

УДК 621.365.5:669.187.2

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ИНДУКТОРНЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

*Левшин Г.Е., д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий
и оборудования (levshing@mail.ru)*

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
(656038, Россия, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 46)

Аннотация. Приведен анализ основных недостатков современных индукционных индукторных тигельных печей, обусловленных повышенной толщиной стенок футерованного тигля, наличием охлаждаемого изнутри кондиционной водой трубчатого медного однослойного индуктора и отсутствием или присутствием размещенных вокруг него стержневых вертикальных I-образных наборных магнитопроводов, образующих дискретный ферромагнитный экран. Первый недостаток заключается в том, что значительная часть рабочего электромагнитного потока $\Phi_{\text{раб}}$ не используется для полезного нагрева, так как проходит вдоль неэлектропроводной футеровки тигля, а не по садке. Эффективно используется только 38,5 – 57,0 % потока $\Phi_{\text{раб}}$. Второй недостаток обуславливает повышенную стоимость и трудоемкость изготовления витков индуктора из специальной медной трубки, которые вибрируют с удвоенной частотой. При этом создается шум и ослабляется конструкция печи. Такие индукторы характеризуются пониженным электрическим КПД и повышенной стоимостью подготовки и охлаждения кондиционной воды в системах, занимающих площадь, в несколько раз превышающую площадь собственно печи. Третий недостаток приводит к тому, что значительная часть электромагнитного потока $\Phi_{\text{рас}}$ рассеяния не участвует в нагреве шихты и расплава, но нагревает электропроводные элементы печи, в том числе окружающие индуктор магнитопроводы. Нерациональное использование общего потока Φ , создаваемого индуктором, снижает его эффективность почти до 19 – 30 %, а коэффициент мощности $\cos\phi$ до 0,03 – 0,10 и повышает расход энергии. Для уменьшения или устранения недостатков предложены и обоснованы три пути совершенствования этих печей: уменьшение толщины стенки тигля с одновременным его упрочнением путем установки цилиндрической обечайки между тиглем и индуктором, окружение индуктора кольцевым магнитопроводом и применение одно- или многопроволочного индуктора вместо трубчатого. Сочетанием цилиндрической обечайки, кольцевого магнитопровода, а также верхней и нижней плит каркаса печи может быть образована кольцевая замкнутая полость для размещения проволочного индуктора и циркулирующего хладагента, охлаждающего индуктор и магнитопровод. В результате исследования предложена, обоснована и запатентована разработанная в АлтГТУ новая конструкция индукционной индукторной тигельной печи с проволочным индуктором и кольцевым наборным магнитопроводом. На основе экспериментального определения эффективности предложенных конструктивных элементов сделан вывод о перспективности дальнейших исследований.

Ключевые слова: индукционные индукторные тигельные печи, цилиндрическая обечайка, проволочный индуктор, кольцевой наборный магнитопровод, охлаждение индуктора и магнитопровода.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-97-102

ВВЕДЕНИЕ

Со времени своего появления индукционные тигельные печи (ИТП) постоянно совершенствовались для удовлетворения все возрастающих требований [1 – 15]. В 2013 г. предложены электромагнитные ИТП с изогнутым магнитопроводом, создающие горизонтальный электромагнитный поток (ЭМП), электрическая катушка которых охлаждается снаружи проточной водой [16]. Однако еще не использованы все возможности улучшения характеристик традиционных индукторных ИТП, создающих вертикальный ЭМП. Поэтому в настоящей работе обсуждаются возможные пути дальнейшего совершенствования этих печей.

Все современные индукторные ИТП имеют охлаждаемый изнутри водой однослойный трубчатый медный вертикальный индуктор высотой h и диаметром $D_{\text{инд}}$ с числом витков w . Он создает вертикальный электромагнитный поток Φ при появлении в его витках переменного электрического тока $I_{\text{и}}$, возбужденного

ЭДС $U_{\text{и}}$ источника электроэнергии частотой f . Поток Φ разделяется на две (практически равные) части: рабочий $\Phi_{\text{раб}}$, действующий в рабочей полости индуктора, и рассеяния $\Phi_{\text{рас}}$, находящийся вне этой полости и распространяющийся на расстояния более двух – трех его диаметров (рис. 1) [1 – 16]. Второй поток не участвует в нагреве шихты и расплава, но нагревает окружающие индуктор вертикальные магнитопроводы и другие электропроводные элементы печи. Величина его индукции распределена неравномерно у наружной поверхности индуктора, а по мере удаления от последнего индукция постепенно снижается (рис. 1). При удалении от индуктора печи ИЧТ-31/7,1 ($f = 50$ Гц) по радиусу примерно на 4,5 м и вверх на 2 м индукция составляет около 0,0039 Тл. Это значение превышает предельно допустимый уровень (ПДУ), составляющий 0,0001 и 0,0005 Тл при воздействии в течение 8 и 4 ч соответственно [16, 17]. С увеличением частоты поля вредное воздействие увеличивается, а ПДУ уменьшается [17].

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НЕДОСТАТКОВ

Рассмотрим основные недостатки современных индукционных индукторных тигельных печей, обусловленные повышенной толщиной стенок футерованного тигля, наличием охлаждаемого изнутри кондиционной водой трубчатого медного однослойного индуктора и отсутствием или присутствием размещенных вокруг него стержневых вертикальных I-образных наборных магнитопроводов, образующих дискретный ферромагнитный экран.

Путь 1. Очень важно, что значительная часть потока $\Phi_{\text{раб}}$ с наибольшим значением индукции не используется для полезного нагрева, так как проходит вдоль неэлектропроводных стенок футерованного тигля и изоляционного слоя между тиглем и индуктором, а не по садке. Все это уменьшает полезное использование общего потока, создаваемого индуктором, почти до 19 – 30 %, а коэффициент мощности $\cos\phi$ до 0,03 – 0,10 и повышает расход энергии. Покажем это, используя только известные соотношения между внутренними диаметрами индуктора $D_{\text{инд}}$ и тигля $D_{\text{т}}$, для печей типа ИСТ [3, 16].

Для печи с $D_{\text{инд}} = 0,50$ и $D_{\text{т}} = 0,31$ м круговая площадь индуктора $S_{\text{инд}} \approx 0,19625$ м², а кольцевая площадь, занятая стенками тигля и теплоизоляцией, $S_{\text{ти}} \approx 0,1208$ м², полезная площадь $S_{\text{п}} \approx 0,076$ м². Отношение $S_{\text{ти}}/S_{\text{инд}} \approx 0,615$ означает, что величина $S_{\text{ти}}$ составляет 61,5 % от площади индуктора $S_{\text{инд}}$, оставляя для полезной площади $S_{\text{п}}$ шихты только 38,5 %.

Для печи с параметром $D_{\text{инд}} = 1$ м диаметр $D_{\text{т}} = 0,653$ м; $S_{\text{инд}} \approx 0,785$ м²; $S_{\text{ти}} \approx 0,45$ м²; $S_{\text{п}} \approx 0,333$ м², имеем отношения $S_{\text{ти}}/S_{\text{инд}} \approx 0,57$ и $S_{\text{п}}/S_{\text{инд}} \approx 0,43$.

Для печи с параметром $D_{\text{инд}} = 1,5$ м диаметр $D_{\text{т}} = 1,0$ м; $S_{\text{инд}} \approx 1,766$ м²; $S_{\text{ти}} \approx 0,766$ м²; $S_{\text{п}} \approx 1,0$ м², имеем $S_{\text{ти}}/S_{\text{инд}} \approx 0,43$ и $S_{\text{п}}/S_{\text{инд}} \approx 0,57$.

Отметим, что при практически одинаковых температуре расплава и теплопроводности футеровки ее тол-

щина составляет соответственно 0,095, 0,170 и 0,185 м и увеличивается почти вдвое, в том числе для повышения прочности и надежности тигля.

Полезное использование потока $\Phi_{\text{раб}}$ находится в пределах 38,5 – 57,0 % и повышается с увеличением отношения $S_{\text{п}}/S_{\text{инд}}$, диаметра $D_{\text{инд}}$ и емкости $M_{\text{т}}$ тигля. Однако при этом значительно (практически прямо пропорционально величине $M_{\text{т}}$) возрастают мощность печи и расход электроэнергии [1 – 16], но уменьшается необходимость в использовании частоты более 50 Гц, которую уже обеспечивает энергосистема страны. Для дальнейшего повышения частоты необходимы дорогостоящие, шумные и водоохлаждаемые преобразователи. Самую высокую частоту используют при выплавке стали, имеющую наибольшую температуру плавления и перегрева. При этом частота уменьшается с увеличением параметра $M_{\text{т}}$. Так, в малых печах с емкостью тигля до 1,5 т применяют частоту 2400 – 1000 Гц, а при величине емкости тигля 2 – 3 т частота снижается до 500 Гц и т.д. [3].

Весьма важно, что от толщины стенок тигля зависит реактивная мощность $P_{\text{р.з}}$ в зазоре между садкой и индуктором. Полная расчетная мощность P печи ИСТ-31/7,1 при частоте 50 Гц, $D_{\text{инд}} = 1,97$ и $D_{\text{т}} = 1,61$ м, толщине футеровки 0,18 м при наличии садки составляет 45 267 кВА, активная мощность $P_{\text{а}} \approx 7020$ кВт, а реактивная мощность $P_{\text{р.з}} \approx 37\,703$ кВАр. Это означает, что $\frac{P_{\text{р.з}}}{P} = \left(\frac{37\,703}{45\,267}\right)100 \approx 83,3$ % электроэнергии может расходоваться впустую [3]. Для предупреждения этого устанавливают дорогостоящую батарею конденсаторов [1 – 16].

На основании изложенного можно сделать вывод о целесообразности максимально возможного уменьшения толщины футеровки тигля с одновременным увеличением его прочности и уменьшением тепло-

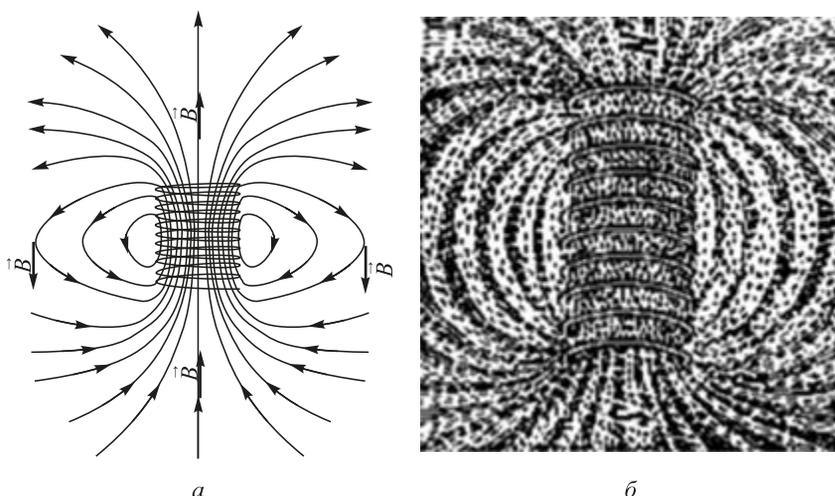


Рис. 1. Схема магнитного потока индукционной индукторной печи (а) и его «опилочная» модель (б) [16]

Fig. 1. Scheme of magnetic flow of induction furnace (a) and its “filed” model (b) [16]

проводности. Предлагается путь совершенствования печей, а именно: установка между индуктором и футеровкой цилиндрической прочной обечайки, снабженной углублениями для размещения материала, с теплопроводностью $0,06 - 0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, меньшей, чем у основной футеровки [18]. При этом индуктор освобождается от нагружения тиглем и расплавом и более надежно защищается от доступа расплава при прогорании тигля.

Путь 2. Путь 2 заключается в полезном использовании потока рассеяния $\Phi_{\text{рас}}$ для увеличения рабочего потока $\Phi_{\text{раб}}$. До настоящего времени в печах с малой (до $0,5 - 1,0 \text{ т}$ чугуна и стали) и средней ($0,5 - 3,0 \text{ т}$ чугуна и стали) емкостью этот поток совершенно не используется. В малых печах он практически даже не экранируется. В средних печах улавливается в существенной мере разрезными (составными) электропроводными неферромагнитными экранами (преимущественно из алюминиевых сплавов).

В печах емкостью более $2 - 3 \text{ т}$ индуктор окружают дискретным ферромагнитным экраном из $6 - 24$ стержневых вертикальных I -образных наборных магнитопроводов (рис. 2) [1 - 16], между которыми имеются воздушные зазоры. Именно поэтому такие экраны улавливают поток рассеяния только частично. Эти магнитопроводы укрепляют индуктор (особенно при наклоне печи для слива расплава), намагничиваются и могут усиливать поток $\Phi_{\text{раб}}$. Однако убедительных и достоверных сведений о степени увеличения индукции B_e в полости индуктора ИТП не обнаружено. Вместе с этим известно об увеличении индукции в $1,5 - 3,0$ раза в полости электрических катушек с одновременным уменьшением неоднородности ее распределения при окружении их снаружи сплошным магнитопроводом [19].

Поэтому целесообразно снабдить индукторы известных ИТП кольцевым магнитопроводом [18].

Следует отметить, что садка и магнитопроводы нагреваются Джоулевым теплом вихревых токов, появляющихся под действием индуктированной ЭДС E , величину которой можно определить по формуле [3]

$$E = 4,44\Phi f = 4,44B_e S_{\text{инд}} f.$$

Можно видеть, что увеличение индукции B_e и (или) площади $S_{\text{инд}}$ позволит повысить скорость нагрева садки и расширить область применения ИТП промышленной частоты. Индукцию в центре полости индуктора можно оценить по формуле [13]

$$B_e \approx \frac{\mu_0 I_n w}{h},$$

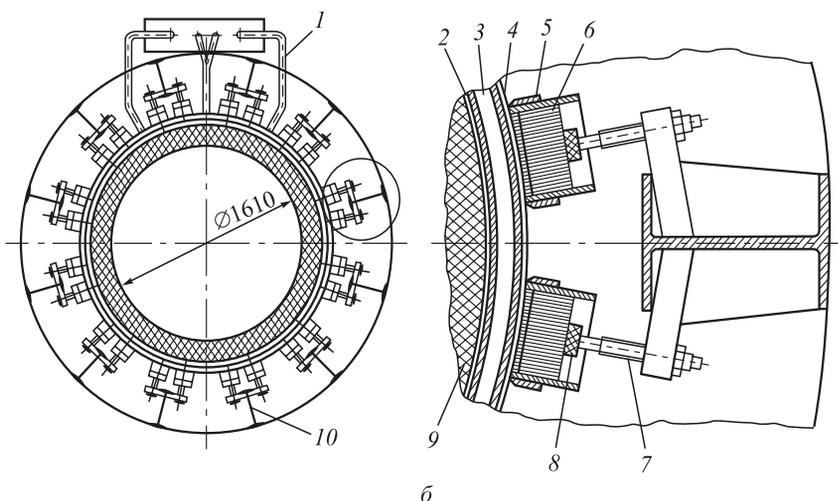
где μ_0 – магнитная постоянная.

Индукция в центре полости индуктора определяется конструкцией индуктора и величиной тока в его витках, который в крупных печах создается трансформатором. Так, при увеличении в печи ИЧТ-31 мощности трансформатора с 7100 до $12\,500 \text{ кВт}$ удельная мощность возрастает с 229 до 403 кВт/т , а производительность с $10,0$ до $13,9 \text{ т/ч}$ [3].

При повышении частоты следует учитывать значительное уменьшение глубины проникновения поля (тока) в садку. Так, при $f = 50 \text{ Гц}$ она составляет 80 мм для расплава стали и чугуна, а при 500 Гц – только $25,1 \text{ мм}$ [1, 3]. Это уменьшает интенсивность циркуляции расплава и позволяет увеличить удельную мощность до 1000 кВт/т с соответствующим повышением индукции и производительности без опасений газо-



а



б

Рис. 2. Печь (а) и схема размещения магнитопроводов (б):

1 – электровыводы; 2, 4 – асбест; 3 – трубка индуктора; 5, 8 – изоляторы; 6 – магнитопровод; 7 – прижимной винт; 9 – футеровка; 10 – опора [14]

Fig. 2. Furnace (a) and magnetic cores layout (b):

1 – electric leads; 2, 4 – asbestos; 3 – inductor tube; 5, 8 – insulators; 6 – magnetic core; 7 – clamping screw; 9 – lining; 10 – support [14]

металлических выбросов из тигля [5, 15]. Однако при такой удельной мощности в печах при частоте 50 Гц можно уменьшить эту интенсивность, например, снижением уровня индуктора относительно расплава, отключением верхней секции индуктора, применением кольцевого магнитопровода [1, 5, 6, 8, 15, 18]. При частоте более 50 Гц стали применять принудительное охлаждение магнитопроводов [5, 15].

Путь 3. Путь 3 связан с уменьшением недостатков, обусловленных конструкцией индуктора и охлаждением его витков.

Однослойный индуктор изготовлен из специальной медной трубки, на которую обычно вручную наносится электроизоляция, что увеличивает стоимость индуктора. Жесткие трубчатые витки индуктора вибрируют с удвоенной частотой и создают шум, что вредно влияет на всю конструкцию печи [1 – 16]. Кроме того, печи характеризуются пониженным электрическим КПД [1].

Для охлаждения полых трубчатых витков индуктора и катушек пользуются кондиционной водой: дистиллированной или с содержанием механических примесей до 80 г/м³, жесткостью до 7 г-экв/м³, температурой 35 – 40 °С, водородным показателем рН = 7. Вода подается в трубку с повышенной скоростью 1,0 – 1,5 м/с и давлением до 0,2 – 0,7 МПа, чтобы обеспечить температуру не выше 35 – 40 °С во избежание «отпотевания» наружной поверхности индуктора и электрического пробоя его изоляции. Для уменьшения давления индуктор нередко разделяют на секции, к каждой из которых подают и отводят воду по двум гибким шлангам или рукавам (рис. 2, а). Системы подготовки и охлаждения кондиционной воды занимают площадь, в несколько раз превышающую площадь собственно печи [1 – 16].

Электрический КПД $\eta_{эл}$ печи можно заметно повысить [1], если n параллельных изолированных проводников выполнить в витках индуктора транспонированными. Это позволяет получить для них одинаковую самоиндукцию, сопротивление, а также расположение их по отношению к садке. В этом случае сопротивление, а следовательно, и потери мощности в индукторе уменьшатся в $1/n^{0,5}$ раз. Это приводит к увеличению электрического КПД печи.

Так, при выполнении витков индуктора из n параллельных транспонированных проводников повышенное значение электрического КПД печи можно определить по следующей формуле:

$$\eta_{эл} = \frac{n^{0,5} \eta_3}{1 + \eta_3 (n^{0,5} - 1)}, \quad (1)$$

где η_3 – реальный КПД печи.

Как следует из формулы (1), при реальном КПД печи η_3 , равном 0,5, увеличение числа n проводников с 1 до 4 повышает величину $\eta_{эл}$ в 1,3 раза, а до 9 – в 1,5 раза и так далее.

Однако это не осуществлено из-за практической невозможности расположения транспонированных трубчатых проводников в витке более чем в один слой и подачи в них охлаждающей воды [1, 5].

ПРЕДЛОЖЕНИЕ

В 2016 г. предложено [20] создать кольцевую замкнутую полость для размещения проволочного индуктора и циркулирующего хладагента, охлаждающего индуктор и магнитопровод, сочетанием цилиндрической обечайки, кольцевого магнитопровода, верхней и нижней плит каркаса печи.

Для подтверждения намеченных путей совершенствования ИТП в АлтГТУ проведено экспериментальное исследование эффективности предложенных конструктивных элементов (проволочного индуктора и кольцевого магнитопровода) и на их основе разработана новая конструкция индукционной индукторной тигельной печи [20]. Так, внешнее охлаждение одно- и многопроволочного индуктора (с числом слоев до восьми) проверено опытами с положительным результатом при электрическом напряжении до 400 В и токе до 1000 А обдувом сжатым воздухом при плотности тока 3 – 5 А/мм² и холодной проточной водопроводной водой при плотности тока до 20 А/мм².

В наиболее полном исполнении печь содержит (рис. 3) соединенные вместе футерованный тигель 1, опирающийся на подину 2; цилиндрическую обечайку 3, охватывающую тигель 1; охлаждаемый индуктор 4 с токоподводами (не показаны), электроизолированные витки которого охватывают обечайку 3; наруж-

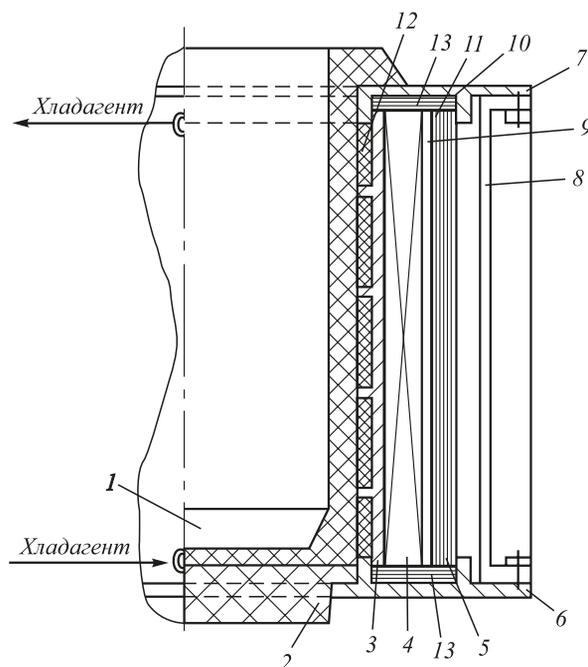


Рис. 3. Схема печи [20]

Fig. 3. Furnace scheme [20]

ный вертикальный цилиндрический наборный магнитопровод 5, охватывающий индуктор 4; нижнюю 6 и верхнюю 7 плиты с центральным отверстием для размещения подины 2 и «воротника» тигля, скрепленные стяжками 8 [20]. Магнитопроводом 5, плитами 6 и 7, обечайкой 3 образована замкнутая кольцевая полость 9 для размещения индуктора 4 и хладагента с возможностью его подвода и отвода. Для герметизации полости 9 предусмотрены эластичные уплотнения 10 по стыкам и слой 11 электроизоляционного материала на ее внутренней поверхности. Магнитопровод 5 может быть дополнен одним или двумя плоскими кольцевыми магнитопроводами 13, размещенными в кольцевой полости у его верхнего и (или) нижнего торцов.

Обечайкой 3 и кольцевым магнитопроводом 5, зажатые с помощью стяжек 8 между нижней 6 и верхней 7 плитами, образован каркас печи.

Материал обечайки 3 должен быть неферромагнитным и неэлектропроводным или иметь высокое электрическое сопротивление, чтобы не шунтировать магнитный поток и не сильно нагреваться вихревыми индукционными токами.

Витки индуктора 4 выполнены из медного одно- или многопроволочного гибкого изолированного (транспонированного) проводника и практически бесшумны, что предполагает их охлаждение жидким или газообразным хладагентом с внешней поверхности. Для исключения электрического пробоя изоляции при охлаждении дешевой технической (водопроводной) водой и повышения надежности электроснабжения используются проводники с двойной изоляцией, в том числе выпускаемые промышленностью. При этом первый слой выполнен из поливинилформалевого, эпоксидного или кремнийорганического лака (клея), а второй – из теплостойких и гибких резины или пластмасс.

Толщина стенки кольцевого наборного магнитопровода 5 становится меньше, чем толщина I-образных магнитопроводов (при прочих равных условиях). Магнитопровод 5 располагается по возможности ближе к индуктору 4 в зоне действия поля рассеяния с наибольшей индукцией.

Более подробно конструкция и работа печи рассмотрены в работе [20].

Выводы

Анализ выявленных недостатков известных индукторных ИТП и экспериментально подтвержденных преимуществ предложенной печи позволяет сделать вывод о перспективности ее применения и необходимости дальнейших исследований. Возможна модернизация существующих печей путем установки цилиндрической обечайки в совокупности с малотеплопроводным

материалом; кольцевых магнитопроводов в печах, не имеющих экранов или снабженных неферромагнитными алюминиевыми или дискретными ферромагнитными экранами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. – М.: Metallurgia, 1968. – 496 с.
2. Исследование и разработка индукционных плавильных печей. Сб. трудов / Под ред. А.А. Простякова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 105 с.
3. 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.
4. Piterek Robert. A career in the service of inductive melting // Casting Plant and Technology International. 2013. No. 3. P. 18 – 21.
5. Современные плавильные агрегаты. Сб. ИТЦМ "Металлург". – М.: Metallurg-консалтинг, 2014. – 370 с.
6. Vellen Tanja. The bright word of metals shines brighter than ever // Casting Plant and Technology International. 2015. No. 3. P. 46, 47.
7. Piterek Robert. Production flexibility combats declining batch sizes // Casting Plant and Technology International. 2015. No. 3. P. 40 – 44.
8. Site Inductotherm Europe Ltd [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inductotherm.co.uk>. (Дата обращения: 2.02.18 г.).
9. Site Ajax Tocco Magnethermic Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ajaxtocco.com>. (Дата обращения: 12.03.18 г.).
10. Site Otto Junker GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.otto-junker.com>. (Дата обращения: 12.03.18 г.).
11. Site Induction Technology Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.inductiontech.com/Index.html#top_of_page (Дата обращения: 12.05.18 г.).
12. Site ABP Induction Systems GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.abpinduction.com>. (Дата обращения: 12.05.18 г.).
13. Mehr Energieeffizienz für Aluminiumschmelzöfen // Werkstoff Fertigung. 2011. No. 3. P. 39, 40.
14. Mohamed Chaabet, Erwin Dötsch. Steelmaking based on inductive melting // Induction Technology. 2012. No. 1. P. 49 – 58.
15. Лузгин В.И., Петров А.Ю. Эффективные системы и методы индукционной плавки металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://reltec.biz> (Дата обращения: 20.01.18 г.).
16. Левшин Г.Е. Научно-технические технологии индукционной плавки в индукторных и электромагнитных тигельных печах // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 3. С. 12 – 21.
17. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». – М.: Норматика, 2018. – 68 с.
18. Пат. 177465 РФ. Индукционная индукторная тигельная печь с кольцевым наборным магнитопроводом / Левшин Г.Е., Левшин А.Г. 2018. Бюл. № 6.
19. Левшин Г.Е., Матюшков И.Л. Литье в магнитные формы. – Барнаул: изд. АлтГТУ, 2006. – 688 с.
20. Пат. 177475 РФ. Индукционная индукторная тигельная печь с проволочным индуктором / Левшин Г.Е., Левшин А.Г. 2018. Бюл. № 6

Поступила в редакцию 23 мая 2018 г.

После доработки 10 ноября 2018 г.

Принята к публикации 20 ноября 2018 г.

WAYS TO IMPROVE INDUCTION CRUCIBLE FURNACES

G.E. Levshin

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Altai Territory, Russia

Abstract. Analysis of the main drawbacks caused by increased walls thickness of a lined crucible, presence of tubular copper single-layer inductor cooled from inside with standard water and absence or presence of core I-shaped magnetic circuits arranged around it forming a discrete ferromagnetic screen, was made for modern induction crucible furnaces. The first drawback is that a significant part of working electromagnetic flow F_{work} is not used for effective heating, since it passes along the non-conductive lining of crucible, and not along the cage. Therefore, only 38.5 – 57.0 % of the flow F_{work} is effectively used. The second drawback is increased cost and complexity of manufacturing of inductor coils from a special copper tube, which vibrate at twice the frequency, creating noise and weakening design of the furnace. Such inductors are characterized by reduced electrical efficiency and increased cost of preparation and cooling of conditioned water in systems that occupy an area several times greater than the area of furnace itself. The third drawback leads to the fact that a significant part of electromagnetic scattering flow of the F_{consumpt} does not participate in heating of charge and melt, but heats conductive elements of furnace, including surrounding magnetic inductor. Irrational use of total flow F , created by inductor, reduces its efficiency to almost 19 – 30 %, and the power factor $\cos\phi$ to 0.03 – 0.10 and increases energy consumption. To reduce or eliminate disadvantages, three ways of improving these furnaces are proposed and justified: reducing thickness of crucible wall with its simultaneous hardening by installing a cylindrical shell between the crucible and the inductor, surrounding the inductor with an annular magnetic circuit and using a single or multiwire inductor instead of a tubular one. Combination of cylindrical shell, annular magnetic circuit, as well as the upper and lower plates of the furnace frame can form an annular closed cavity to accommodate wire inductor and circulating refrigerant, cooling the inductor and the magnetic circuit. As a result of the study, new design of induction crucible furnace with wire inductor and ring-type magnetic circuit developed at AltSTU is proposed, substantiated and patented. Based on experimental determination of effectiveness of the proposed structural elements, conclusion is made about the prospects for further research.

Keywords: inductor crucible furnaces, cylindrical shell, wire inductor, ring type magnetic core, cooling of the inductor and magnetic core.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-97-102

REFERENCES

1. Farbman S.A., Kolobnev I.F. *Induktsionnye pechi dlya plavki metallov i splavov* [Induction furnaces for metals and alloys melting]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 496 p. (In Russ.).
2. *Issledovanie i razrabotka induktsionnykh plavil'nykh pechei* [Research and development of induction melting furnaces]. Prostya-kov A.A. ed. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 105 p. (In Russ.).
3. Romanov L.M., Boldin A.N., Grablev A.N., Mikhailov D.P. *Elektricheskie pechi dlya vyplavki chernykh i tsvetnykh splavov* [Electric furnaces for melting ferrous and non-ferrous metals]. Moscow: izd. MGIU, 2007, 104 p. (In Russ.).
4. Piterek Robert. A career in the service of inductive melting. *Casting Plant and Technology International*. 2013, no. 3, pp. 18–21.
5. *Sovremennye plavil'nye agregaty. Sb. ITTsM "Metallurg"* [Modern melting units. ITTsM "Metallurg" Digest]. Moscow: Metallurg-kon-salting, 2014, 370 p. (In Russ.).
6. Vellen Tanja. The bright word of metals shines brighter than ever. *Casting Plant and Technology International*. 2015, no. 3, pp. 46, 47.
7. Piterek Robert. Production flexibility combats declining batch sizes. *Casting Plant and Technology International*. 2015, no. 3, pp. 40–44.
8. *Site Inductotherm Europe Ltd*. Electronic resource. Available at URL: <http://www.inductotherm.co.uk>. (Accessed: 2.02.18).
9. *Site Ajax Tocco Magnethermic Corporation*. Electronic resource. Available at URL: <http://www.ajaxtocco.com>. (Accessed: 12.03.18).
10. *Site Otto Junker GmbH*. Electronic resource. Available at URL: <http://www.otto-junker.com>. (Accessed: 12.03.18).
11. *Site Induction Technology Corporation*. Electronic resource. Available at URL: http://www.inductiontech.com/Index.html#top_of_page (Accessed: 12.05.18).
12. *Site ABP Induction Systems GmbH*. Electronic resource. Available at URL: <http://www.abpinduction.com>. (Accessed: 12.05.18).
13. Mehr Energieeffizienz für Aluminiumschmelzöfen. *Werkstoff Fertigung*. 2011, no. 3, pp. 39, 40.
14. Mohamed Chaabet, Erwin Dötsch. Steelmaking based on inductive melting. *Induction Technology*. 2012, no. 1, pp. 49–58.
15. Luzgin V.I., Petrov A.Yu. *Effektivnye sistemy i metody induktsionnoi plavki metallov* [Effective systems and methods of induction melting of metals]. Electronic resource. Available at URL: <http://reltec.biz>. (Accessed 20.01.18). (In Russ.).
16. Levshin G.E. High technology induction melting in induction and electromagnet crucible furnaces. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2016, no. 3, pp. 12–21. (In Russ.).
17. *SanPiN 2.2.4.3359-16 "Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochikh mestakh"* [Health and hygiene rules and standards SanPiN 2.2.4.3359-16 "Sanitary and epidemiological requirements for physical factors at the workplace"]. Moscow: Normatika, 2018, 68 p. (In Russ.).
18. Levshin G.E., Levshin A.G. *Induktsionnaya induktornaya tigel'naya pech's kol'tsevykh nabornym magnitoprovodom* [Induction crucible furnace with ring type magnetic conductor]. Patent RF no. 177465. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 6. (In Russ.).
19. Levshin G.E., Matyushkov I.L. *Lit'e v magnitnye formy* [Magnetic casting forms]. Barnaul: izd. AltGTU, 2006, 688 p. (In Russ.).
20. Levshin G.E., Levshin A.G. *Induktsionnaya induktornaya tigel'naya pech's provolochnym induktorom* [Induction crucible furnace with wire inductor]. Patent RF no. 177475. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 6. (In Russ.).

Information about the author:

G.E. Levshin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Engineering Technology and Equipment" (levshing@mail.ru)

Received May 23, 2018
Revised November 11, 2018
Accepted November 20, 2018