

Индукционный подогрев

кольцевых стыков труб большого диаметра

Подогрев кольцевых стыков трубопроводов диаметром до 1420 мм с толщиной стенки около 30 мм при сварке производится газовыми горелками, резистивными нагревателями и индукционным способом. Как правило, трубы снаружи имеют антикоррозионное покрытие, поэтому индукционный подогрев, с помощью которого источники нагрева генерируются непосредственно в стенке трубы, представляется предпочтительным.

Виктор Царевский, к. т. н.

victsarij@mail.ru

Для оценки энергетических характеристик процесса подогрева труб в первом приближении можно рассмотреть баланс энергии в кольцевой зоне трубы, расположенной непосредственно под нагревателем, предположив, что вся поступающая в стенку трубы тепловая энергия расходуется на повышение температуры означенной зоны, компенсацию отвода тепла от зоны нагрева по стенке трубы в результате теплопроводности и тепловых потерь с внутренней поверхности стенки зоны. Необходимая плотность потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$) энергии от источника к трубе в этом случае будет:

$$p_0 = (1 + k) \left(\frac{ch\gamma}{t} + \frac{\alpha}{2} \right) \Delta T, \quad (1)$$

где k — коэффициент учета отвода тепла теплопроводностью от зоны нагрева по стенке трубы ($k \leq 1$), c — среднее за период нагрева значение удельной теплоемкости ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$), h — толщина стенки трубы (м), γ — плотность материала трубы ($\text{кг}/\text{м}^3$); α — суммарный коэффициент конвективной теплоотдачи и излучения (при коэффициенте черноты, равном 1) с внутренней поверхности трубы ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$); ΔT — превышение температуры подогрева над исходной температурой трубы ($^\circ\text{C}$). Трубы изготавливают из стали типа 17Г1С или 09Г2С. Теплофизические свойства их близки к свойствам стали 20, приведенным в таблице 1 [1].

Если положить $k = 1$, $c = 502$, $\gamma = 7830$, $h = 0,03$ м, $t = 1800$ с, $\alpha = 20$, $\Delta T = 125$ $^\circ\text{C}$, то необходимая плотность будет равна $p_0 = 18,88 \times 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2 \approx 2 \text{ Вт}/\text{см}^2$. При этом средняя полезная мощность за период нагрева $t = 1800$ с, передаваемая источником в зону на-



Рис. 1. а) Катушечный индуктор; б) петлевой индуктор

Таблица 1. Теплофизические свойства труб

Свойства	Температура, $^\circ\text{C}$		
	50	100	200
λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	51,5	51,1	48,5
c , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	502		
$\rho \times 10^3$, $\text{Ом}\cdot\text{м}$	18,7	21,9	29,2
γ , $\text{кг}/\text{м}^3$	7849	7834	7803

грева, например, шириною $L=0,2$ м при наружном диаметре трубы $D = 1,42$ м, будет:

$$P = p_0 L \pi D = 18 \times 10^3 \text{ Вт}.$$

Для индукционного подогрева кольцевых стыков труб применяют чаще всего два типа индукторов: катушечные (рис. 1а) и петлевые (рис. 1б). В катушечном индукторе ток в соседних витках одного направления. В петлевом индукторе имеются две ветви — прямая и обратная. Токи в ветвях разного направления, а в витках одной ветви — одного.

Поэтому энергетические свойства индукционных систем с катушечными индукторами отличаются от свойств систем с петлевыми индукторами. В качестве примера на рис. 2 представлена схема размещения двух индукторов, симметрично расположенных относительно стыка. В случае применения петлевых индукторов система может быть несимметричной. Плоскость между ветвями одного индуктора, строго гово-

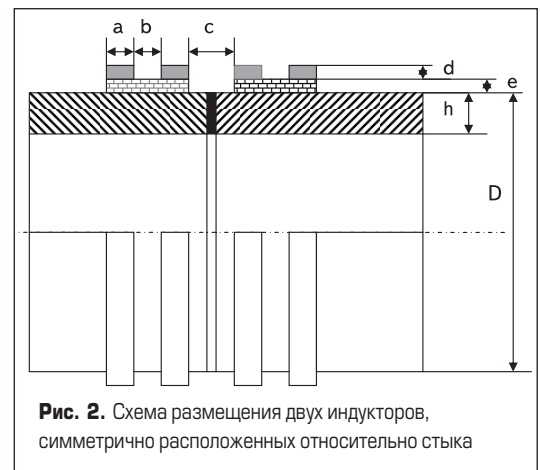


Рис. 2. Схема размещения двух индукторов, симметрично расположенных относительно стыка

ря, не может считаться плоскостью симметрии, как в электромагнитном, так и в тепловом отношении.

Звеном, согласующим промышленную трехфазную сеть 380 В, 50 Гц с однофазными индукционными системами, служит преобразователь частоты. Индукционные системы, работающие на частоте 50 Гц, в принципе, могут согласовываться с сетью с помощью однофазного трансформатора и симметрирующего устройства [2]. Однако такое решение не может конкурировать с инвертором, сочетающим в себе преобразование фаз, частоты и напряжения, а также систему регулирования мощности.

Представляет интерес сравнительная оценка систем с катушечным и с петлевым индуктором. Стали типа 17Г1С и 09Г2С — ферромагнитные. Предварительно полученная величина p_0 такова, что относительная магнитная проницаемость μ_e на поверхности трубы окажет существенное влияние на глубину проникновения электромагнитной волны в стенку трубы. Пользуясь известной методикой [3], можно составить простой алгоритм определения μ_e . Из хорошо известной формулы $p_0 = 2,72 \times 10^{-3} H_e^2 \sqrt{\rho \mu_e f}$, Вт/м², для указанных марок сталей, при $\rho = 23,3 \times 10^8$ Ом·м (табл. 1) определяется:

$$H_e^2 \sqrt{\mu_e} = 7,6 \times 10^3 (p_0 / \sqrt{f}). \quad (2)$$

Здесь H_e — действующее значение первой гармоники напряженности магнитного поля на поверхности (А/м); f — частота тока в индукторе. Если по данным кривой намагничивания определить зависимость $H^2 \sqrt{\mu_e} = \varphi(H)$, то с ее помощью легко определить μ_e . В таблице 2 приведены значения H , μ [4] и $H^2 \sqrt{\mu}$ для стали с содержанием углерода 0,10%.

Таблица 2. Значения параметров для стали с содержанием углерода 0,10%

H, А/м	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
μ	2500	1100	520	360	220	200	190
$(H^2 \sqrt{\mu}) \cdot 10^{-6}$	12,5	33,2	91,2	170,8	237,3	353,6	496,2

Для сравнительной оценки индукторов достаточно ограничиться диапазоном частот от 50 Гц до 40 кГц. В таблице 3 приводятся значения μ_e , определенные по изложенному алгоритму, а также глубина проникновения тока: $\Delta_e = 503 \sqrt{\rho / \mu_e f}$ в нагреваемый металл и Δ_1 — в индуктирующий провод (для справки).

Таблица 3. Значения μ_e , определенные по изложенному алгоритму

f, Гц	50	1000	2500	10 000	40 000
μ_e	73	191	208	397	670
$\Delta_e \times 10^4$, м	40	5,6	3,4	1,2	0,47
$\Delta_1 \times 10^3$, м	10	2,2	1,4	0,7	0,35

Анализируя таблицу 3, можно сделать вывод, что нагрев в рассматриваемом случае носит поверхностный характер. С достаточной для инженерных расчетов точностью из сложной комплексной электромагнитной и тепловой задачи можно выделить тепловую и рассмотреть ее решение в 2D-постановке, например для оценки распределения температуры

в стенке трубы, скорости нагрева и т. д. На рис. 3 представлено распределение температуры в стенке вдоль образующей трубы (координата X в метрах): Т05 — через 30 минут после старта, Т1 — через час. Нагрев считался поверхностным. Расчет произведен при следующих значениях характерных размеров системы (м): $D = 1,42$, $h = 0,03$, $a = 0,06$, $b = 0,06$, $c = 0,09$. Плотность теплового потока от ветвей индуктора $p_0 = 20 \times 10^3$ Вт/м².

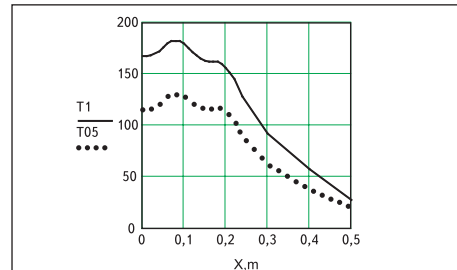


Рис. 3. Распределение температуры в стенке вдоль образующей трубы

Электрические характеристики петлевого индуктора — КПД (η_p) и коэффициент мощности ($\cos \phi_p$) — при тех же размерах системы и $d = 0,015$ м существенно зависят от расстояния b между ветвями (рис. 4) при значениях $b \leq 0,02$ м. В случае равенства ширины ветви a и расстояния между ними b снижение температуры в зоне b незначительное (рис. 2).

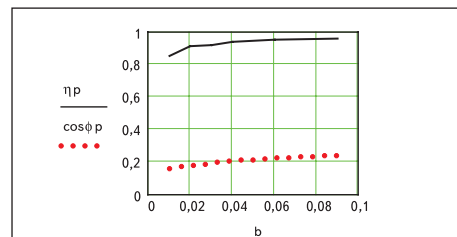


Рис. 4. Электрические характеристики петлевого индуктора

Для сравнения свойств индукционных систем рассмотрены уединенные индукторы с плоскостью симметрии между ветвями. В частотном диапазоне 50–40 000 Гц КПД η_p и $\cos \phi_p$ у петлевого индуктора ниже, чем η_c и коэффициент мощности $\cos \phi_c$ у катушечного (рис 5).

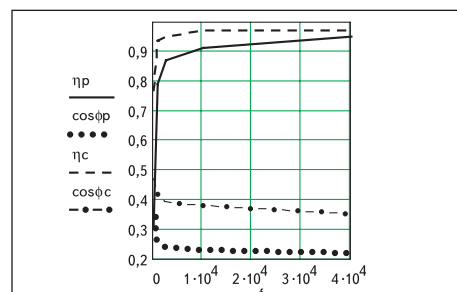


Рис. 5. Сравнение свойств индукционных систем петлевого и катушечного индуктора

При одинаковых размерах и размещении на нагреваемом объекте сравниваемых индукторов, а также мощности, передаваемой на нагреваемый изделие:

$$P = U_p I_p (\eta_p) (\cos \phi_p) = U_c I_c (\eta_c) (\cos \phi_c) \text{ и}$$

$$\frac{U_p I_p}{U_c I_c} = \frac{(\eta_c) (\cos \phi_c)}{(\eta_p) (\cos \phi_p)}, \quad (3)$$

где U_p, I_p, U_c, I_c — напряжение и ток в петлевом и катушечном индукторах соответственно.

Положив $I_p = I_c$ можно найти отношение напряжений $u = U_p / U_c$ (рис. 6), которые надо приложить к индукторам, чтобы достичь одинакового результата по подогреву.

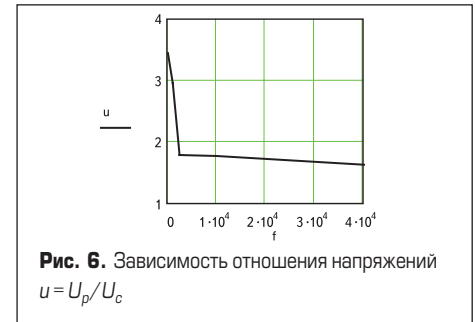


Рис. 6. Зависимость отношения напряжений $u = U_p / U_c$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при частоте свыше 10 кГц у петлевого индуктора несколько ниже η и существенно ниже $\cos \phi$ по сравнению с катушечным индуктором (рис. 5), а отношение $u = U_p / U_c > 1,5$.

Петлевой индуктор может составить конкуренцию катушечному индуктору, если он будет гибким и без водоохлаждения. Тогда его будет легко, за один оборот вокруг трубы, накладывать на зону нагрева и подключать к источнику [5]. Однако такого рода индуктор будет иметь $p_0 \leq 2$ Вт/см², что недостаточно для подогрева кольцевого стыка трубы диаметром 1440 мм при отрицательной окружающей температуре (–20 °С и ниже).

Катушечный индуктор разъемного типа с витками из медного профиля с развитой поверхностью воздушного охлаждения позволяет получить $p_0 > 3,5$ Вт/см² и произвести подогрев при отрицательных температурах.

В заключение следует отметить, что результаты численного моделирования совмещенной электротепловой задачи, симметричной относительно плоскости стыка для петлевых и катушечных индукторов и несимметричной для петлевых индукторов, мало отличаются от приведенных в настоящей публикации. Более обстоятельный анализ этих результатов — предмет отдельной статьи.

Литература

1. Казанцев Е. И. Промышленные печи / Справочное руководство для расчетов и проектирования. М.: Metallurgia, 1975.
2. Васильев А. С., Гуревич С. Г., Иоффе Ю. С. Источники питания электротермических установок. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974.
4. Пейсахович В. А. Оборудование для высокочастотной сварки металлов. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
5. ProHeat Induction Blankets. Induction Heating System. Issued Oct. 2006. Index No. IN/3.1 (http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/IN3-1.pdf)