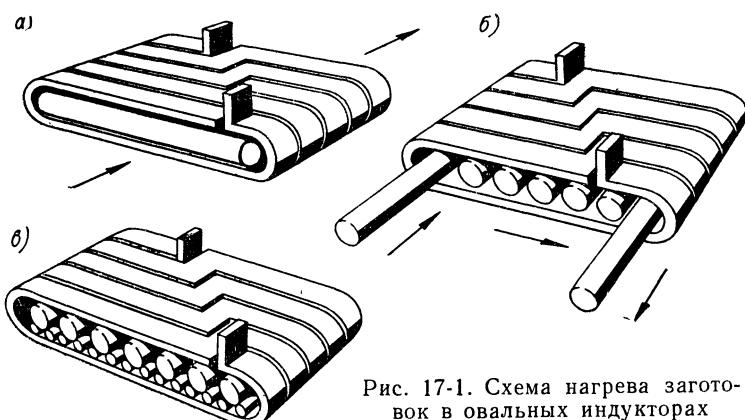


Рис. 17-1. Схема нагрева заготовок в овальных индукторах

стро отрывается от остальных заготовок и поступает к ковочному агрегату. Индуктор упрощается: отсутствуют водоохлаждаемые направляющие. Ролики касаются заготовок в одной точке, поэтому отсос тепла в этом случае меньше.

При большой производительности цилиндрический индуктор получается длинным. Так, для нагрева заготовок диаметром 120 мм при производительности 3000 кг/ч индуктор должен иметь длину более 3 м. При таком индукторе длина нагревателя (вместе с устройством для подачи заготовок и толкателем) получается больше 5 м.

Для уменьшения габаритов нагревательного устройства при нагреве заготовок по всей длине иногда вместо цилиндрических используют овальные и щелевые индукторы. В овальных индукторах заготовки располагают одним из трех способов (рис. 17-1).

В первом случае (рис. 17-1, а) заготовки под действием шагового толкателя перемещаются в индукторе по двум трубчатым направляющим, как показано стрелками. Устройство получается достаточно простым. Однако в каждом индукторе можно нагревать заготовки только определенной длины, при ее уменьшении концы заготовок перегреваются. Температура заготовок поднимается мед-

леннее, чем в цилиндрическом индукторе, так как индуцированный ток протекает только по верхней и нижней частям поверхности заготовок, расположенным вблизи трубок индуктирующего провода. Таким способом можно нагревать заготовки, длина которых в 3—5 раз больше диаметра. Короткие заготовки при проталкивании перекаиваются.

Существенное сокращение длины индуктора достигается только в том случае, если длина заготовок в два-три раза больше диаметра.

По второй схеме (рис. 17-1, б) заготовки подаются в индуктор вдоль своей оси, затем перемещаются шаговым толкателем в попечном направлении. Нагретые заготовки выталкиваются вдоль их оси в ту или иную сторону.

Механизмы подачи и перемещения заготовок в этой схеме сложнее. Переналадка их при изменении длины и диаметра заготовок трудоемка. Поэтому рассматриваемая схема используется редко, только при нагреве заготовок одного определенного размера.

Для нагрева заготовок различной длины предусматриваются отпайки на витках индуктора, которые позволяют отключить часть из них.

В третьей схеме (рис. 17-1, в) заготовки в индукторе неподвижны, лежат на трубчатых водоохлаждаемых направляющих. Заготовка, подлежащая нагреву, подается к индуктору и устанавливается соосно с той из находящихся в нем заготовок, которая достигла ковочной температуры. Затем холодная заготовка проталкивается на место нагретой, последняя при этом выталкивается из индуктора. Эта схема может быть использована для нагрева в одном индукторе заготовок с широким диапазоном диаметров и длины (если предусмотрены отпайки для отключения части витков индуктора). Недостаток ее — плохое заполнение индуктора при нагреве заготовок, диаметр которых отличается от максимального, на который индуктор рассчитан.

Метод нагрева, а также конструкция индуктора зависят также от характера работы ковочного агрегата. Некоторые, например, прокатные станины, прессы для получения сложных профилей и другие агрегаты работают с периодическими, большей частью нерегулярными остановками. В этих условиях поддерживать постоянный режим нагрева в овальном или цилиндрическом индукторе, в котором находится несколько заготовок, затруднительно.

Если на время остановки ковочного агрегата нагрев не прекращается, то некоторое количество заготовок приходится охлаждать на воздухе и возвращать для повторного нагрева. При этом образуется много окалины.

При выключении индуктора заготовки, находящиеся в нем, остывают неравномерно, и при повторном включении часть заготовок также приходится выбрасывать.

Для нагрева заготовок перед прессованием или прокаткой целесообразно использовать периодический метод нагрева (см. гл. 1). В этом случае устанавливают несколько индукторов, в каждом из

которых нагревается одна заготовка. По достижении заготовкой ковочной температуры индуктор переводится в режим термостатирования: по сигналу термопары или фотопирометра он включается и выключается так, чтобы температура поддерживалась на заданном уровне. Выдача заготовок производится по требованию оператора на прессе или стане. Такой метод нагрева может быть рекомендован, если заготовки не сильно отличаются друг от друга по длине и диаметру, чтобы их можно было нагревать, не меняя индуктора. Смена большого числа индукторов, а также перестройка механизмов подачи заготовок сильно усложняет организацию производственного процесса.

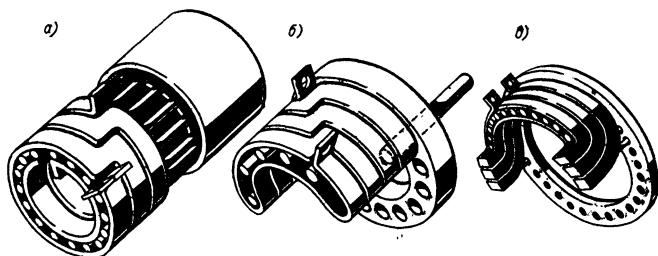


Рис. 17-2. Схемы нагрева концов заготовок

Нагрев концов заготовок. Для нагрева концов могут быть использованы цилиндрические, овальные и щелевые индукторы, (гл. 11, 14).

Если заданная производительность требует одновременного нагрева 1—2 заготовок, то используют соответственно один или два цилиндрических индуктора. При большей производительности число индукторов возрастает. Транспортирование заготовок к индуктору и далее к ковочному агрегату усложняется, автоматизировать его при большой номенклатуре заготовок трудно. Поэтому часто для нагрева концов заготовок предпочитают использовать овальные и особенно щелевые индукторы.

При ручном обслуживании таких индукторов путь, по которому рабочий перемещает заготовки, меньше, чем при обслуживании нескольких цилиндрических. Средства механизации подачи заготовок в овальные и в особенности щелевые индукторы проще, чем для подачи в несколько цилиндрических индукторов. Для нагрева концов заготовок используют также и другие типы индукторов (рис. 17-2).

Кольцевые индукторы состоят из двух цилиндрических многовитковых индуктирующих проводов различного диаметра, которые помещаются концентрически один в другом (рис. 17-2, а). К источнику ТВЧ они подключаются так, чтобы поля их были направлены навстречу друг другу. Нагреваемые заготовки помещаются в промежутке между обеими проводами, где поля складываются.

У овальных (рис. 17-2, б) и щелевых (рис. 17-2, в) индукторов ось изогнута по радиусу, так что нагреваемые заготовки могут перемещаться с помощью барабанного устройства. Такие механизмы получаются более компактными и надежными, чем прямолинейные, которые используются при подаче заготовок в овальные индукторы, показанные на рис. 17-1.

Индукторы для нагрева кузнечных заготовок описаны в литературе [4, 10, 42]. Ниже мы рассматриваем только некоторые из них, разработанные за последнее время.

17-2. Индукторы для нагрева мерных заготовок и прутков

Индуктирующий провод индуктора для нагрева кузнечных заготовок представляет собой многовитковую катушку из прямоугольной квадратной или круглой медной трубы.

Для электрической изоляции витков друг от друга они обматываются стеклолентой или между ними помещаются прокладки из прессшпана, микарата и др. Толщина трубы выбирается в зависимости от глубины проникновения тока, как указано в гл. 1. Та-

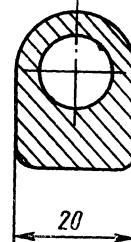


Рис. 17-3. Трубка индуктора для нагрева током промышленной частоты

ким образом, чем ниже частота, тем толще стенки трубок. Индукторы для нагрева на промышленной частоте изготавливаются из трубок специального профиля (рис. 17-3), которые поставляются заводами цветной металлургии. Трубы индукторов для нагрева током частоты 1000—8000 Гц имеют толщину стенок 1—4 мм. При выборе толщины стенки учитывают также размеры трубок. Например, прямоугольные трубы сечением 50 × 15 должны иметь стенку толщиной 2,0—2,5 мм. При более тонкой стенке давление охлаждающей жидкости может деформировать трубку.

Как показывают исследования, проведенные за последнее время, потери в круглых трубках не больше, а в ряде случаев даже меньше потерь в прямоугольных. Однако в прямоугольных трубках за счет увеличения размера, перпендикулярного оси индуктора, можно получить значительно большую площадь для прохода охлаждающей жидкости. Это позволяет изготавливать из прямоугольных трубок индуктирующий провод с меньшим числом ветвей охлаждения (гл. 11). При меньшем числе ветвей охлаждения упрощается смена индуктора, уменьшается число шлангов, подводимых к индуктору.

Прямоугольные трубы изготавливаются из круглых волочением или прокаткой между роликами [42]. Сначала трубкам придается овальная форма, а затем прямоугольная. Так как в отношении потерь овальная трубка эквивалентна круглой, а по площади сечения почти равна прямоугольной, ее вероятно следует рекомен-

довать для изготовления индукторов. При этом упростится профилирование трубок. Кроме того, стеклолента, которой изолируют трубы, будет более долговечна, так как на острых углах она часто разрушается в процессе навивки, сборки и эксплуатации индуктора. Пока, по-видимому, в силу установившейся традиции, овальные трубы используются редко.

К концам индуктирующего провода привариваются медные планки с отверстиями для присоединения токоведущих шин, а также привариваются штуцера для шлангов. Тепловая изоляция между заготовкой и индуктором выполняется одним из следующих способов:

- 1) внутрь индуктирующего провода цилиндрических индукторов вставляют втулки из шамота или жаростойкого бетона [10];
- 2) внутренняя поверхность обмазывается различными жаростойкими обмазками на основе жидкого стекла и различных наполнителей;
- 3) индуктирующий провод с помощью специальных форм заливается внутри и снаружи жаростойким бетоном [10].

После затвердевания бетона все части индуктора оказываются прочно связанными и никаких дополнительных конструктивных элементов для соединения частей индуктора, которые необходимы при двух первых способах изоляции, не требуется.

Индукторы с теплоизоляцией из жаростойкого бетона [10] в настоящее время широко распространены, так как они сравнительно просты в изготовлении, надежны и устойчивы в эксплуатации. Имеются образцы индукторов, у которых бетонная теплоизоляция продержалась более года. Однако ремонт их затруднителен, так как бетон приходится полностью разбивать. При увеличении длины индуктора возрастают трудности, связанные с изготовлением форм, заполнением их бетоном и разборкой после заливки. Поэтому, если длина индуктора должна быть больше метра, его изготавливают из отдельных секций. В целях унификации элементов конструкции, а также форм для отливки все индукторы собираются из секций одинаковой длины и одинаковых наружных размеров. Меняется только внутренняя цилиндрическая оправка, диаметр которой должен соответствовать внутреннему диаметру индуктирующего провода. Заготовки, подлежащие нагреву, разбиваются по диаметрам на несколько групп. Для каждой группы диаметров заготовок внутренний диаметр индуктирующего провода остается постоянным. Это позволяет свести к минимуму число необходимых оправок.

Теплопроводность жаропрочного бетона в 1,2—1,5 раза больше, чем шамота. Толщина бетонной тепловой изоляции из бетона должна быть больше, чем шамотной. При увеличении ее толщины несколько уменьшается электрический к. п. д. индуктора. Поэтому иногда изготавливается комбинированная изоляция. Индуктор заливается бетоном. Толщина бетона на внутренней поверхности индуктирующего провода выбирается минимальной (2—3 мм), при которой конструкция еще имеет достаточную прочность. При этом между бе-

тонной футеровкой и заготовкой остается достаточно места для размещения трубы из шамота или другого материала с низкой теплопроводностью. Вначале при изготовлении индукторов из монолитных секций, залитых в жаростойкий бетон, стремились получить высокую механическую прочность бетонной футеровки. Однако в случае ремонта таких индукторов при удалении футеровки повреждалась медная трубка, из которой изготовлен индуктирующий провод.

В настоящее время разработаны составы бетонов, которые имеют необходимую для длительной эксплуатации прочность и вместе

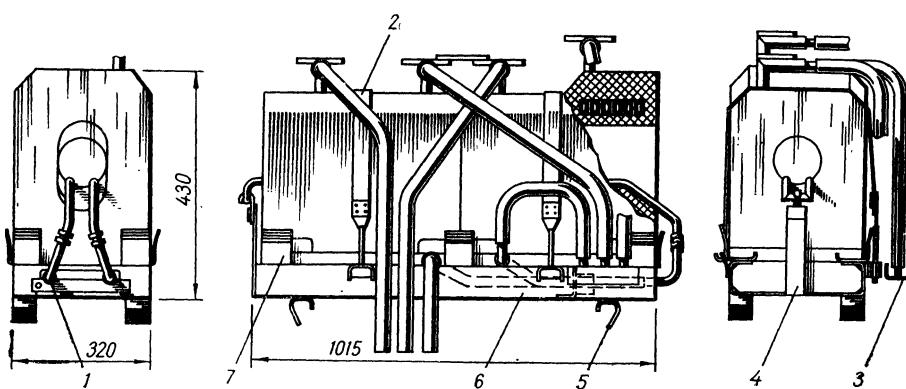


Рис. 17-4. Индуктор для нагрева кузнечных заготовок с теплоизоляцией из жаростойкого бетона

с тем могут быть достаточно легко удалены в случае ремонта индуктора [10].

Индукторы с футеровкой из шамотных трубок и с жаростойкой обмазкой используются уже в течение длительного времени. Они описаны в литературе [4, 42]. Поэтому ниже мы приводим описание только нескольких индукторов нового типа с теплоизоляцией из жаростойкого бетона.

На рис. 17-4 приведен индуктор, предназначенный для нагрева коротких мерных заготовок диаметром 100 мм и длиной 175 мм.

Такие индукторы собираются из секций двух типов длиной 500 мм каждая. Секция первого типа (рис. 17-5) цилиндрическая. Этих секций в индукторе может быть несколько в зависимости от требуемой его длины.

Вторая секция (рис. 17-6), овальная, устанавливается у конца индуктора на стороне выхода заготовок. Она имеет увеличенную высоту, чтобы заготовки могли наклониться и быстро выскользнуть из индуктора, оставаясь до последнего момента в его магнитном поле и поэтому не успевали остить.

Поперечные пазы в нижней части секций служат для пропускания троса при транспортировке их. Секции индуктора собираются

на общей раме 6 (рис. 17-4). От смещения они удерживаются планками 7 и хомутами 2. Водоохлаждаемые направляющие 1 прикреплены к раме 6 хомутами 4. Скобы 5 служат для установки и фиксации индуктора в нагреватель.

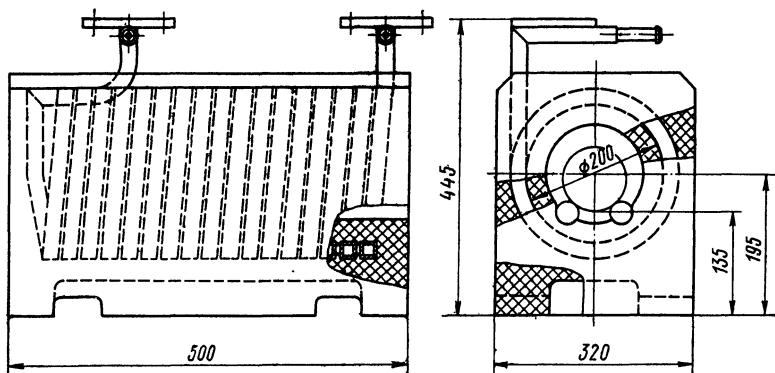


Рис. 17-5. Цилиндрическая секция индуктора, приведенного на рис. 17-4

рования индуктора при установке его в нагреватель. При установке на верстаках и стеллажах эти скобы являются ножками. Из секций, приведенных на рис. 17-5 и 17-6, собираются индукторы длиной

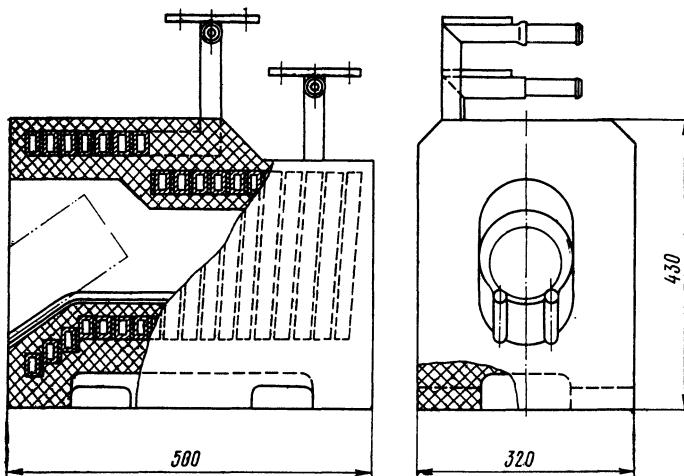


Рис. 17-6. Овальная секция индуктора, приведенного на рис. 17-4

от 500 до 3000 мм. Ошиновка индукционного нагревателя допускает различные комбинации последовательного и параллельного включения секций. Все напорные водяные шланги подводятся к водораспределительной колодке 3.

Колодка (рис. 17-7) состоит из двух половин 3 и 4, между которыми проложены резиновые прокладки 6; к обеим половинам приварены штуцера 1 для водяных шлангов. Нижняя половина 4 с помощью приваренных к ней петель 5 прикрепляется к корпусу нагревателя, верхняя половина 3 присоединяется к шлангам, ведущим к индуктирующему проводу и к водоохлаждаемым направляющим. При смене индуктора болты 2 отвертываются и верхняя половина 3 снимается вместе с индуктором.

Резка заготовок в кузнечных цехах обычно осуществляется механическими ножницами. Ножи последних изнашиваются, поэтому

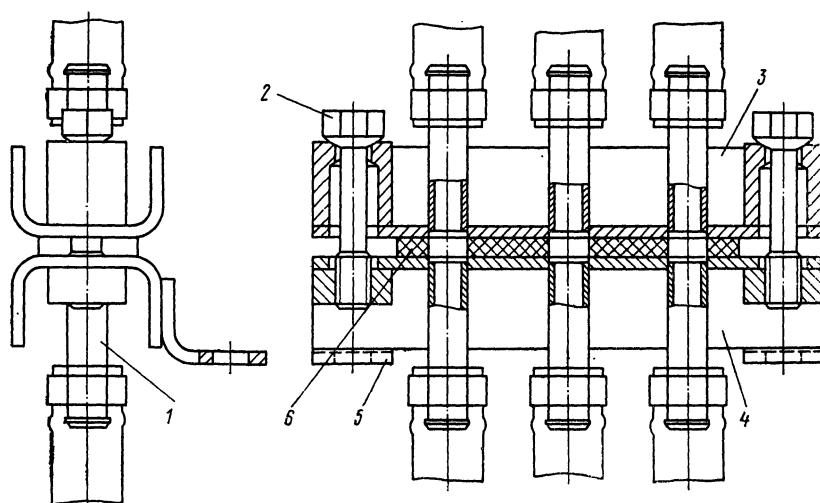


Рис. 17-7. Водораспределительная колодка индуктора

обрез заготовки получается косой с заусенцами. Заготовки в процессе резки искривляются. При перемещении таких заготовок толкателями с периодическим или с непрерывным перемещением заготовок даже в индукторах небольшой длины заготовки заклиниваются и происходит авария. При длине индуктора более 2 м вероятность заклинивания при плохом качестве резки значительно возрастает.

Нагреватели с толкателями имеют еще один существенный недостаток. В случае остановки агрегата все заготовки остаются в индукторе. При начале работы часть из них приходится отбрасывать, так как они не успевают прогреться. При настройке ковочного агрегата нельзя пропускать заготовки небольшими партиями. Эти недостатки особенно заметны при длинных индукторах.

Индукторы с шаговым перемещением заготовок (рис. 17-8 и 17-9) лишены указанных недостатков.

Индуктор собирается из отдельных секций, каждая длиной 300 мм. Три секции устанавливаются на общей раме длиной 1000 мм

и образуют таким образом блок. В состав каждого индуктора входят секции трех типов. Первый — с цилиндрическим индуктирующим проводом (рис. 17-8). Второй и третий с овальным индуктирующим проводом с увеличенной высотой сечения в сторону выхода заготовок (вторая и третья секции, считая слева направо, на рис. 17-9). При такой конструкции заготовка, выходя из индуктора, остается все время в магнитном поле его, наклоняется и быстро выскользывает в приемное устройство ковочного агрегата.

Заготовки поддерживаются в индукторе двумя трубчатыми направляющими 3 (рис. 17-8). Между этими направляющими находят-

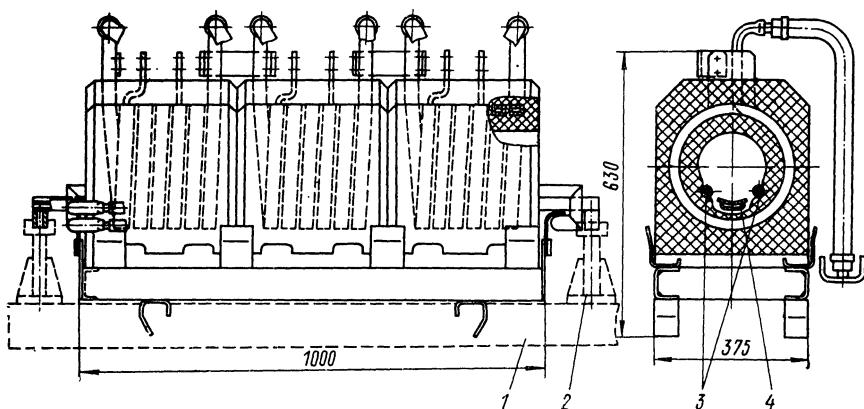


Рис. 17-8. Блок индуктора с цилиндрическими секциями для шагового перемещения заготовок

дится водоохлаждаемый лоток 4. Этот лоток своими концами опирается на кронштейны 2, показанные условно штриховой линией. Последние установлены на раме 1. Вода в лоток 4 подается через отверстия в кронштейнах 2. Рама совершает возвратно-поступательные движения, при этом лоток 4 поднимает заготовки с направляющими 3, перемещает их на несколько десятков миллиметров вдоль оси индуктора и затем опускается вниз, опуская заготовки снова на направляющие 3. Таким образом заготовки перемещаются от одного конца индуктора к другому. Число ходов лотка в минуту, а также величина хода регулируются. Это позволяет изменять темп выдачи нагретых заготовок.

Индуктор разделен на отдельные блоки длиной 1000 мм, для того чтобы между ними расположить опорный кронштейн 2, поддерживающий лоток 4, ибо последний может прогнуться под тяжестью заготовок.

Индукторы с шаговым перемещением заготовок могут иметь большую длину. В этом случае они состоятся из нескольких блоков, каждый длиной 1000 мм. Уже находятся в эксплуатации индукторы длиной 6 м, производительностью 4000 кг/ч при нагреве

заготовок диаметром 160 мм. В индукторах с шагающими механизмами можно нагревать заготовки с косыми срезами с малым отношением длины к диаметру $a_2/D_2 = 0,7 \div 0,8$.

Заготовки можно пропускать по одной или по нескольку штук. В случае необходимости все заготовки могут быть выданы из индуктора. Направляющие и лоток не изнашиваются и могут служить в течение нескольких лет.

Недостаток индукторов с шаговым перемещением заготовок — увеличенные зазоры между заготовками и индуктирующим прово-

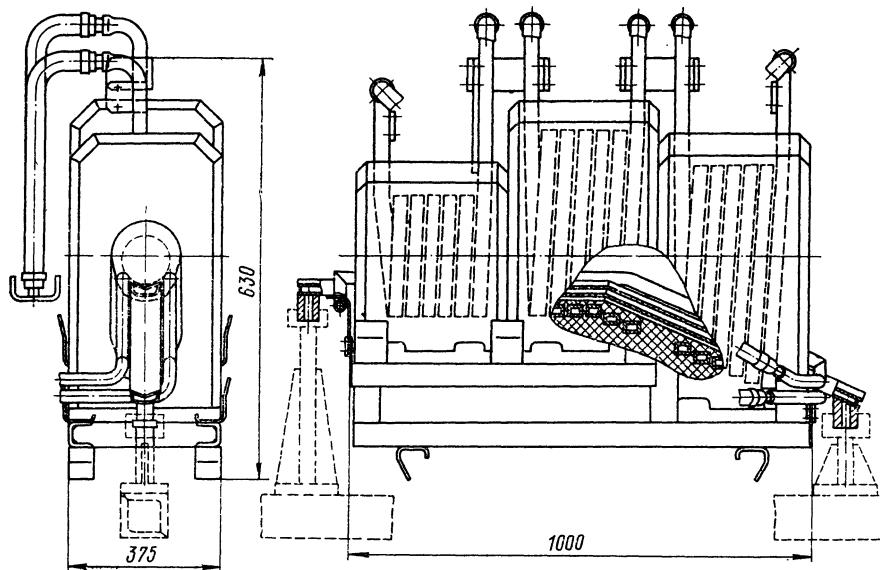


Рис. 17-9. Блок индуктора с овальными секциями для шагового перемещения заготовок

дом, вследствие которых ухудшается $\cos \phi$ и к. п. д. устройства. Несколько увеличиваются потери в направляющих, так как их в данном случае три (две трубы и лоток).

Рассмотренные выше индукторы для методического нагрева заготовок (гл. 1) состоят из отдельных унифицированных секций. В стыках между секциями трудно избежать некоторой неравномерности шага навивки индуктирующего провода. При методическом способе нагрева, когда заготовки перемещаются относительно индуктирующего провода, эта неравномерность слабо сказывается на распределении температуры по длине заготовки.

В индукторах для периодического способа нагрева (гл. 1) заготовки во время нагрева неподвижны. Неравномерность шага навивки индуктирующего провода приводит к неравномерности температуры по длине заготовки. Поэтому эти индукторы, как правило, секционированными не изготавливаются.

Прямоугольная трубка, из которой изготовлен индуктирующий провод индуктора для периодического нагрева заготовок диаметром 170—265 мм, длиной 500—700 мм (рис. 17-10), предварительно сварена из отдельных кусков длиной 6 мм в непрерывную плеть. Таким образом, получен индуктирующий провод, имеющий 28 витков с совершенно равномерным шагом навивки.

Индуктор предназначен для нагрева в защитной атмосфере. Заготовки подаются слева из камеры 1, которая соединена с индуктором патрубком 2. Трубчатые направляющие 3 поддерживающие заготовку, слева закреплены на патрубке 2, а справа на стенке камеры 4, в которую передаются толкателем нагретые заготовки.

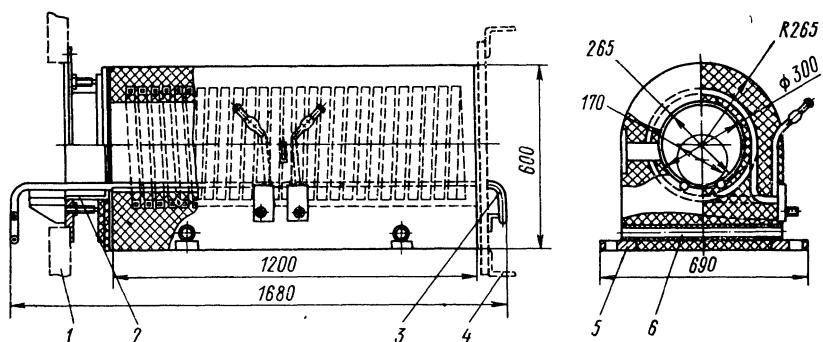


Рис. 17-10. Индуктор для периодического нагрева заготовок диаметром 170—265 мм, длиной 700 мм

Планки 5 с отверстиями служат для крепления индуктора. Трубки 6, приваренные к планкам и залитые в бетонную футеровку, служат для продевания троса или стержней при подъеме индуктора. Окно в футеровке служит для измерения температуры с помощью фотопиromетра. Оно закрывается кварцевым стеклом.

Шаг роликов, поддерживающих и перемещающих заготовки в печах с секционированными индукторами (см. рис. 17-11), не должен быть больше половины длины заготовки, последняя должна всегда лежать по меньшей мере на двух роликах. При нагреве заготовок длиной 500—600 мм шаг роликов может быть не более 200—250 м. Диаметр роликов, чтобы они были достаточно прочными, не должен быть меньше 50 мм (для заготовок диаметром 50—150 мм). Отдельные секции индуктора должны иметь не более 4—5 витков, иначе они не могут разместиться между роликами. Несколько секций включают последовательно, чтобы набрать достаточные для подключения к источнику ТВЧ число витков.

При нагреве заготовок длиной 2—3 м шаг роликов может быть значительно большим, поэтому секции индуктора имеют достаточно большую длину для размещения необходимого числа витков. Однако при увеличении шага горячие заготовки могут деформиро-

ваться под действием силы тяжести. Практически в построенных печах шаг роликов лежит в пределах от 200 до 500 мм.

На рис. 17-11 показана одна из секций индуктора печи, которая используется при нагреве заготовок диаметром 200 мм, длиной 550 мм в защитной атмосфере. Ролики 8, перемещающие заготовку, имеют шаг 250 мм.

В данном случае секция состоит из двух катушек по пяти витков каждая, соединенных последовательно. Петли 1 служат для подъема секции. Рама 5 поддерживает секцию. Она опирается на болты, которые служат для регулировки положения секции при монтаже. Концы 4 индуктирующего провода 7 выведены наружу сквозь

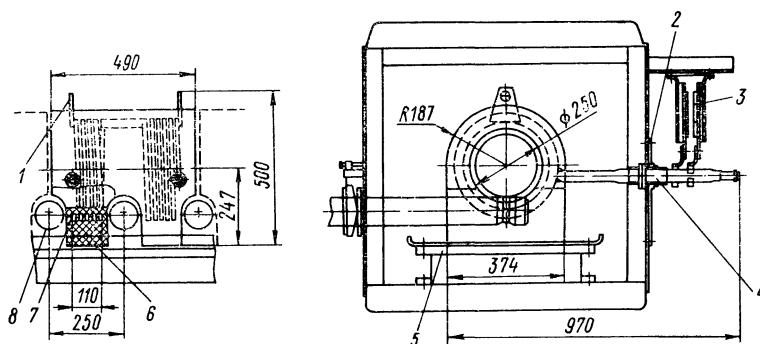


Рис. 17-11. Секция индуктора секционированной печи для нагрева заготовок диаметром 200 мм, длиной 550 мм в защитной атмосфере

стенку камеры для создания защитной атмосферы, в которую помещен индуктор. Крышка 2, сквозь которую проходит индуктирующий провод, изготовлена из текстолита. Выводы уплотнены асбестовыми шнурами. Футеровка 6 из жаростойкого бетона выполнена таким образом, чтобы секциистыковались друг с другом с минимальными зазорами. С помощью съемных перемычек концы 4 присоединены к токоведущим шинам 3, которые закреплены на стенке камеры.

Число секций, устанавливаемых одна за другой, выбирается в зависимости от требуемой производительности устройства.

17-3. Индукторы для нагрева концов заготовок

Если нагревается меньше половины длины заготовки, то ее конец, оставшийся холодным, может быть надежно закреплен в каком-либо транспортном устройстве, как это схематически показано на рис. 17-2, или простоложен на стол, установленный перед индуктором. Нагреваемый конец вводится в индуктор консольно. Если холодный конец имеет небольшую длину, приходится предусматривать в индукторе опоры для нагреваемого конца. При на-

греве заготовок по одной может быть использован индуктор такого же типа, как показанный на рис. 17-10. Овальный индуктор для одновременного нагрева концов шести заготовок показан на рис. 17-12.

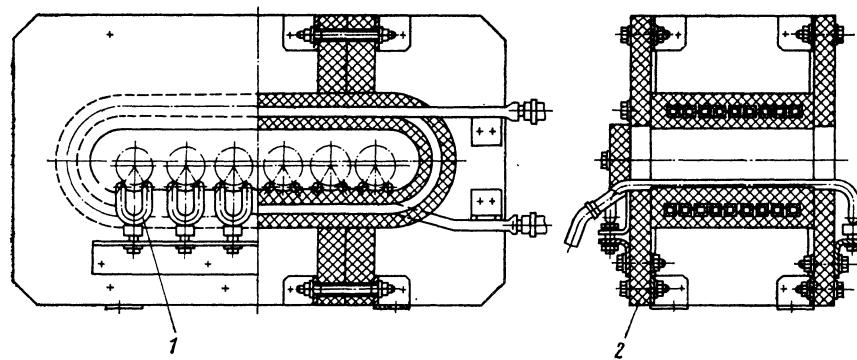


Рис. 17-12. Овальный индуктор для нагрева концов заготовок

Заготовки нагреваемы концами опираются на трубчатые направляющие 1, охлаждаемые водой. Индуктирующий провод залит в жаростойкий бетон. Шифер-асбестовые плиты 2 служат для крепления концов индуктирующего провода и водоохлаждаемых

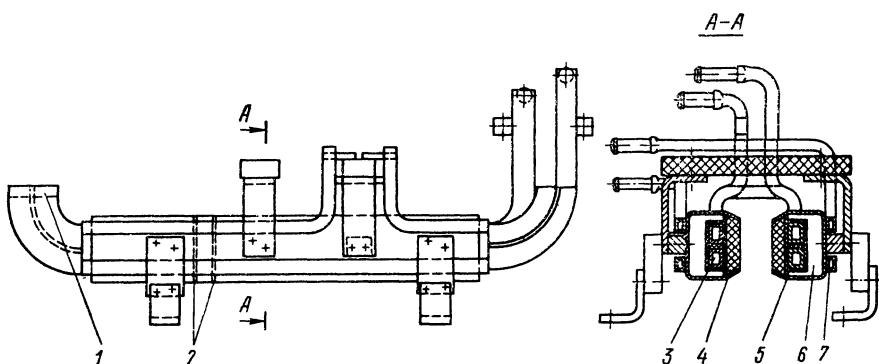


Рис. 17-13. Щелевой индуктор для нагрева концов заготовок

направляющих 1, а также для установки индуктора на нагревателе. Заготовки по очереди помещаются концами в индуктор, а затем по достижении заданной температуры передаются к ковочному агрегату.

Подача легких заготовок часто осуществляется вручную, по сигналам схемы автоматического управления. Для подачи тяжелых заготовок устанавливают перед индуктором толкатели (по оси каж-

дой заготовки). Заготовки подаются к индуктору цепным транспортером.

Проще всего осуществить автоматизацию подачи заготовок в щелевой индуктор (рис. 17-13). Заготовки закрепляются в транспортирующем устройстве (на рис. 17-13 не показано) до их подхода к индуктору. Концы, подлежащие нагреву, выступают над транспортирующим устройством.

Индуктирующий провод 3 состоит из двух витков прямоугольной медной трубки. Концы его отогнуты вверх и образуют П-образные перемычки, под которыми проходят нагреваемые заготовки при входе и выходе из индуктора. Магнитопровод 5 собран в корытообразных медных кожухах 5, охлаждаемых трубками 7. Внутри кожухов на расстоянии 20 мм друг от друга вварены перегородки 2 из меди толщиной 2 мм, между которыми помещаются пластины магнитопровода, из этих перегородок на рис. 17-13 показаны штриховыми линиями только две.

Магнитопровод 6 ограничивает более резко зону нагрева конца заготовки. Кроме того он предохраняет элементы конструкции, окружающие индуктор, от нагрева. Тепловая изоляция индуктора—пластинки 4 из шамота или жаростойкого бетона, которыедерживаются отогнутыми кромками медного кожуха 5.

Щелевые индукторы нерационально использовать при большой длине нагреваемых концов, в этом случае длина концевых П-образных перемычек 1, соединяющих противолежащие стороны индуктирующего провода, становится соизмеримой с длиной этих проводов. При этом к. п. д. щелевого индуктора будет существенно меньше, чем овального индуктора такого же размера.

Если в одном индукторе необходимо нагревать концы различной длины, то предусматривают отпайки на нескольких крайних витках для отключения части из них. При этом при помощи автотрансформатора необходимо изменить напряжение на индукторе, чтобы число заготовок, нагреваемых в час, оставалось приблизительно постоянным.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Таблица II-1
Значения вспомогательных функций $F(z)$ и $F_1(z)$

z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$
0,00	—	—	0,39	3,038	1,662	0,78	1,724	1,124
0,01	112,9	56,41	0,40	2,969	1,630	0,79	1,709	1,119
0,02	54,47	28,22	0,41	2,905	1,602	0,80	1,694	1,114
0,03	37,60	18,82	0,42	2,842	1,574	0,81	1,679	1,109
0,04	28,23	14,14	0,43	2,784	1,548	0,82	1,665	1,105
0,05	22,60	11,32	0,44	2,726	1,522	0,83	1,652	1,101
0,06	18,82	9,434	0,45	2,674	1,500	0,84	1,639	1,097
0,07	16,15	8,101	0,46	2,623	1,477	0,85	1,626	1,093
0,08	14,14	7,096	0,47	2,574	1,456	0,86	1,614	1,089
0,09	12,58	6,317	0,48	2,533	1,437	0,87	1,602	1,086
0,10	11,32	5,698	0,49	2,482	1,417	0,88	1,591	1,082
0,11	10,30	5,192	0,50	2,441	1,399	0,89	1,579	1,079
0,12	9,449	4,769	0,51	2,399	1,382	0,90	1,568	1,076
0,13	8,732	4,415	0,52	2,360	1,366	0,91	1,557	1,073
0,14	8,112	4,110	0,53	2,323	1,350	0,92	1,547	1,070
0,15	7,577	3,844	0,54	2,288	1,335	0,93	1,536	1,067
0,16	7,113	3,617	0,55	2,252	1,321	0,94	1,526	1,064
0,17	6,700	3,413	0,56	2,219	1,308	0,95	1,517	1,062
0,18	6,335	3,235	0,57	2,187	1,295	0,96	1,508	1,059
0,19	6,009	3,076	0,58	2,157	1,283	0,97	1,498	1,057
0,20	5,716	2,933	0,59	2,127	1,271	0,98	1,489	1,055
0,21	5,452	2,805	0,60	2,099	1,260	0,99	1,480	1,052
0,22	5,211	2,687	0,61	2,072	1,249	1,00	1,472	1,050
0,23	4,991	2,581	0,62	2,045	1,239	1,01	1,463	1,048
0,24	4,790	2,484	0,63	2,019	1,231	1,02	1,455	1,046
0,25	4,607	2,396	0,64	1,994	1,220	1,03	1,447	1,044
0,26	4,438	2,316	0,65	1,971	1,211	1,04	1,440	1,043
0,27	4,280	2,240	0,66	1,948	1,202	1,05	1,432	1,041
0,28	4,135	2,171	0,67	1,926	1,194	1,06	1,425	1,039
0,29	3,999	2,106	0,68	1,904	1,186	1,07	1,418	1,038
0,30	3,873	2,048	0,69	1,883	1,179	1,08	1,411	1,036
0,31	3,755	1,992	0,70	1,863	1,172	1,09	1,404	1,035
0,32	3,647	1,942	0,71	1,844	1,165	1,10	1,396	1,033
0,33	3,542	1,892	0,72	1,825	1,158	1,11	1,390	1,032
0,34	3,445	1,847	0,73	1,807	1,152	1,12	1,384	1,031
0,35	3,355	1,806	0,74	1,789	1,146	1,13	1,378	1,029
0,36	3,268	1,766	0,75	1,772	1,140	1,14	1,372	1,028
0,37	3,186	1,728	0,76	1,756	1,134	1,15	1,366	1,027
0,38	3,110	1,694	0,77	1,739	1,129	1,16	1,360	1,026

Продолжение табл. П-1

z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$
1,17	1,354	1,025	1,45	1,236	1,007	1,73	1,166	1,002
1,18	1,349	1,024	1,46	1,233	1,007	1,74	1,165	1,002
1,19	1,343	1,023	1,47	1,229	1,007	1,75	1,163	1,002
1,20	1,337	1,022	1,48	1,226	1,006	1,76	1,161	1,002
1,21	1,333	1,021	1,49	1,223	1,006	1,77	1,159	1,002
1,22	1,327	1,020	1,50	1,221	1,006	1,78	1,157	1,001
1,23	1,323	1,019	1,51	1,217	1,006	1,79	1,156	1,001
1,24	1,318	1,018	1,52	1,215	1,006	1,80	1,154	1,001
1,25	1,313	1,018	1,53	1,212	1,005	1,81	1,152	1,001
1,26	1,309	1,017	1,54	1,210	1,005	1,82	1,150	1,001
1,27	1,304	1,016	1,55	1,207	1,005	1,83	1,149	1,001
1,28	1,299	1,015	1,56	1,204	1,005	1,84	1,147	1,001
1,29	1,295	1,015	1,57	1,202	1,005	1,85	1,146	1,001
1,30	1,290	1,014	1,58	1,199	1,004	1,86	1,145	1,001
1,31	1,286	1,013	1,59	1,197	1,004	1,87	1,143	1,001
1,32	1,282	1,013	1,60	1,194	1,004	1,88	1,142	1,001
1,33	1,278	1,012	1,61	1,192	1,004	1,89	1,140	1,001
1,34	1,274	1,012	1,62	1,190	1,004	1,90	1,139	1,000
1,35	1,270	1,011	1,63	1,187	1,003	1,91	1,137	1,000
1,36	1,266	1,011	1,64	1,185	1,003	1,92	1,136	1,000
1,37	1,263	1,010	1,65	1,183	1,003	1,93	1,134	1,000
1,38	1,260	1,010	1,66	1,181	1,003	1,94	1,133	1,000
1,39	1,256	1,009	1,67	1,179	1,003	1,95	1,131	1,000
1,40	1,252	1,009	1,68	1,176	1,003	1,96	1,130	1,000
1,41	1,249	1,009	1,69	1,174	1,002	1,97	1,129	1,000
1,42	1,245	1,008	1,70	1,172	1,002	1,98	1,128	1,000
1,43	1,242	1,008	1,71	1,170	1,002	1,99	1,126	1,000
1,44	1,239	1,008	1,72	1,168	1,002			

z	$F(z)$	z	$F(z)$	z	$F(z)$	z	$F(z)$
2,00	1,125	2,23	1,101	2,46	1,083	2,68	1,070
2,01	1,124	2,24	1,100	2,47	1,082	2,69	1,069
2,02	1,123	2,25	1,099	2,48	1,081	2,70	1,069
2,03	1,121	2,26	1,098	2,49	1,081	2,71	1,068
2,04	1,120	2,27	1,097	2,50	1,080	2,72	1,068
2,05	1,119	2,28	1,096	2,51	1,079	2,73	1,067
2,06	1,118	2,29	1,095	2,52	1,079	2,74	1,067
2,07	1,117	2,30	1,095	2,53	1,078	2,75	1,066
2,08	1,116	2,31	1,094	2,54	1,078	2,76	1,066
2,09	1,115	2,32	1,093	2,55	1,077	2,77	1,065
2,10	1,113	2,33	1,092	2,56	1,076	2,78	1,065
2,11	1,112	2,34	1,091	2,57	1,076	2,79	1,064
2,12	1,111	2,35	1,091	2,58	1,075	2,80	1,064
2,13	1,110	2,36	1,090	2,59	1,075	2,81	1,063
2,14	1,109	2,37	1,089	2,60	1,074	2,82	1,063
2,15	1,108	2,38	1,088	2,61	1,073	2,83	1,062
2,16	1,107	2,39	1,088	2,62	1,073	2,84	1,062
2,17	1,106	2,40	1,087	2,63	1,072	2,85	1,062
2,18	1,105	2,41	1,086	2,64	1,072	2,86	1,061
2,19	1,104	2,42	1,085	2,65	1,071	2,87	1,061
2,20	1,103	2,43	1,085	2,66	1,071	2,88	1,060
2,21	1,102	2,44	1,084	2,67	1,070	2,89	1,060
2,22	1,102	2,45	1,083				

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Таблица П-2

Значения вспомогательной функции $S(\alpha, \beta, \tau)$ для тела ограниченной толщины с плоской поверхностью

τ	α	β										
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
0,30	0,0	0,3333	0,2383	0,1533	0,0783	0,0133	-0,0417	-0,0867	-0,1217	-0,1467	-0,1617	-0,1667
	0,1	0,2850	0,2500	0,1550	0,0800	0,0150	-0,0400	-0,0850	-0,1200	-0,1450	-0,1600	-0,1650
	0,2	0,2400	0,2200	0,1600	0,0850	0,0200	-0,0350	-0,0800	-0,1150	-0,1400	-0,1550	-0,1600
	0,3	0,1983	0,1866	0,1516	0,0933	0,0283	-0,0267	-0,0717	-0,1067	-0,1317	-0,1467	-0,1517
	0,4	0,1600	0,1525	0,1300	0,0925	0,0400	-0,0150	-0,0600	-0,0950	-0,1200	-0,1350	-0,1400
	0,5	0,1250	0,1200	0,1050	0,0800	0,0450	0,0000	-0,0450	-0,0800	-0,1050	-0,1200	-0,1250
	0,6	0,0933	0,0900	0,0800	0,0633	0,0400	+0,0100	-0,0267	-0,0617	-0,0867	-0,1017	-0,1067
0,20	0,0	0,3031	0,2095	0,1288	0,0605	0,0040	-0,0417	-0,0774	-0,1039	-0,1222	-0,1329	-0,1364
	0,1	0,2553	0,2217	0,1309	0,0625	0,0058	-0,0400	-0,0758	-0,1025	-0,1209	-0,1317	-0,1353
	0,2	0,2117	0,1931	0,1371	0,0684	0,0113	-0,0350	-0,0713	-0,0984	-0,1171	-0,1281	-0,1317
	0,3	0,1724	0,1620	0,1306	0,0781	0,0203	-0,0267	-0,0637	-0,0915	-0,1107	-0,1221	-0,1258
	0,4	0,1371	0,1308	0,1115	0,0791	0,0329	-0,0150	-0,0529	-0,0816	-0,1015	-0,1133	-0,1171
	0,5	0,1058	0,1017	0,0894	0,0687	0,0391	0,0000	-0,0391	-0,0687	-0,0894	-0,1017	-0,1058
	0,6	0,0781	0,0755	0,0677	0,0537	0,0553	+0,0100	-0,0220	-0,0527	-0,0742	-0,0872	-0,0915

Продолжение табл. П-2

τ	α	β										
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,15	0,0	0,2871	0,1943	0,1158	0,0511	-0,0010	-0,0416	-0,0724	-0,0945	-0,1092	-0,1177	-0,1205
	0,1	0,2396	0,2068	0,1182	0,0533	+0,0010	-0,0399	-0,0710	-0,0933	-0,1082	-0,1168	-0,1196
	0,2	0,1986	0,1789	0,1251	0,0596	+0,0067	-0,0349	-0,0667	-0,0896	-0,1051	-0,1139	-0,1168
	0,3	0,1586	0,1489	0,1195	0,0700	+0,0160	-0,0267	-0,0594	-0,0834	-0,0996	-0,1090	-0,1120
	0,4	0,1250	0,1192	0,1017	0,0719	+0,0292	-0,0150	-0,0492	-0,0744	-0,0917	-0,1017	-0,1050
	0,5	0,0956	0,0920	0,0812	0,0627	+0,0359	0,0000	-0,0359	-0,0627	-0,0812	-0,0920	-0,0956
	0,6	0,0700	0,0678	0,0601	0,0496	+0,0328	+0,0100	-0,0195	-0,0480	-0,0668	-0,0795	-0,0834
0,10	0,0	0,2577	0,1664	0,0921	0,0339	-0,0101	-0,0407	-0,0633	-0,0773	-0,0855	-0,0898	-0,0911
	0,1	0,2107	0,1793	0,0949	0,0363	-0,0080	-0,0391	-0,0620	-0,0763	-0,0849	-0,0893	-0,0907
	0,2	0,1693	0,1538	0,1028	0,0434	-0,0019	-0,0343	-0,0581	-0,0734	-0,0828	-0,0878	-0,0893
	0,3	0,1334	0,1249	0,0991	0,0551	+0,0082	-0,0262	-0,0516	-0,0685	-0,0792	-0,0850	-0,0868
	0,4	0,1028	0,0981	0,0838	0,0589	+0,0223	-0,0148	-0,0423	-0,0614	-0,0738	-0,0806	-0,0828
	0,5	0,0768	0,0743	0,0661	0,0517	+0,0301	0,0000	-0,0301	-0,0517	-0,0661	-0,0743	-0,0768
	0,6	0,0551	0,0537	0,0491	0,0409	+0,0285	+0,0098	-0,0152	-0,0393	-0,0558	-0,0654	-0,0685
0,05	0,0	0,2020	0,1146	0,0509	0,0079	-0,0188	-0,0341	-0,0424	-0,0467	-0,0489	-0,0500	-0,0500
	0,1	0,1564	0,1285	0,0544	0,0105	-0,0170	-0,0329	-0,0416	-0,0461	-0,0488	-0,0499	-0,0500
	0,2	0,1187	0,1045	0,0646	0,0188	-0,0111	-0,0293	-0,0397	-0,0452	-0,0482	-0,0497	-0,0500
	0,3	0,0885	0,0827	0,0647	0,0323	-0,0013	-0,0229	-0,0359	-0,0433	-0,0472	-0,0490	-0,0495
	0,4	0,0645	0,0620	0,0537	0,0379	+0,0125	-0,0132	-0,0297	-0,0394	-0,0447	-0,0473	-0,0481
	0,5	0,0463	0,0452	0,0413	0,0338	+0,0207	0,0000	-0,0207	-0,0338	-0,0413	-0,0452	-0,0463
	0,6	0,0321	0,0317	0,0299	0,0266	+0,0197	+0,0088	-0,0084	-0,0258	-0,0358	-0,0414	-0,0431

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Таблица П-3

Значения вспомогательной функции $S(\alpha, \beta, \tau)$ для цилиндра

τ	α	β											
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	
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	0,0788	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	0,0563	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	-0,1063	
	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	0,0860	0,0646	0,0310	-0,0063	-0,0316	-0,0508	-0,0649	-0,0748	-0,0811	-0,0849	-0,0856	
	0,8	0,0658	0,0576	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	0,0260	+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	-0,0246	-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	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 2. Электромагнитное поле. М.—Л., ОНТИ, 1936. 304 с. с ил.
2. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.—Л., «Энергия», 1965. 552 с. с ил.
3. Богданов В. Н. Высокочастотная сварка металлов. [Библиотечка высокочастотника термиста, вып. 11] М.—Л., «Машиностроение», 1965. 66 с. с ил.
4. Богданов В. Н., Рыскин С. Е. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности. [Библиотечка высокочастотника термиста, вып. 12.] М.—Л., «Машиностроение», 1965. 96 с. с ил.
5. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи. (Пер. с нем.) М., «Энергия», 1972. 303 с. с ил.
6. Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. М., «Энергия», 1967. 415 с. с ил.
7. Вологдин В. П. Поверхностная закалка индукционным способом. Металлургиздат, 1939. 244 с. с ил.
8. Вологдин В. П. Поверхностная индукционная закалка. М., Оборонгиз, 1947. 291 с. с ил.
9. Глуханов Н. П., Богданов В. Н. Сварка металлов при высокочастотном нагреве. М.—Л., Машгиз, 1962. 190 с. с ил.
10. Герасимов Е. П., Мартынов В. М., Сасса В. С. Жаростойкие бетоны для электропечей. М., «Энергия», 1969. 145 с. с ил.
11. Головин Г. Ф., Замятин М. М. Высокочастотная термическая обработка. Л., «Машиностроение», 1968. 227 с. с ил.
12. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей [Справочная книга.] Л., «Энергия», 1970. 415 с. с ил.
13. Карслу Х. и Егер Д. Операционные методы в прикладной математике. (Пер. с англ.) М., Изд-во иностр. лит. 1948. 291 с. с ил.
14. Кидин И. Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. М., Металлургиздат, 1952. 316 с. с ил.
15. Кирличев М. В., Михеев М. А., Эйгенсон Л. С. Теплопередача. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940. 292 с. с ил.
16. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967. 599 с. с ил.
17. Люстерник Л. А., Акушевский И. Я., Диткин В. А. Таблицы бесследовых функций. М.—Л., Гостехиздат, 1949. 430 с.
18. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М., Изд-во АН СССР, 1958. 472 с. с ил.
19. Махмудов К. М., Павлов Н. А. Методический нагрев тонкостенных труб в коротких индукторах.—«Труды ВНИИТВЧ», вып. 11, Л., «Машиностроение», 1970, с. 11—25 с ил.
20. Махмудов К. М., Слугоцкий А. Е. Расчет электрических параметров цилиндрических индукторов произвольной длины.—«Труды ВНИИТВЧ», вып. 10. Л., «Машиностроение», 1969, с. 20—35 с ил.
21. Махмудов К. М., Слугоцкий А. Е. Расчет электрических параметров нагревательных индукторов методом наведенных э. д. с.—«Труды ВНИИТВЧ», вып. 11. Л., «Машиностроение», 1970, с. 11—26 с ил.
22. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Л., Госэнергоиздат, 1949. 190 с. с ил.
23. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Ч. III. М.—Л., Энергоиздат. 1948. 343 с. с ил.
24. Немков В. С., Слугоцкий А. Е. Расчет параметров коротких индукторов с помощью схем замещения.—«Труды ВНИИТВЧ», вып. 11. Л., «Машиностроение», 1970, с. 26—36 с ил.
25. Немков В. С. Расчет системы с цилиндрическим экраном для индукционного нагрева.—«Труды ВНИИТВЧ», вып. 6. Л., «Машиностроение», 1965, с. 43—53 с ил.

26. **Немков В. С.** Расчет нагрева полых цилиндров внутренним индуктором.— «Труды ВНИИТВЧ», вып. 7. Л., «Машиностроение», 1966, с. 94—106, с ил.
27. **Натанзон Е. И.** Индукционный нагрев в автомобилестроении. М., «Машиностроение», 1967. 124 с. с ил.
28. **Павлов Н. А.** Ускоренный индукционный нагрев стальных листов.— «Труды ВНИИТВЧ», вып. 6. Л., «Машиностроение», 1965, с.15—25, с ил.
29. **Павлов Н. А.** Тепловые расчеты при индукционном нагреве листового проката.— «Труды ВНИИТВЧ», вып. 6, Л., «Машиностроение», 1965, с. 25—43 с ил.
30. **Павлов Н. А.** Методика выбора оптимального режима при ускоренном нагреве цилиндрических заготовок.— «Электротермия», 1964, вып. 38, с. 25—27 с ил.
31. **Павлов Н. А.** Индукционный нагрев цилиндрических заготовок при однократном изменении мощности.— «Электротермия», 1968, вып. 70, с. 18—22 с ил.
32. **Павлов Н. А.** Нагрев труб в индукторах методического действия.— «Электротермия». 1970, вып. 93, с. 16—20 с ил.
33. **Пейсахович В. А.** Расчет сопротивлений заготовок квадратного сечения при индукционном нагреве.— «Труды ВНИИТВЧ». 1961, с. 5—19 с ил.
34. **Простяков А. А.** Индукционные нагревательные установки. [Библиотека электротермиста, вып. 38.] М., «Энергия», 1970. 120 с. с ил.
35. **Разоренов Г. А.** О распространении тепла при нагревании стального тела индукционным током.— ЖТФ, т. 9, 1939, вып. 10. с. 901—913 с ил.
36. **Разоренов Г. А.** К вопросу о высокочастотной закалке шестерен и тому подобных тел сложной конфигурации.— «Известия ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)», 1940, с. 37—50 с ил.
37. **Родгин Н. М.** Индукционный нагрев стальных изделий. Свердловск, Металлургиздат, 1950. 246 с. с ил.
38. **Слухоцкий А. Е.** Индукторы. [Библиотечка высокочастотника термиста, вып. 6.] М.—Л., «Машиностроение», 1965. 99 с. с ил.
39. **Слухоцкий А. Е.** О сквозном нагреве кузнецких заготовок прямоугольного сечения. В кн.: Промышленное применение токов высокой частоты. Ки. 46, Рига, НТО Машпром, 1957, с. 64—73 с ил.
40. **Слухоцкий А. Е., Павлов Н. А.** Расчет индукционных нагревателей методического действия.— «Электротермия», 1965, вып. 45, с. 45—49 с ил.
41. **Слухоцкий А. Е., Павлов Н. А.** Тепловые расчеты индукционных нагревателей различных типов для сквозного нагрева цилиндрических заготовок.— «Труды ВНИИТВЧ», вып. 7. Л., «Машиностроение», 1966, с. 8—30 с ил.
42. **Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е.** Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей. М.—Л., Машгиз, 1954. 315 с. с ил.
43. **Фарбман С. А., Колобиев И. Ф.** Индукционные печи. М., Металлургиздат, 1958. 704 с. с ил.
44. **Фогель А. А.** Факторы, влияющие на глубину закалки стали при нагреве поверхности индукционным током.— «Судостроение», 1946, № 6, с. 17—20 с ил.
45. **Френкель Н. З.** Гидравлика. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956. 456 с. с ил.
46. **Шепеляковский К. З.** Условие применения метода поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве. В кн.: Применение токов высокой частоты в электротермии, Л., «Машиностроение», 1968; с. 149—166 с ил.
47. **Шепеляковский К. З.** Самоотпуск стали при высокочастотной закалке, М., Машгиз, 1955. 107 с. с ил.
48. **Шамов А. Н., Бодажков В. А.** Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. М.—Л., Машгиз, 1963. 220 с. с ил.
49. **Яйцов С. А.** Ускоренный изотермический индукционный нагрев кузнецких заготовок. М., Машгиз, 1962. 95 с. с ил.
50. **Янке Е., Эмде Ф.** Таблицы функций (с формулами и кривыми). М.—Л., Гостехиздат, 1948. 420 с. с ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Физические основы метода индукционного нагрева	5
1-1. Составные части установки и способы нагрева	—
1-2. Закон электромагнитной индукции	6
1-3. Поверхностный эффект	7
1-4. Эффект близости	13
1-5. Изменение свойств стали в процессе нагрева	15
1-6. Кольцевой эффект	17
1-7. Распределение плотности тока в индуцирующем проводе и нагреваемой детали	—
1-8. Приближенный расчет электромагнитных процессов в системах с конечным поперечным сечением	18
Глава вторая. Тепловой расчет режима нагрева	22
2-1. Основные режимы нагрева	—
2-2. Нагрев при постоянной температуре поверхности	25
2-3. Нагрев при постоянной удельной мощности	30
2-4. Примеры тепловых расчетов	40
2-5. Приближенное определение времени нагрева и удельной мощности при сквозном нагреве цилиндрических заготовок	42
2-6. Приближенное определение времени нагрева и удельной мощности при сквозном нагреве заготовок прямоугольного сечения	45
Глава третья. Общие основы расчета индукторов для нагрева ферромагнитных объектов	47
3-1. Постановка задачи	—
3-2. Зависимость напряженности магнитного поля и плотности тока от координаты	51
3-3. Электрическое и магнитное сопротивления участка ферромагнитной среды	55
3-4. Определение магнитной проницаемости по заданной удельной мощности	56
3-5. Эффективная глубина проникновения тока и глубина проникновения волны	59
Глава четвертая. Общие основы расчета индукторов для нагрева частично ферромагнитных объектов	60
4-1. Постановка задачи	—
4-2. Распределение плотности тока по сечению нагреваемого предмета	62
4-3. Электрическое и магнитное сопротивления нагреваемого металла	65

4-4. Определение магнитной проницаемости по заданному режиму нагрева	68
4-5. Эффективная глубина проникновения тока в двухслойную среду	73
Глава пятая. Расчет индуктора для поверхностного нагрева цилиндрических деталей	74
5-1. Определение ширины нагреваемой полосы	—
5-2. Напряжение на зажимах длинного индуктора	75
5-3. Схемы замещения короткого индуктора	77
5-4. Активное и внутреннее реактивное сопротивления провода индуктора	81
5-5. Расчет подводящих шин	81
5-6. Расчет индуктора	81
Глава шестая. Конструирование индукторов для поверхностного нагрева	9
6-1. Конструирование основных элементов индукторов	—
6-2. Охлаждение индуктора	9
Глава седьмая. Расчет индукторов для закалки плоских и внутренних цилиндрических поверхностей	10
7-1. Особенности нагрева плоских и внутренних цилиндрических поверхностей	—
7-2. Применение магнитопроводов из ферромагнитных материалов	10
7-3. Расчетная ширина активного слоя	10
7-4. Расчет собственных активного и реактивного сопротивлений индуктора	10
7-5. Расчетные параметры индуктора	11
7-6. Расчет подводящих шин	11
7-7. Расчет плоского индуктора	11
7-8. Виды индукторов для закалки внутренних поверхностей	11
Глава восьмая. Типовые конструкции индукторов для поверхностного нагрева внешних и внутренних цилиндрических поверхностей и плоских поверхностей	11
8-1. Неразъемные индукторы	—
8-2. Разъемные индукторы	12
8-3. Индукторы для нагрева плоских поверхностей	12
8-4. Индукторы для нагрева внутренних цилиндрических поверхностей	13
8-5. Петлевые и стержневые индукторы	13
Глава девятая. Выбор частоты при поверхностной закалке и индукторы для закалки тел сложной формы	14
9-1. Выбор частоты при закалке предметов цилиндрической и плоской формы	—
9-2. Закалка тел сложной формы	14
9-3. Приближенный расчет индукторов для закалки деталей сложной формы	14
9-4. Индукторы для закалки тел вращения сложной формы	15
Глава десятая. Индукторы специальных типов	15
10-1. Основные типы специальных индукторов	—
10-2. Индукторы для нагрева под сварку и под пайку	15
10-3. Индукторы для нагрева тонкостенных изделий	16
10-4. Индукторы для закалки зубьев шестерен	16
10-5. Индукторы с электромагнитными экранами	16
10-6. Индукторы-трансформаторы	16

Глава одиннадцатая. Основы расчета индукторов для сквозного нагрева сплошных цилиндрических заготовок	168
11-1. Основные соотношения	—
11-2. Напряжение на индукторе	171
11-3. Электрический к. п. д. индуктора	173
11-4. Выбор частоты	175
11-5. Выбор длины и числа витков индуктора	178
11-6. Определение внутреннего диаметра индуктора. Полный к. п. д. индуктора	179
11-7. Расчет охлаждения индуктора	181
11-8. Расчет индуктора	183
11-9. Нагрев пучка цилиндров	186
Глава двенадцатая. Основы расчета индукторов для нагрева заготовок прямоугольного сечения	189
12-1. Основные соотношения	—
12-2. Напряжение на индукторе	190
12-3. Электрический к. п. д. индуктора	193
12-4. Выбор частоты	194
12-5. Выбор размеров и числа витков индуктора	196
12-6. Расчет индуктора	197
12-7. Нагрев пакета пластин	200
Глава тринадцатая. Расчет индукторов для нагревателей периодического действия	202
13-1. Изменение потребляемой мощности в процессе нагрева и этапы нагрева	—
13-2. Расчет индуктора на постоянное напряжение по этапам нагрева	203
13-3. Расчет индуктора	206
13-4. Приближенный расчет индуктора для нагрева заготовок переменного сечения	211
Глава четырнадцатая. Расчет индукторов с постоянным шагом витков для нагревателей методического действия	213
14-1. Особенности расчета индуктора	—
14-2. Распределение удельной мощности по участкам индуктора	215
14-3. Расчет индуктора	217
14-4. Расчет овального индуктора для непрерывно-последовательного нагрева тонкой ленты	220
14-5. Расчет овального индуктора для нагрева цилиндрических заготовок	221
Глава пятнадцатая. Приближенный расчет индукторов с переменным шагом витков для нагревателей методического действия (ускоренный нагрев)	222
15-1. Время нагрева, средняя мощность в заготовках и основные размеры индуктора	—
15-2. Разделение индуктора на участки и распределение удельной мощности вдоль столба заготовок	223
15-3. Электрический расчет индуктора	224
15-4. Расчет индуктора	226
Глава шестнадцатая. Расчет индукторов для нагрева полых цилиндров	230
16-1. Основные соотношения	—
16-2. Напряжение на индукторе	232
16-3. Электрический к. п. д. индуктора	233

16-4. Выбор частоты	234
16-5. Время нагрева и средняя мощность	235
16-6. Расчет индуктора	236
Глава семнадцатая. Индукторы для нагрева кузнецких заготовок и проката	238
17-1. Выбор способа нагрева и типа индуктора	—
17-2. Индукторы для нагрева мерных заготовок и прутков	243
17-3. Индукторы для нагрева концов заготовок	251
Приложение I	254
Приложение II	256
Приложение III	258
Список литературы	259

**СЛУХОЦКИЙ АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ,
РЫСКИН СОЛОМОН ЕФИМОВИЧ**

ИНДУКТОРЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Редактор В. В. Лебедева

Художественный редактор Г. А. Гудков

Технический редактор В. И. Ботикова

Корректор М. Э. Орешенкова

Сдано в набор 15/III 1974 г. Подписано к печати 27/V 1974 г. М-22764.
Формат 60×90/16. Бумага типографская № 2. Печ. л. 16,5.
Уч.-изд. л. 20,4. Тираж 11000 экз. Заказ № 643. Цена 1 р. 23 к.

Ленинградское отделение издательства «Энергия». 192041, Ленинград,
Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 196126, Ленинград, Ф-126, Социалистическая ул., 14.

49
А.Е.СЛУХОЦКИЙ, С.Е.РЫСКИН

ИНДУКТОРЫ
ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО
НАГРЕВА

Б.3