

УДК 621.365.5  
DOI: 10.12737/18075

Г.Е. Левшин, д.т.н.  
(Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)  
E-mail: levshing@mail.ru

## Научноёмкие технологии индукционной плавки в индукторных и электромагнитных тигельных печах

*Рассмотрены достоинства и недостатки научноёмкой технологии индукционной тигельной плавки литейных сплавов двух видов: вертикальным и горизонтальным электромагнитным потоком. Проведено сравнение основных конструктивных и рабочих параметров процесса плавки и самих печей. Выявлены общие и отличительные особенности. Использование технологии и печей обоих видов позволит расширить область применения индукционной плавки.*

**Ключевые слова:** индукторные печи с вертикальным потоком; электромагнитные печи с горизонтальным потоком.

G.E. Levshin, D.Eng.  
(Polzunov State Technical University of Altai, Barnaul)

## Science intensive technologies in induction melting in inductor and electro-magnetic crucible furnaces

*Merits and demerits in high technology of a induction crucible melting of casting alloys of two types: with vertical and horizontal electromagnetic streams are considered. The comparison of basic design and operation parameters of a fusion process and furnaces themselves is carried out. General and characteristic peculiarities are revealed. The use of techniques and furnaces of both types will allow widening the field of induction fusion application.*

**Keywords:** inductor furnaces with vertical stream; electromagnetic furnaces with horizontal stream.

Научноёмкая технология индукционной тигельной плавки литейных сплавов имеет два вида: вертикальным и горизонтальным электромагнитным потоком частотой  $f \geq 50$  Гц. Первая осуществляется в индукторных печах (ИП), в т.ч. оснащенных вертикальными магнитопроводами (до 11 – 12 шт.), размещенными снаружи вертикального индуктора с определенным шагом и предназначенными для улавливания электромагнитного потока рассеяния [1 – 3] (рис. 1).

Вторая осуществляется в электромагнитных печах, предложенных в 2013 г. и воздействующих на шихту и расплав горизонтальным потоком, создаваемым электромагнитным устройством с изогнутым магнитопроводом-корпусом U-, O- или C-образной формы [1, 4 – 6] (рис. 2). Поэтому они названы электромагнитными (ЭМ-печи).

Цель статьи – выявление и рассмотрение достоинств и недостатков этих видов плавки для установления их общих и отличительных особенностей и определения рациональной области применения.

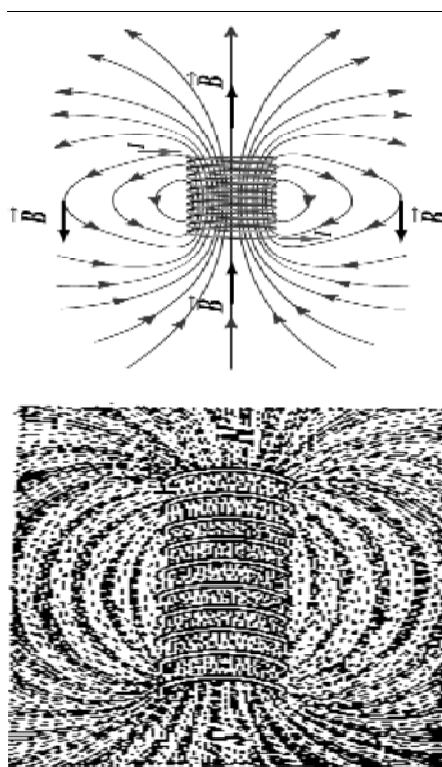


Рис. 1. Схема магнитного потока индукторной печи

В обоих случаях в каждом куске электропроводной шихты и внутри расплава диаметром  $d$  с магнитной проницаемостью  $\mu_i$ , электросопротивлением  $R_{ш}$  и удельным электросопротивлением  $\rho$  выделяется в течение времени  $t$  тепло  $Q$ . Оно создается вихревым замкнутым в горизонтальной или вертикальной плоскости током  $I_v$ , который индуцируется непосредственно переменным вихревым электрическим полем частотой  $f$  и э.д.с.  $U_v$ . Это поле в свою очередь индуцируется вертикальным или горизонтальным переменным рабочим магнитным потоком  $\Phi_{раб}$  с индукцией  $B_e$  (напряженностью  $H_e$ ) и площадью  $S$ . Вертикальный поток создается переменным же электрическим током  $I_{инд}$  в витках  $w$  вертикального индуктора высотой  $h_{инд}$  и диаметром  $D_{инд}$ , возбужденным э.д.с.  $U$  и источника электроэнергии. При этом происходят превращения энергии: электрическая от э.д.с. источника  $\rightarrow$  магнитная (по закону полного тока)  $\rightarrow$  электрическая вихревого тока (по закону электромагнитной индукции)  $\rightarrow$  тепловая (по закону Джоуля–Ленца) [1 – 6].

В садке выделяется индуцированная мощность, кВт/см<sup>2</sup> [2, 3]:

$$P_{инд} = 2 \cdot 10^{-6} H_e^2 m (f \mu_i \rho)^{0,5},$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от отношения диаметра  $d$  к глубине  $\Delta$  проникновения магнитного поля в садку. При увеличении  $d/\Delta$  от рекомендуемых 3,5 до 20  $m$  возрастает от 0,75 до 0,9 [2]. Легко видеть, что наибольшее влияние на величину  $P_{инд}$  оказывает индукция  $B_e$  (напряженность  $H_e$ ), а не частота  $f$ .

Горизонтальный же поток создается так же, но горизонтальным индуктором, витки которого охватывают горизонтальный сердечник изогнутого магнитопровода-корпуса. Индуктор сначала намагничивает магнитопровод до магнитной проницаемости  $\mu_i \geq 5 \dots 10$ , что усиливает поток за счет увеличения индукции  $B_{ег} \sim$  в 5 и более раз. Затем усиленный горизонтальный поток направляется к тиглю и нагревает шихту и расплав аналогично вертикальному потоку [1, 4 – 6]. При одинаковых параметрах индуктора индукция в ЭМ-печах больше, значит и нагрев садка эффективнее. Действующие значения других величин можно оценить по формулам:  $Q = I_v^2 R t$ ;  $I_v = U_v / R_{ш}$ ;  $U_v = 4,44 \Phi_{раб} f$ ;  $f = 4,44 B_e S f$ ;  $B_e = \mu_0 I_{инд} w / h_{инд}$ ;  $B_{ег} = \mu_i B_e$  [1 – 6].

Обе технологии обеспечивают следующие

достоинства индукционной плавки: 1) получение максимально возможных высоких температур во всем объеме шихты и расплава, а не в отдельных частях; 2) высокая производительность, достигаемая благодаря большой удельной мощности; 3) наименьший угар металла из-за его нагрева изнутри наружу, что особенно важно при плавке цветных металлов и сплавов с дорогими и редкими легирующими добавками; 4) получение более чистого сплава из-за малого числа источников загрязнения и окисления; 5) устойчивый режим работы и простое и широкое регулирование мощности и температуры; 6) малые габариты печи и связанная с этим облегченная возможность плавки в вакууме или в специальной газовой среде; 7) относительно легкие и гигиеничные условия труда; 8) возможность полного или частичного опорожнения тигля с последующей завалкой твердой шихты; 9) возможность быстрого перехода с выплавки сплава одной марки на другую; 10) возможность использования в шихте до 100 % низкосортных материалов (стружки, отходов, пивных банок); 11) малая масса футеровки по сравнению с массой расплава, что уменьшает аккумуляцию тепла в футеровке, снижает тепловую инерцию печи и создает удобство для ее периодической работы (с перерывами между плавками в литейном цехе); 12) возможность питания печи от промышленной электросети без дорогих преобразователей частоты, имеющих КПД менее 0,97 и потребляющих дополнительную электроэнергию для своей работы [1 – 6].

Однако они имеют и недостатки, в т.ч. общие.

1. Поскольку шлак не электропроводен, он нагревается только от расплава и является относительно холодным. Это затрудняет протекание реакций между металлом и шлаком и, следовательно, процессы рафинирования в печах и технологиях обоих видов [1 – 6].

2. Для повышения  $\cos \phi$  и полезного использования электроэнергии в ИП и ЭМ-печах необходимы устройства по компенсации реактивной мощности (обычно конденсаторные батареи). С понижением частоты  $f$  емкость, габариты и стоимость батареи возрастают. При частоте  $f = 50$  Гц стоимость батареи составляет наибольшую часть общей стоимости плавильной установки [2, 3].

3. Пониженная стойкость тонкой футеровки тигля ИП (по сравнению с дуговыми и топливными печами) при резких колебаниях температуры из-за небольшой тепловой ее инерции, воздействия вибрации индуктора и размывающего действия расплава черных сплавов при электродинамических явлениях в ИП [2, 3].

В ЭМ-печах футеровка тигля может быть выполнена толще, а вибрация и размывающее воздействие гораздо меньше.

4. В печах обоих видов применяют вертикальные I-образные магнитопроводы из электроизолированных пластин трансформаторной стали с коэффициентом заполнения  $\sim 0,9$ . Они расположены снаружи индуктора с определенным шагом и намагничиваются его полем рассеяния, индукция которого значительно меньше, чем рабочего поля в полости индуктора. В ИП длина одного пакета магнитопровода должна превышать высоту индуктора примерно на четыре толщины футеровки. Это приводит к значительной суммарной массе магнитопроводов: для печей малой вместимости она превышает массу расплава, а для печей средней и большой вместимости – несколько меньше массы расплава (например, для печи вместимостью 1,0 т эта масса составляет 0,6...0,7 т). Потери в магнитопроводах на перемагничивание и вихревые токи составляют 0,4–1,0 % активной мощности печи при внутренней индукции 0,6...1,0 Тл и величине удельных потерь на 1 м<sup>2</sup> боковой поверхности магнитопровода при естественном охлаждении на воздухе менее 750 Вт/м<sup>2</sup> и температуре нагрева до 75 °С [2, 3].

Для ЭМ-печей масса магнитопровода, видимо, будет больше, но и эффект от его применения значительнее, т.к. его сердечник находится в рабочей полости индуктора и намагничивается более сильным рабочим потоком, увеличивая значение рабочей индукции  $B_{\text{ср}} \sim$  в 5 и более раз.

Поток рассеяния в печах обоих видов локализируют также электропроводными экранами из алюминия, меди, немагнитной стали и т.п.

#### Недостатки, связанные с особенностями электромагнитного потока.

5. Однофазный индуктор ИП высотой  $h$ , близкой к диаметру  $D_{\text{инд}}$ , создает общий вертикальный магнитный поток  $\Phi$ , который разделяется на две равные части: рабочий  $\Phi_{\text{раб}}$ , действующий в рабочей полости индуктора, и рассеяния  $\Phi_{\text{рас}}$ , находящийся вне этой полости (см. рис. 1) [1 – 3]. Последний не участвует в нагреве шихты и расплава, но

нагревает окружающие индуктор вертикальные магнитопроводы и другие электропроводные элементы печи. Величина его индукции распределена неравномерно в непосредственной близости у наружной поверхности индуктора, а именно: у торцов она значительно больше, чем с боков. По мере удаления от индуктора величина индукции снижается, причем в аксиальном направлении менее заметно, чем в радиальном (см. рис. 1).

Очень важно, что и значительная часть рабочего потока  $\Phi_{\text{раб}}$  с наибольшим значением индукции не используется для полезного нагрева, т.к. проходит вдоль неэлектропроводных стенок тигля и изоляционного слоя между тиглем и индуктором, а не по садке. Все это уменьшает полезное использование общего потока, создаваемого индуктором (почти до  $\sim 19 \dots 30$  %), а коэффициент мощности  $\cos\phi$  до 0,03...0,10 и повышает расход энергии. Данный факт подтверждает известные соотношения между внутренними диаметрами индуктора  $D_{\text{инд}}$  и тигля  $D_{\text{т}}$  для печей типа ИСТ [2]:

$$D_{\text{т}} = D_{\text{инд}} - 2(t_1 + t_2),$$

где  $t_1$  – эмпирическая толщина (м) стенки тигля, равная  $(0,25 \dots 0,30)D_{\text{т}}$  для печей вместимостью  $M_{\text{т}} < 0,5$  т;  $(0,15 \dots 0,25)D_{\text{т}}$  – для  $M_{\text{т}}$  от 0,5 до 3 т;  $(0,10 \dots 0,15)D_{\text{т}}$  для  $M_{\text{т}} > 3$  т;  $t_2$  – эмпирическая толщина (м) изоляционного слоя из асбеста между тиглем и индуктором, равная: 0,005 м при  $M_{\text{т}} < 3$  т;  $(0,005 \dots 0,01$  м) при  $M_{\text{т}}$  от 3 до 15 т;  $(0,010 \dots 0,015$  м) при  $M_{\text{т}} > 15$  т.

Геометрические параметры индуктора ИП в плане приведены в табл. 1.

Расчеты с использованием этих практических данных для черных сплавов показывают следующее. Для печи с  $D_{\text{инд}} = 0,5$  м диаметр тигля  $D_{\text{т}} = 0,31$  м, круговая площадь индуктора  $S_{\text{инд}} = 0,19625$  м<sup>2</sup>, а кольцевая площадь, занятая стенками тигля и теплоизоляцией,  $S_{\text{ти}} = 0,076$  м<sup>2</sup>. Она составляет 38 % от площади индуктора  $S_{\text{инд}}$ , оставляя для полезной площади  $S_{\text{п}}$  шихты только 62 %. Для печи с  $D_{\text{инд}} = 1,0$  м диаметр тигля  $D_{\text{т}} = 0,653$  м, а для печи с  $D_{\text{инд}} = 1,5$  м диаметр тигля  $D_{\text{т}} = 1,0$  м. При этом толщина футеровки составляет соответственно 0,095; 0,17 и 0,185 м.

Поскольку с увеличением вместимости  $M_{\text{т}}$  возрастает давление садки на тигель, толщина его стенок также увеличивается вдвое для обеспечения достаточной прочности и

1. Геометрические параметры индуктора ИП в плане

Диаметр индуктора $D_{инд}, м$	Диаметр тигля $D_t, м$	Площадь индуктора $S_{инд}, м^2$	Кольцевая площадь $S_{ти}, м^2$	Полезная площадь $S_{п}, м^2$	Отношение $S_{ти}/S_{инд}$	Отношение $S_{п}/S_{инд}$
0,5	0,31	0,19625	0,076	0,1225	0,38	0,62
1,0	0,653	0,785	0,45	0,335	0,452	0,43
1,5	1,0	1,766	0,766	1,0	0,43	0,57

надежности тигля, особенно при его повороте для разлива расплава. Особо отметим, что при этом индуктор должен выдержать без заметной деформации воздействие на него суммарной массы тигля и садки. Увеличение толщины футеровки при одинаковой температуре расплава и теплопроводности футеровки уменьшает не только тепловые потери, но и, к сожалению, электрический КПД печи, т.к. повышается индуктивность и реактивная мощность индуктора из-за наличия зазора между садкой и индуктором [2, 3].

Таким образом, полезное использование магнитного потока повышается с увеличением диаметра индуктора и вместимости тигля и находится в пределах ~ 43...62 % для рабочего потока и ~ 21...31 % для общего потока. Однако при этом значительно (практически прямо пропорционально вместимости  $M_T$ ) возрастают мощность печи и расход электроэнергии [1 – 3].

Так, для печи ИЧТ-31 с диаметрами  $D_{инд} = 1,97 м$  и  $D_t = 1,61 м$  при толщине футеровки 0,18 м полная расчетная мощность печи равна 44 719 кВА, а реактивная мощность в зазоре между садкой и индуктором 37 703 кВАр. Это означает, что  $(37\ 703/44\ 719)100 = 84,3 \%$  электроэнергии расходуется впустую [2, 3]. В печи ИСТ-0,16 такие потери составляют 91,1 %, а в ИСТ-0,4 – 92,5 %.

Особо отметим, что в ЭМ-печах практически один и тот же усиленный рабочий магнитный поток с увеличенной индукцией  $B_{сг}$  проходит от одного полюса к другому через две перпендикулярные ему неэлектропроводные футерованные стенки тигля любой толщины и через электропроводные шихту или расплав, совершая полезный нагрев. И только малая часть его проходит мимо шихты по неэлектропроводным элементам футеровки [4 – 6].

Так, в ЭМО-печи рабочий поток проходит только по двум параллельным боковым стенкам прямоугольного футерованного тигля, в ЭМС-печи – только по одной стенке,

а в ЭМУ-печи – только по его дну (рис. 2). Поэтому полезное использование усиленного рабочего потока с увеличенной индукцией  $B_{сг}$  в ЭМ-печах значительно больше. При использовании электропроводного тигля в обоих видах печей поток нагревает весь тигель.

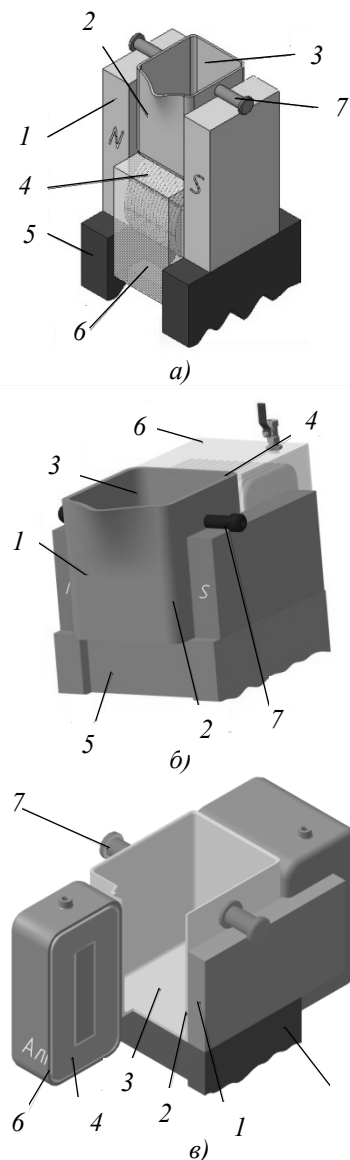


Рис. 2. Схемы электромагнитных печей [1, 4 – 6]:  
 а – ЭМУ; б – ЭМС; в) ЭМО; 1 – магнитопровод;  
 2 – тигель; 3 – ванна тигля; 4 – индуктор; 5 – основание;  
 6 – защитный герметичный кожух для хладагента;  
 7 – цапфы тигля

6. Вертикальный полный магнитный поток (поле) в ИП, создаваемый невысоким однофазным индуктором, без садки является очень неоднородным (см. рис. 1). Он имеет близкую к тороидальной форму и разное направление векторов индукции относительно центра индуктора, а также неравномерное распределение величины индукции в его рабочей полости: 1) по высоте – у торцов она почти в 2 раза меньше, чем в середине; 2) по сечению – у витков она заметно больше, чем в центре. Это приводит к значительным разнонаправленным градиентам индукции в воздухе [1 – 3].

При наличии садки высотой  $h_c$  в виде расплава с плотностью  $\gamma$  и удельным электросопротивлением  $\rho$  ток в витках индуктора и создаваемое им поле направлены противоположно индуцированному ими в расплаве току и полю. Это обуславливает наличие значительных разнонаправленных градиентов индукции и электромагнитных, и механических сил  $F$  отталкивания в расплаве и его интенсивное движение (двухконтурную циркуляцию) и перемешивание в разных направлениях с возможным выбросом его из тигля (рис. 3) [1 – 3]. Перемешивание расплава изучено недостаточно [3].

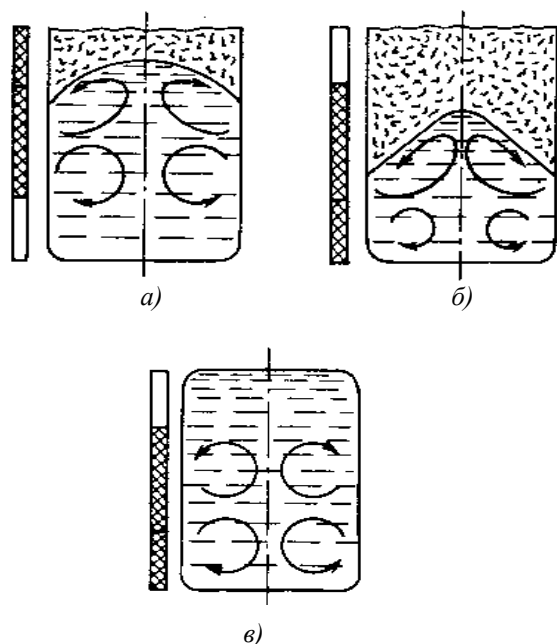


Рис. 3. Схемы циркуляции расплава при переключении трех секций индуктора печи ИАТ-10/2,5И1:

*a, б* – максимальная интенсивность при плавке мелкой шихты; *в* – минимальная интенсивность при выдержке расплава (заштрихованы включенные секции) [3]

В середине ЭК силовое воздействие направлено внутрь, а на ее краях появляется и аксиальная составляющая. Силы  $F$  оказывают давление  $p$  на боковую цилиндрическую поверхность садки (расплава), зависящее от индуцированной мощности  $P_{\text{инд}}$ , МПа [2, 3]:

$$P = 31,6 P_{\text{инд}} 10^{-5} / \pi d_c h_c (\rho f)^{0,5}.$$

Оно действует преимущественно в радиальном направлении и выталкивает расплав вверх в средней части тигля. По бокам расплав вновь стекает вниз. Под действием радиальных сил на поверхности расплава с плотностью  $\gamma$  образуется мениск высотой  $H_m = p/\gamma$  (см. рис. 3). Он увеличивается до тех пор, пока значение металлостатического давления  $\gamma H_m$  не сравняется с электродинамическим  $p$ .

Высота мениска  $H_m$  повышается с уменьшением частоты поля и увеличением давления  $p$ , мощности печи  $P$  и удельной мощности  $P_{\text{уд}}$ , передаваемой в садку, и может быть определена и по другим формулам [2, 5]:

$H_m = k P_{\text{уд}} / f^{0,5}$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности;

$H_m = 7050 P / (d_c h_c \gamma (\rho f)^{0,5})$ , размеры в дюймах.

Высота  $H_m$  увеличивает высоту тигля. Обычно  $H_m$  составляет до 15 % высоты  $h_c$  [2].

Давление может быть увеличено до такой степени, что расплав перейдет во взвешенное состояние [2, 3]. Поэтому максимальное значение индукции и электрической мощности ограничивается интенсивностью движения расплава для предупреждения выброса его из тигля.

Перемешивание является причиной недостаточного срока службы тигля из-за повышенного износа стенок, особенно у его дна (в виде «слоновьей ноги») при плавке тяжелых высокотемпературных сплавов, нарушения сплошности шлакового покрова, увеличения угара металла и замешивания в расплав продуктов износа, воздуха и шлака. Это увеличивает дефектность и брак отливок по включениям. Однако перемешивание ускоряет нагрев расплава, облегчает протекание реакций между металлом и шлаком и способствует получению однородного сплава и равномерного химического состава расплава [2 – 6]. Для уменьшения количества включений в отливках приходится применять дополнительные меры (отстаивание расплава

в печи, фильтрация и т.д.). Это особенно актуально для легких сплавов, где разность плотностей расплава и включений невелика и затрудняет их всплывание [2, 3].

Интенсивность (индекс) перемешивания расплава с площадью  $S_c$  можно оценить по следующим формулам [2, 3]:

$\Pi = (0,04...0,06)P_{уд}$ , %, где низкая интенсивность перемешивания соответствует 1...5 %, средняя – 5...10 %, высокая  $\geq 10$  % ;

$SI = (6000(Pd/\gamma\rho f)^{0,5})/S_c$ , где размеры в дюймах. Индекс  $SI = 80...120$  означает перемешивание от сильного до очень сильного; 55...80 – сильное перемешивание; 40...55 – среднее; 20...40 – слабое; 0...20 – очень слабое. Для чугуна рекомендуется  $SI = 40...55$ , для алюминия 55...80.

Интенсивность снижают увеличением высоты тигля над индуктором, выполнением индуктора из электрических секций и отключением верхней после расплавления сплава (см. рис. 3), увеличением частоты тока питания и др. [2, 3].

Повышение частоты  $f$  позволяет не только уменьшить интенсивность, но и увеличить скорость плавки и подводимую удельную мощность. Однако это удорожает электрооборудование из-за наличия электронного преобразователя частоты с КПД менее 0,97 и системой его охлаждения кондиционной водой и снижает КПД при выдержке и перегреве расплава [2, 3].

Поэтому при  $f = 50$  Гц удельная мощность плавки чугуна не превышает 400 кВт/т из-за значительного увеличения газометаллических выбросов, а при 1000 Гц может достигать 1000 кВт/т, обеспечивая скорость нагрева до 50 °С/мин [2, 3]. Так, длительность плавки закладки чугуна в печи с  $M_T = 10$  т ( $f = 60$  Гц) составляет около 120 мин, а при 275 Гц – только 26 мин (или в 4 раза быстрее) [3]. Кроме того, при  $f = 50$  Гц верхний уровень индуктора располагают ниже уровня садки на 20...30 % его высоты. При этом во избежание перегрева части тигля над садкой располагают «холостую» (бестоковую) водоохлаждаемую катушку (или кольцо). Если же она является рабочей частью индуктора, то с помощью отпайки отключается после расплавления шихты для уменьшения циркуляции. Однако уменьшение высоты индуктора всегда снижает КПД [2, 3]. Поэтому интенсивное перемешивание скорее недостаток, чем

преимущество индукторных печей промышленной частоты.

При высокой степени перемешивания жидкого чугуна ( $\Pi \geq 10$  %) количество неметаллических включений в нем увеличивается, а при слабом перемешивании ( $\Pi = 1...5$  %) уменьшается. Очевидно, при интенсивном перемешивании неметаллические включения не успевают всплывать в шлак и увлекаются вглубь металла. Кроме того, при интенсивном перемешивании все время обновляется слой металла, соприкасающийся с атмосферой, и происходит повышенный угар компонентов чугуна. В печах промышленной частоты науглероживание следует производить при средней степени перемешивания [1].

Интенсивность движения расплава в ИП промышленной частоты влияет и на газосодержание расплава. С одной стороны, происходит насыщение водородом, кислородом и азотом воздуха, с другой – дегазация за счет образования пузырьков СО и диффузии в них указанных газов [1]. Поэтому газосодержание чугуна в индукторной печи такое же или немного меньше газосодержания ваграночного чугуна, когда капли расплава интенсивно взаимодействуют возле фурменного пояса с потоками воздуха, создаваемыми вентилятором. Так, содержание кислорода в металле (после определенной его выдержки) при температуре 1400 °С составляет 0,006 %, с повышением температуры до 1450 °С содержание кислорода уменьшается до 0,0025 %. Наоборот, содержание азота может значительно увеличиться (от 0,007 до 0,10 %) с возрастанием температуры металла. Содержание водорода увеличивается с 0,0055 % при 1460 °С до 0,008 % при 1520 °С. С увеличением углеродного эквивалента содержание азота и кислорода в чугуне, выплавленном в индукторной печи, снижается.

ЭМ-печи создают практически плоскопараллельное поле с малыми градиентами, направленными от середины межполюсного расстояния к полюсам. Поэтому интенсивность перемешивания и связанные с ним вредные последствия должны быть меньше и, следовательно, мощность  $P_{уд}$  может быть выше 400 кВт/т [4 – 6].

**Недостатки, связанные с особенностями конструкции индуктора**

7. Высота индуктора ИП составляет  $h_{инд} = (0,7...1,3)h_c$  – высоты садки [2]. Для

печей повышенной частоты высота  $h_{\text{инд}}$  принимается большей, чем  $h_c$ , а для промышленной частоты – меньше, чем  $h_c$  (в т.ч. из-за повышенной высоты  $H_m$  мениска). Высота  $h_{\text{инд}}$  практически всегда меньше высоты тигля  $h_T$ . С уменьшением  $h_{\text{инд}}$  заметно снижается электрический КПД печи, т.к. он тем больше, чем выше ЭК при равных диаметрах  $D_{\text{ЭК}}$  [1 – 3]. При высоте индуктора  $h_{\text{инд}} = h_T/2$  получают наихудшие экономические показатели [3]. Увеличение же  $h_{\text{инд}}$  (без изменения диаметра  $D_{\text{ЭК}}$ ) затрудняет изготовление и ремонт узкого и глубокого тигля и загрузку шихты. Поэтому высота  $h_{\text{инд}}$  мало отличается от диаметра  $D_{\text{инд}}$ :  $h_{\text{инд}} = (0,8 \dots 1,1) D_{\text{инд}}$  [2].

Диаметр однослойного индуктора больше диаметра тигля ИП, т.к. витки индуктора охватывают тигель, но расположены максимально близко к нему, потому что являются опорой для крепления тигля, особенно при его поворотах. Это увеличивает его индуктивность и стоимость, т.к. они выполнены полыми из дорогой толстостенной медной трубки, поверх которой вручную нанесена электроизоляция [2, 3]. Эти индукторы чаще выполняют однофазными.

В ЭМ-печах витки одно-, двух- или трехслойного индуктора не охватывают тигель и поэтому внутренние размеры индуктора меньше размеров тигля, что уменьшает его индуктивность и стоимость (при одинаковом числе витков). Индукторы этих печей могут быть одно- и трехфазными [4 – 6].

8. При своей работе любой индуктор, имеющий длину медного трубчатого или сплошного проводника  $L_{\text{пр}}$  сечением  $S_{\text{пр}}$  с удельным электросопротивлением  $\rho_{\text{пр}}$ , может характеризоваться электросопротивлениями активным  $R = \rho_{\text{пр}} L_{\text{пр}} / S_{\text{пр}}$ , полным  $z = U_{\text{ЭК}} / I_{\text{ЭК}}$ , индуктивным  $X_L = \sqrt{z^2 - R^2}$  и индуктивностью  $L_{\text{инд}} = X_L / 2\pi f$ . Из-за малости  $R$  обычно принимают  $z \approx X_L \approx U_{\text{ЭК}} / I_{\text{ЭК}}$ .

При помещении в полость индуктора ферромагнитного заполнения (садки или магнитопровода), имеющего магнитную проницаемость  $\mu_i$ , его индуктивность увеличивается. Ее можно приближенно оценить по формуле  $L_{\text{инд}} = \mu_0 \mu_i w^2 S_{\text{инд}} / h_{\text{инд}}$  [9].

Она показывает, что индуктивность индуктора с ферромагнитной садкой больше в  $\mu_i$  раз, чем с неферромагнитной. Индуктивность индуктора возрастает с увеличением площади  $S_{\text{инд}}$  и весьма

значительно (в квадрате) числа ее витков  $w$ , но уменьшается с увеличением высоты  $h_{\text{инд}}$ . Поэтому для снижения потребляемой электрической мощности индуктора целесообразно уменьшение его индуктивности путем оптимизации значений  $w$ ,  $S_{\text{инд}}$ ,  $h_{\text{инд}}$ .

Отметим, что при равных геометрических параметрах индуктора его индуктивность без садки или с неферромагнитной садкой в ЭМ-печи больше, чем в ИП. В случае же ферромагнитной садки индуктивность ЭМ-печи уменьшается за счет замещения ферромагнетиком воздушного зазора между ее полюсами и увеличения магнитной проводимости. Индуктивность же ИП увеличивается. Можно предположить, что ферромагнитную садку эффективнее нагревать в ЭМ-печах.

Приравнивая значения  $L_{\text{инд}}$ , полученных по этим формулам, можно оценить величину  $\mu_i = X_L h_{\text{инд}} / 2\pi f \mu_0 w^2 S_{\text{инд}}$ , не проводя специальных измерений, т.к. все величины в этой формуле (кроме  $X_L$ ) известны до включения печи, а  $X_L$  становится известной после включения (по показаниям щитовых приборов).

9. Индуктивность  $L_{\text{инд}}$  и полное электросопротивление  $z$  индуктора любой индукционной печи изменяются во время плавки (из-за изменения магнитного и агрегатного состояния садки и увеличения ее электросопротивления), при переходе на шихту других размеров или с немагнитной на магнитную, по мере износа тигля. Это отражается на расходе электроэнергии и КПД. Так, для ИП он составляет 55...65 %. Для ЭМ-печи данные пока не выявлены. Для интенсификации работы ИП применяют отпайки от витков индуктора, позволяющие регулировать число его витков при работе печи. Это позволяет снизить удельный расход электроэнергии на 10...15 %, а отключением «холостой» катушки высоту мениска. Подключением «холостой» катушки можно устранить еще и образование «мостов» из шихты [2, 3].

В ЭМ-печи, несмотря на отсутствие «холостой» катушки, также возможно регулирование числа витков. Однако целесообразность и эффективность этого пока не вполне ясны.

10. Из формулы активной мощности  $P = I^2 R$  видно, что для снижения ее потерь надо уменьшить величину активного сопротивления  $R$  индуктора. Это достигается

увеличением площади поперечного сечения  $S_{\text{пр}}$  проводника витка, но до некоторых пределов, зависящих от вида материала проводника и частоты  $f$  и определяемых скин-эффектом, т.е. толщиной  $\Delta$  поверхностного скин-слоя проводника, по которому в основном течет ток. Так, для меди при частоте  $f = 50$  Гц  $\Delta = 9,34$  мм; при 60 Гц – 8,53 мм; при 10 кГц – 0,66 мм [2, 3]. Следовательно, для эффективного использования сечения проводника его диаметр или толщина не должны существенно превышать эти величины. Кроме того, для создания необходимой индукции в рабочей полости ЭК величину тока  $I_{\text{инд}}$  в ее витках выбирают из условия обеспечения плотности тока менее  $20$  А/мм<sup>2</sup> [2, 3]. Однако с увеличением тока и его плотности повышается нагрев индуктора за счет тепла  $Q = I^2 R t$  в течение времени  $t$ , которое надо отводить от индуктора, охлаждая его.

В ИП эти задачи решают изготовлением проводника из специальной медной трубки с указанной толщиной стенки, обращенной к тиглю. При этом через полость трубки пропускают под давлением до  $0,2 \dots 0,7$  МПа со скоростью  $1,0 \dots 1,5$  м/с охлаждающую кондиционную воду (дистиллированную или с содержанием механических примесей до  $80$  г/м<sup>3</sup>, определенной жесткостью до  $7$  г-экв/м<sup>3</sup>, температурой  $\leq 35 \dots 40$  °С и водородным показателем рН = 7) [1 – 3]. Скорость менее  $0,5$  м/с не обеспечивает турбулентность потока воды, снижающую образование накипи, а более  $1,5$  м/с существенно увеличивает давление. Средняя температура нагрева индуктора и выходящей охлаждающей воды желательна  $\leq 40 \dots 50$  °С для уменьшения образования накипи [2, 3], что предполагает большой расход водопроводной воды или значительные затраты энергии на принудительное охлаждение оборотной воды. Эта температура  $T$  должна превышать окружающую во избежание конденсации на индукторе влаги из воздуха и возможного пробоя изоляции.

С увеличением размеров индуктора возрастает суммарная длина трубчатых витков, гидравлическое сопротивление протеканию воды в трубке и давление, ухудшается охлаждение индуктора. Поэтому индуктор разделяют на  $n$  групп с отдельным подводом и отводом воды (без разрыва электрической цепи), подключаемых параллельно к источнику водоснабжения.

Такое группирование индуктора снижает скорость воды в  $n$  раз [2].

В ЭМ-печах помимо такого технического решения возможно изготовление витков индуктора из гибких изолированных проводников (проводов, кабелей и т.п.) с размещением их в герметичном неэлектропроводном кожухе. Их охлаждение осуществляется с наружной поверхности проточной водопроводной или технической водой или другим хладагентом, циркулирующими между витками. При этом температура воды может достигать  $99$  °С. Попутно охлаждается и существенная часть магнитопровода. Это упрощает и удешевляет изготовление индуктора и водоподготовку, снижает давление и расход воды (хладагента). По эффективности опробованные способы охлаждения индуктора составляют следующий ряд: проточной водопроводной водой  $\rightarrow$  трансформаторным маслом  $\rightarrow$  сжатым воздухом  $\rightarrow$  вентилятором [1].

11. Реально уменьшить величину  $R$  можно, лишь выполняя индуктор из нескольких  $n$  параллельных проводников. Если параллельные проводники изолировать один от другого и соответствующим образом транспонировать, то можно получить для них одинаковую самоиндукцию, сопротивление, а также расположение их по отношению к садке. В этом случае сопротивление  $R$ , а следовательно, и потери  $P$  в индукторе уменьшатся в  $1/n^{0,5}$  раз. Это приводит к увеличению электрического КПД печи  $\eta_{\text{э}}$  [2, 3].

При выполнении индуктора из  $n$  параллельных проводников повышенное значение электрического КПД печи  $\eta_{\text{эп}}$  равно

$$\eta_{\text{эп}} = n^{0,5} \eta_{\text{э}} / (1 + \eta_{\text{э}}(n^{0,5} - 1)).$$

Значения электрического КПД  $\eta_{\text{эп}}$  индукторной печи в зависимости от количества  $n$  параллельных проводников в индукторе приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что при реальном КПД печи  $\eta_{\text{э}} = 0,5$  увеличение числа  $n$  проводников с 1 до 4 повышает  $\eta_{\text{эп}}$  в 1,3 раза, а до 9 – в 1,5 раза и т.д.

Однако выполнение индуктора ИП из параллельных трубчатых проводников пока практически решить не удалось вследствие конструктивной сложности [2], связанной с необходимостью расположения трубчатых витков более чем в один ряд, и подачи в них охлаждающей воды.



2. Значения  $\eta_{\text{п}}$  в зависимости от  $n$  ЭК

Число проводников $n$			
1	4	9	16
0,5	0,67	0,75	0,80
0,6	0,75	0,82	0,86
0,7	0,82	0,87	0,90
0,8	0,89	0,92	0,94
0,9	0,95	0,96	0,97

В ЭМ-печах вполне возможно такое изготовление электроизолированных витков в виде гибкого жгута медных проволок, охлаждаемых снаружи обычной проточной водопроводной водой, циркулирующей между витками.

12. В малых индукторах ИП предусматривают между витками воздушный электроизоляционный зазор 10...20 мм, а в больших индукторах обычно наносят вручную в литейном цехе поверх трубки электроизоляционный слой толщиной  $\geq 1,5$  мм для предупреждения межвиткового замыкания и уменьшения зазора. Наиболее современными и совершенными являются монолитные покрытия с повышенными стойкостью к износу и эластичностью, позволяющей выдерживать циклические тепловые деформации индуктора [3]. Обычно напряжение на 1,0 мм изоляционного зазора между витками составляет 10...40 В и не должно превышать 200 В [2].

Индуктор ЭМ-печи, изготовленный из гибких изолированных проводников, не нуждается в большом зазоре между витками или ручном нанесении изоляции, т.к. она уже имеется на проводах и кабелях. Это упрощает и удешевляет изготовление индуктора.

13. Индуктор ИП скрепляют с жестким каркасом печи с помощью неэлектропроводных стоек двумя способами: 1) каждый виток латунными шпильками или уголками к стойке, обеспечивая зазор 10...20 мм (в малых индукторах); 2) изолированные витки индуктора сжимаются между плитами или водоохлаждаемыми кольцами с помощью регулируемых стоек (в больших индукторах).

Особо отметим, что с повышением частоты и удельной мощности увеличиваются электродинамические силы, вызывающие колебания витков трубчатого медного индуктора и пластин магнитопровода. Они пульсируют с удвоенной частотой по сравнению с частотой тока, что вызывает вибрации индуктора, вертикальных

магнитопроводов и корпуса печи и повышенный шум.

Для уменьшения шума в среднечастотной печи в фирме АВВ очень сильно сжимают индуктор и запрессовывают пакет магнитопровода в специальный алюминиевый жесткий профиль (каркас). Он прижимается к индуктору только в верхней и нижней ее части с образованием мощной и жесткой конструкции. Кроме того, верхняя платформа печи отделена от ее корпуса демпфирующими элементами, а крышка печи с вытяжным зонтом выполнены звукоизолированными. Однако это приводит к нагреву алюминиевого каркаса [3].

В ЭМ-печах индуктор из гибкого одно- или многожильного кабеля, окруженный жидким хладагентом, не издает шума. Поэтому их шумовыделения могут быть меньше.

Решения вопросов по п.п. 7, 10, 11 увеличивают в ИП поперечные размеры трубки, сложность конструкции и трудоемкость изготовления индуктора и его эксплуатации.

14. Из-за необходимости близкого расположения тигля к охватывающим его виткам индуктора снижается надежность ИП и повышаются расходы на предупреждение вытекания расплава на индуктор (при образовании щелей в тигле) [2, 3].

В ЭМ-печах надежность заметно выше, т.к. витки индуктора не охватывают тигель, а находятся сбоку от него (ЭМО- или ЭМС-печи) или под его дном (ЭМУ-печь), отделены от него огнеупорной стенкой кожуха и слоем хладагента (см. рис. 2) [4 – 6].

Исследования плавки при 50 Гц, 220 и 380 В в экспериментальных ЭМ-печах невысокого качества с разными рабочими объемами (5...50 дм<sup>3</sup>), магнитопроводами, индукторами из электроизолированных шинки, гибких кабелей и проводов показали возможность расплавления свинца и силумина (со средней скоростью до 15...17 °С/мин) и латуни и меди (до 20...25 °С/мин). Это заметно больше, чем в индукторных печах ИАТ-0,4/0,18 и ИЛТ-1,0/0,4. Зависимости температур  $T$  тигля, слитка, кожуха, индуктора (ЭК) и масла от времени  $t$  при нагреве в печи ЭМУ-5,7-60М слитка латуни ЛЦ40С с использованием металлического тигля-нагревателя и охлаждением индуктора трансформаторным маслом приведены на рис. 4.

Сравнительный анализ двух видов технологии индукционной плавки и печей

показывает возможность уменьшения недостатков п.п. 5 – 7, 10 – 14 индукторных печей путем использования вместо них ЭМ-печей (где это наиболее целесообразно), в т.ч. для подогрева шихты, плавки, выдержки и доводки расплава, доставки съемного тигля к месту заливки. Это подтверждают и положительные результаты экспериментов, которые позволяют рекомендовать продолжение исследований наукоемкой технологии индукционной плавки в электромагнитных тигельных печах с горизонтальным магнитным потоком частотой  $f \geq 50$  Гц (как перспективной и инновационной) для вполне возможного улучшения параметров и расширения сферы применения.

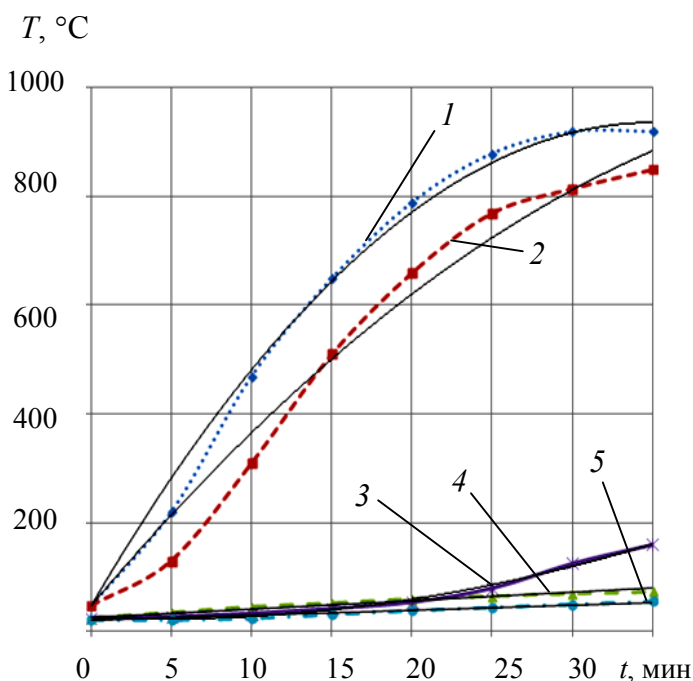


Рис. 4. Зависимости температур  $T$  тигля нагревателя (1), слитка (2), кожуха (3), ЭК (4) и масла (5) от времени  $t$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левшин Г.Е., Кульдяйкин Д.С., Левагин А.В. Развитие индукционной тигельной плавки в печах промышленной частоты // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 33–37.
2. Электрические печи для выплавки черных и цветных сплавов /Л.М. Романов, А.Н. Болдин, А.Н. Граблев, Д.П. Михайлов. М.: МГИУ, 2007. 104 с.

3. Современные плавильные агрегаты. М.: ИТЦМ Металлург, 2014. 370 с.

4. Пат. 2539490 РФ, МПК F27B14/06. Электромагнитная индукционная тигельная плавильная печь с U-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком / Левшин Г.Е., Попов Н.А. Патентообладатель АлтГТУ. 2013111013/02; заявл. 12.03.2013; опубл. 20.01.2015.

5. Пат. 2536311 РФ, МПК F27B14/06. Электромагнитная тигельная плавильная печь с C-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком / Левшин Г.Е., Сергеев С.Ю. Патентообладатель АлтГТУ. 2013111013/02; заявл. 12.03.2013; опубл. 20.12.2014.

6. Пат. 2536311 РФ, МПК F27B14/06. Электромагнитная тигельная плавильная печь с горизонтальным магнитопроводом и магнитным потоком / Левшин Г.Е., Сергеев С.Ю. Патентообладатель АлтГТУ. 2013111013/02; заявл. 12.03.2013; опубл. 20.12.2014.

## REFERENCES

1. Levshin, G.E., Kuldyaikin, D.S., Levagin, A.V., Development of induction crucible fusion in furnaces of industrial frequency // *Urgent Problems in Mechanical Engineering*. 2014. No 1. pp. 33–37.
2. *Electric Furnaces for Ferrous and Non-ferrous Alloy Smelting* / L.M. Romanov, A.N. Boldin, A.N. Grablev, D.P. Mikhailov. M.: MSIU, 2007. pp. 104.
3. *Modern Melting Facilities*. M.: ITNM Metallurgist, 2014. pp. 370.
4. Pat. 2539490 RF, IPC F27B14/06. Electromagnetic induction crucible smelting furnace with U-type magnetic conductor and horizontal magnetic stream / Levshin G.E., Popov N.A. Patent Holder AltSTU. 2013111013/02; declared 12.03.2013; published 20.01.2015.
5. Pat. 2536311 RF, IPC F27B14/06. Electromagnetic crucible smelting furnace with C-type magnetic conductor and horizontal magnetic stream / Levshin G.E., Sergeyev S.Yu. Patent Holder AltSTU. 2013111013/02; declared 12.03.2013; published 20.12.2014.
6. Pat. № 2536311 RF, IPC F27B14/06. Electromagnetic crucible smelting furnace with horizontal magnetic conductor and magnetic stream / Levshin G.E., Sergeyev S.Yu. Patent Holder AltSTU. 2013111013/02; declared 12.03.2013; published 20.12.2014.

Рецензент д.т.н. С.В. Давыдов