

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ¹

Г.Е. Левшин

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования электротехнических и тепловых параметров электромагнитной индукционной плавильной тигельной печи с изогнутым U- и C-образным магнитопроводом и частотой 50 Гц. Показана возможность быстрой плавки силумина и латуни в лабораторной печи.

Ключевые слова: индукционная электромагнитная печь, изогнутый магнитопровод.

В 2013 г. предложены электромагнитные индукционные плавильные тигельные печи (ЭМ-печи), которые в отличие от наиболее распространенных индукторных индукционных печей имеют изогнутый магнитопровод U- или C-образной формы с двумя полюсами, обращенными друг к другу, между которыми расположены тигель и витки индуктора (электрической катушки), охватывающие магнитопровод. При повороте U-образного магнитопровода на 90° печь становится C-образной. Такие печи создают горизонтальный магнитный поток [1]. Методика проектирования и расчета основных электрических, магнитных и тепловых параметров этих печей отсутствует [2, 3].

Для получения данных об их работе, необходимых при проектировании и расчете, изготовили экспериментальную ЭМ-печь (рис. 1) с U- и C-образным магнитопроводом, набранным вручную из пластин толщиной 0,4 мм трансформаторной стали. Индуктор изготовили сначала в виде многослойной электрической катушки (ЭК) из 390 витков алюминиевого провода сечением $S_{пр}=3,1 \text{ мм}^2$ (серия опытов 1), а затем (серии 2, 3) из 60 витков многожильного медного обмоточного провода в эмалированной изоляции общей площадью сечения $30,5 \text{ мм}^2$.

ЭК намотаны вручную на каркас из диэлектрика. Площадь сечения $S_{ЭК}$ окна ЭК 280 см^2 , а рабочий объем V_p межполюсного пространства $5,7 \text{ дм}^3$. ЭМ-печь питали переменным током ($f=50 \text{ Гц}$) от сети напряжением 380 и 220 В, в т. ч. через масляный автотрансформатор РНО-250-10.

Измеряли активное сопротивление ЭК R_a , напряжение $U_{ЭК}$ и общий ток ЭК $I_{ЭК}$.

Затем (в серии 1) отматывали от ЭК по 1 При участии Сергеева С.Ю.

50 витков и повторяли измерения.

По результатам измерений вычислили и другие параметры: магнитодвижущую силу (МДС) ЭК $I_{ЭК}w$, плотность тока j , полную S , активную P и индуктивную Q_L мощности,



Рисунок 1 – ЭМ-печь в ванне с маслом

полное z , активное R_a (проверочно) и индуктивное X_L сопротивления, коэффициент мощности $\cos\varphi$, индуктивность $L_{эм}$ ЭМ-печи, активный I_a и индуктивный I_L токи, активное U_a и индуктивное U_L напряжения по известным формулам [2]:

$$S=U_{ЭК}I_{ЭК}; j=I_{ЭК}/S_{пр}; z=U_{ЭК}/I_{ЭК}; R_a=\rho L_{пр}/S_{пр};$$

$$X_L = \sqrt{z^2 - R^2}; \cos\varphi=R_a/z; \sin\varphi=X_L/z;$$

$$P=S \cos\varphi; Q_L=S \sin\varphi; L_{эм}=X_L/2\pi f; I_a=I_{ЭК} \cos\varphi;$$

$$I_L=I_{ЭК} \sin\varphi; U_a=U_{ЭК} \cos\varphi; U_L=U_{ЭК} \sin\varphi.$$

Анализ полученных данных показал.

1. При уменьшении числа витков w с 390 до 90 (в 4,33 раза) все рассматриваемые

параметры изменяются. При этом одни параметры ($I_{ЭК}$, I_a , I_L , j , $I_{ЭК}W$, $H_{ЭК}$, $F_{пл}$, $F_{пр}$, S , P , Q_L , $\cos\varphi$) увеличивают свое значение, а другие (z , R_a , x_L , $\sin\varphi$, $L_{ЭМ}$) – уменьшают. Степень увеличения и уменьшения всех электрических параметров не зависит от значения напряжения и неодинакова для разных параметров. Так, $\cos\varphi$ увеличивается в 3,35 раза, $I_{ЭК}W$, $H_{ЭК}$ – ~ в 4,3 раза, $I_{ЭК}$, I_L , j , S , Q_L , – ~ в 18-19 раз. Больше всего (~ в 63 раза) увеличиваются активные ток I_a и мощность P . Это происходит, по-видимому, из-за уменьшения всех сопротивлений, а именно: активного R_a в 5,55 раза, полного z и индуктивного x_L – ~ в 19 раз, а также индуктивности $L_{ЭМ}$ – ~ в 19 раз.

2. Величина одних параметров ($I_{ЭК}$, I_a , I_L , j , $I_{ЭК}W$, $H_{ЭК}$, $F_{пл}$, $F_{пр}$, S , P , Q_L) зависит от значения напряжения, а других (z , R_a , x_L , $\cos\varphi$, $\sin\varphi$, $L_{ЭМ}$) – не зависит.

3. При увеличении напряжения с 220 до 380 В (в 1,73 раза) значения активной P , полной S и индуктивной Q_L мощностей повышаются в 2,71 – 3,28 раза (при разных w).

4. Значения полных ($I_{ЭК}$, S , z) и соответствующих индуктивных (I_L , Q_L , x_L) параметров весьма близки между собой. Поэтому при дальнейшем рассмотрении ограничимся первыми.

5. Полные и индуктивные токи, сопротивления и мощности ($I_{ЭК}$, I_L , z , x_L , S , Q_L) значительно (~ на порядок) превышают по величине соответствующие активные параметры (I_a , R_a , P).

Графическая же обработка результатов показывает, что с увеличением числа витков w все виды токов, мощностей и плотности тока уменьшаются (рис. 2).

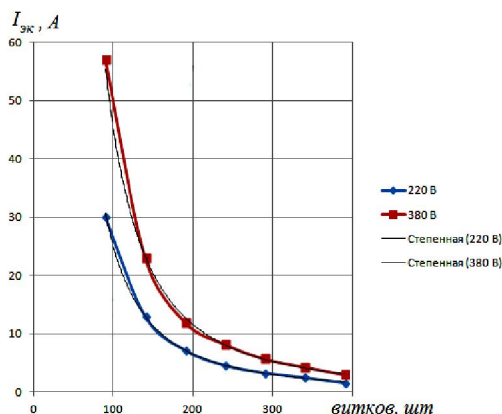


Рисунок 2 – Зависимость полного тока $I_{ЭК}$ от числа витков w при 380 и 220 В

Полученные уравнения аппроксимации подтверждают это с высокой достоверностью

$$R^2 = 0,9935 - 0,9984.$$

$$I_{ЭК} = 382290 \cdot w^{-1,964}, I_{ЭК} = 188870 \cdot w^{-1,94},$$

$$I_a = 1E + 06 \cdot w^{-2,762}, I_a = 547315 \cdot w^{-2,734},$$

$$S = 145493 \cdot w^{-1,964}, S = 37102 \cdot w^{-1,916},$$

$$P_a = 4E + 08 \cdot w^{-2,765}, P_a = 1E + 08 \cdot w^{-2,716},$$

$$j = 109578 \cdot w^{-1,943}, j = 59318 \cdot w^{-1,936},$$

Ампервольтовые (АВХ) и вольтамперные характеристики (ВАХ) этой печи с разным числом витков весьма близки к прямолинейным. Так, при $w = 90$ витков

$$U_{ЭК} = 6,8113 \cdot I_{ЭК}, R^2 = 0,9957$$

$$I_{ЭК} = 0,1466 \cdot U_{ЭК}, R^2 = 0,9959$$

Значения же всех сопротивлений и индуктивности закономерно возрастают, причем R_a прямо пропорционально, а z , x_L и $L_{ЭМ}$ по параболическому закону (рис. 3). Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,993 - 0,998$.

$$R_a = 0,0079 \cdot w - 0,0811,$$

$$z = 0,0009w^2 - 0,0264w + 1,5389,$$

$$L_{ЭМ} = 3E - 06 \cdot w^2 - 8E - 05 \cdot w + 0,0046.$$

Одним из важнейших параметров ЭМ-печи является МДС $I_{ЭК}W$, которая создает (сначала) магнитное поле напряженностью $H_{ЭК}$ и индукцией $B_{ЭК}$ в полости ЭК и (затем) полный магнитный поток $\Phi_{пол}$ с индукцией B_i в материале магнитопровода. Он разделяется на рабочий поток $\Phi_{раб}$ с индукцией $B_e < B_i$ в воздухе ее межполюсного рабочего объема V_p и поток рассеяния $\Phi_{рас}$ вокруг ЭМ-печи. Поток $\Phi_{раб} = B_e S_{пот}$ обеспечивает появление в электропроводной шихте индуктивной ЭДС с напряжением $U_{инд}$, которая, в свою очередь, создает индукционные вихревые токи $I_{инд}$, нагревающие ее и создающие теплоту $Q_{нагр}$ за время t , в соответствии с формулами [2]:

$$U_{инд} = 4,44 f B_e S_{пот}, I_{инд} = 4,44 f B_e S_{пот} / R_{аш}, Q_{нагр} = I_{инд}^2 R_{аш} t,$$

где $S_{пот}$ – площадь поверхности, через которую проходит рабочий поток $\Phi_{раб}$;

$R_{аш}$ – активное сопротивление шихты.

Как уже показано, из произведения $I_{ЭК}W$ число витков w является конструктивным и практически мало изменяемым параметром (после проектного расчета). Оно определяет все сопротивления и индуктивность $L_{ЭМ}$. Ток же $I_{ЭК}$ появляется в витках ЭК под действием электрического напряжения $U_{ЭК}$, которое технически легче изменить.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Активная мощность P обеспечивает нагрев подводящих проводов и витков ЭК, перемагничивание (гистерезис) материала магнитопровода и создание вихревых токов в нем. Индуктивная же мощность Q_L является результатом явления самоиндукции и не совершает полезного действия, а только «загружает» подводящие провода и витки ЭК. Это относится и к соответствующим токам $I_{ЭК}$, I_a , I_L и напряжениям $U_{ЭК}$, U_a , U_L .

Эти мощности и плотность тока j увеличивают свое значение по закону квадратич-

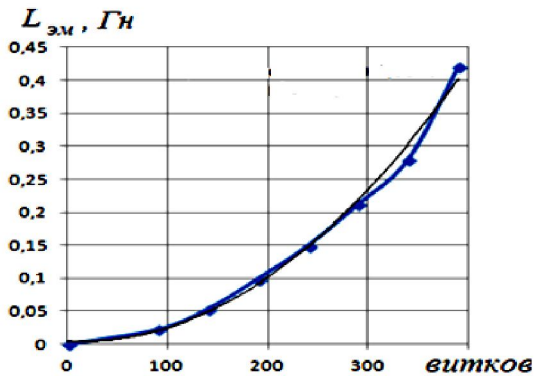


Рисунок 3 – Зависимость индуктивности $L_{эм}$ от числа витков

ной вогнутой параболы с повышением $I_{ЭК}w$ (рис. 4). При этом изменение активной мощности P и плотности тока j зависит от величины напряжения, а полной S – практически не зависит (рис. 4). Особо отметим, что при повышении только w эти мощности и плотность тока, наоборот, уменьшают свое значение (см. рис. 2 и уравнения).

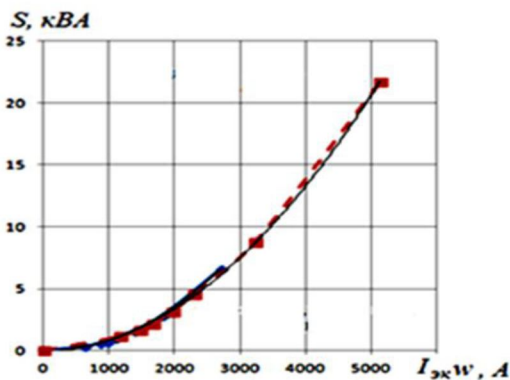


Рисунок 4 – Зависимость полной мощности S от МДС $I_{ЭК}w$ при 380 и 220 В

Эти зависимости аппроксимировали как

$$S = 8E - 07(I_{ЭК}w)^2 + 1E - 04I_{ЭК}w -$$

$$0,0847,$$

$$S = -06(I_{ЭК}w)^2 - 0,0002I_{ЭК}w + 0,0311,$$

$$P = -05(I_{ЭК}w)^2 - 0,1034w + 12,53,$$

$$P = 1E - 04(I_{ЭК}w)^2 - 0,083I_{ЭК}w + 9,3074,$$

$$j = -07(I_{ЭК}w)^2 - 05I_{ЭК}w - 0,0458,$$

$$j = 1E - 06(I_{ЭК}w)^2 - 0,0003I_{ЭК}w + 0,0467,$$

С учетом результатов серии 1 опытов и известной зависимости [2] числа витков w_0 , приходящихся на 1 В напряжения, от площади сечения $S_{ЭК}$ при естественном охлаждении многослойной ЭК $w_0 = 27,167 \cdot S_{ЭК}^{-0,813}$, определена необходимость уменьшения числа витков (до 60) и плотности j и увеличения площади $S_{пр}$ (до 30,5 мм²).

Для изучения влияния емкости C конденсаторов на параметры ЭМ-печи их объединяли в батарею (КБ) и подключали параллельно ЭК (в сериях 1 - 3). Ее электрическую емкость повышали увеличением числа конденсаторов. Измеряли токи: общий $I_{общ}$, в ЭК $I_{ЭК}$ и в КБ $I_{КБ}$. При $C=0$ $I_{общ} = I_{ЭК}$. Установлено, что с увеличением емкости C уменьшают свое значение $I_{общ}$ и $I_{ЭК}$, но увеличивает $I_{КБ}$. При достижении примерного равенства $I_{ЭК}$ и $I_{КБ}$ определялась необходимая емкость C . Так, при подаче на ЭК с 60 витками через автотрансформатор 250 В и емкости $C=1390$ мкФ установились токи: $I_{ЭК}=I_{КБ}=87$ А и $I_{общ}=12$ А (серия 2). Применение КБ позволяет снизить в этом случае мощность, потребляемую печью из сети, с 21,75 до 3 кВА (в 7 раз).

При этих параметрах в серии 2 расплавили за 45 мин кусковой силумин АЛ9 при естественном охлаждении ЭК и плотности тока в ней 2,85 А/мм². Температуру силумина измеряли прибором «Диск-250» с термопарой ХА, а других частей – ртутными термометрами.

Графики нагрева силумина, наружной поверхности кожуха тигля, ЭК и магнитопровода приведены на рис. 5. Их аппроксимировали уравнениями (при $R^2=0,91 - 0,99$) как

$$T_{сил} = 0,0066t^3 - 0,7882t^2 + 36,899t + 19,$$

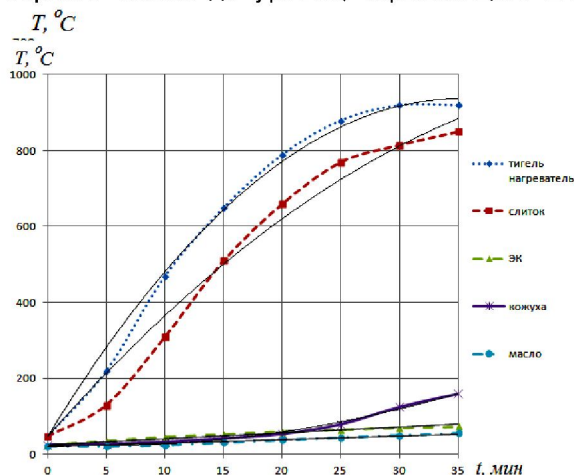
$$T_{ЭК} = 0,9467x + 19, T_{кож} = 1,9984 \cdot t + 19,$$

$$T_{магн} = 1,8874 \cdot t + 19.$$

Эти данные показывают высокую скорость в начале нагрева силумина 30 °С/мин и ее снижение до 3 °С/мин в конце. Элементы печи нагреваются по линейной зависимости с разной скоростью и неодинаково: тигель до 110 °С, магнитопровод от него до 88 °С, а ЭК до 58 °С.

В серии 3 опытов расплавили слиток латуни ЛЦ40С в этой же печи за 35 мин при

подключении ЭК к сети 380 В и $C=1390$ мкФ. Использовали комбинированный тигель, в кожухе которого Рисунок 5 – Зависимости температур T силумина, тигля, ЭК и магнитопровода от времени t был размещен медный тигель, выполняющий функции дополнительного нагревателя. Для предотвращения перегрева ЭК печь установили на деревянные опоры в пластмассовую ёмкость, в которую залили ~ 30 л отработанного трансформаторного масла до уровня, скрывающего 2/3



ЭК (рис. 1).

Рисунок 6 – Зависимости температур тигля, слитка, кожуха, ЭК, масла от времени t

Температуру измеряли приборами ТРМ-1 (латунь), «Диск-250» (медный тигель) с термодарами ХА в чехлах, а ртутными термометрами — верх ЭК и масло. Их результаты представлены графиками на рис. 6 и уравнениями аппроксимации ($R^2=0,93 - 0,99$)

$$T_{\text{тигль}} = -0,7211t^2 + 50,638t + 47,$$

$$T_{\text{слитка}} = -0,3174t^2 + 35,022t + 47,$$

$$T_{\text{ЭК}} = 1,5771t + 24, T_{\text{масла}} = 0,9014t + 21,$$

$$T_{\text{кожуха}} = 0,1436t^2 - 1,1375 \cdot t + 24,$$

После минутного включения печи было минутное ее отключение. Этим объясняется температура 47 °С в уравнениях для слитка и тигля.

В начале нагрева токи имели значения $I_{\text{ЭК}}=154$ А, $I_{\text{КВ}}=149$ А и $I_{\text{общ}}=46$ А, а в конце 147,

139 и 34 А, соответственно, а потребляемая мощность 17,48 кВА. Это объяснили недостаточной емкостью C батареи и повышением активного сопротивления ЭК и индуктивности ЭМ-печи при нагреве. Эти данные также показывают высокую скорость до 20-й минуты нагрева меди (≈ 40 °С/мин) и латуни (>30 °С/мин) и ее снижение до ~ 3 °С/мин в конце. Верх ЭК и масло нагреваются по линейной зависимости с разной скоростью и неодинаково: ЭК до 73 °С, а масло до 55 °С. Кожух нагревается теплом меди до 160 °С (через тонкий слой теплоизоляции) и отдает его магнитопроводу.

Выводы. 1. U- и C-образный магнитопроводы увеличивают индукцию $B_{\text{ЭК}}$, создаваемую ЭК, в 5 – 10 раз.

2. Присоединение конденсаторов с необходимой емкостью позволяет до 6 – 10 раз снизить ток и мощность, потребляемую печью из сети, и добиться резонанса токов.

3. Для каждого типоразмера магнитопровода существуют оптимальные число витков, величина м.д.с. и мощности, потребляемой ЭК и циркулирующей в L-C-контуре.

4. При плотности тока > 2 А/мм² необходимо принудительное охлаждение ЭК.

5. Доказана возможность быстрой плавки силумина и латуни в лабораторной ЭМ-печи и снижения температуры ЭК даже при неполном погружении её в масло.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левшин Г. Е., Кульдяйкин Д. С., Левагин А. В. Развитие индукционной тигельной плавки в печах промышленной частоты. /Актуальные проблемы в машиностроении. Матер. 1 международн. научно-практич. конф. – Новосибирск, 2014. - С. 33 – 32.
2. Иванов И. И., Соловьев Г.И., Фролов В. Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. – Спб.: «Лань», 2012. – 736 с.
3. Индукционные тигельные печи: Учебное пособие /Л.И. Иванова, Л.С. Грובהва, Б.А. Сокунов, С. Ф. Сарапулов. – Ека теринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 87 с.

Левшин Геннадий Егорович - д.т.н., профессор, кафедра МТuO АлтГТУ, levshing@mail.ru