



УДК 621.365.5:669.187.2

DOI 10.17073/0368-0797-2023-4-492-497



Оригинальная статья
Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕЧЕЙ С С-ОБРАЗНЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Г. Е. Левшин

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

levshing@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности конструкции, методика и результаты исследования 10 индукционных электромагнитных тигельных печей с С-образным магнитопроводом (МПр), сердечник которого охватывают витки электрической катушки (ЭК) малого объема (примерно до 14,56 дм³). В печи применяют наборный МПр из использованных трансформаторных пластин с рабочим объемом примерно 28,5 – 30,8 дм³, напряжение 380 – 390 В, частоту 50 Гц, конденсаторную батарею (КБ), количество витков $w = 23 – 50$ медного или алюминиевого провода. Охлаждаемая водой ЭК размещена в резиновом резервуаре и создает горизонтальный электромагнитный поток с индукцией 70 мТл, который усиливается МПр и направляется за пределы ЭК в больший рабочий объем (примерно 30,7 дм³) между его полюсами с индукцией примерно до 100 мТл. При размещении стального тигля в объеме индукция возрастает до 125 – 150 мТл и экспериментальная печь ЭМС-30,7-23А мощностью 44 кВт·А позволяет за 65 мин расплавить 21 кг силумина со скоростью 10 °С/мин. В печи сопротивления САТ-0,16 мощностью 40 кВт аналогичный процесс протекает за 2 ч. При сильном сжатии пластин МПр шум уменьшается с 80 – 85 до 40 – 48 дБ. Для повышения эффективности печи предлагается использовать полюсные пластины шириной 155 мм; минеральную вату в теплоизоляции тигля, подстроечные конденсаторы в КБ, ЭК из медного кабеля. Целесообразно для плавки высокотемпературных сплавов подключить рассматриваемую печь к повышающему напряжению трансформатору, чтобы увеличить плотность тока с 3,7 до допускаемой 20 А/мм², мощность в контуре ЭК – КБ, индукцию. Предлагается для определения области применения продолжить исследования электромагнитных печей, изготовленных из дешевого трансформаторного лома.

Ключевые слова: индукционная электромагнитная плавильная печь, магнитопровод, электрическая катушка, магнитодвижущая сила, конденсаторная батарея, тигель

Для цитирования: Левшин Г.Е. Исследование электромагнитных печей с С-образным магнитопроводом. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(4):492–497. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-492-497>

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC FURNACES WITH A C-SHAPED MAGNETIC CORE

G. E. Levshin

Polzunov Altai State Technical University (46 Lenina Ave, Barnaul, Altai Territory 656038, Russian Federation)

levshing@mail.ru

Abstract. The paper describes design features, methodology and results of the study of 10 induction electromagnetic crucible furnaces with a C-shaped magnetic core (MC). The core is covered by turns of an electric coil (EC) of small volume up to ~14.56 dm³. The furnaces have MC from a set of used transformer plates with a working volume of ~28.5 – 30.8 dm³, a capacitor bank (CB), the number of turns $w = 23 – 50$ of copper or aluminum wire, voltage 380 – 390 V, frequency 50 Hz. The water-cooled EC is placed in a rubber tank and creates a horizontal electromagnetic flow with induction of ~70 mT, which is amplified by MC and directed beyond EC into a larger working volume of ~30.7 dm³ between its poles with induction up to ~100 mT. When placing a steel crucible in the volume, induction increases up to 125 – 150 mT and the experimental furnace EMC-30.7-23A with a capacity of 44 kVA allows melting 21 kg of silumin at a speed of 10 °C/min in 65 min, which is faster than in the resistance furnace CAT-0.16 with a power of 40 kW in 2 h. With strong compression of MC plates, the noise decreases from 80 – 85 to 40 – 48 dB. To increase the furnace efficiency, it is proposed to use pole plates with a width of 155 mm, mineral wool in the thermal insulation of the crucible, tuning capacitors in CB, and EC from copper cable. For melting of high-temperature alloys, it is advisable to connect this furnace to a step-up transformer in order to increase the current density from 3.7 to the permissible 20 A/mm², power in the EC – CB circuit, and EC induction. The authors suggest to continue research on electromagnetic furnaces made from cheap transformer scrap to determine the scope.

Keywords: induction electromagnetic melting furnace, magnetic circuit, electric coil, magnetomotive force, capacitor bank, crucible

For citation: Levshin G.E. Investigation of electromagnetic furnaces with a C-shaped magnetic core. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4): 492–497. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-492-497>

ВВЕДЕНИЕ

В литейном производстве применяют два типа индукционных плавильных печей:

- тигельные индукторные, создающие вертикальный электромагнитный поток и нередко снабженные внешними стержневыми разомкнутыми магнитопроводами (МПр) *I*-образной формы;

- трансформаторные (канальные) с замкнутым МПр [1; 2].

В 2013 г. запатентованы индукционные тигельные электромагнитные печи с изогнутыми магнитопроводами *O*-, *U*- и *C*-образной конфигурации, создающими горизонтальный рабочий электромагнитный поток (третий тип) [3; 4]. Они существенно отличаются по конструкции, энергетическим и технологическим возможностям от печей первых типов. Сравнение индукционных индукторных и электромагнитных тигельных печей показало ряд преимуществ последних [5; 6]. Они подтверждены при исследовании параметров и технологии плавки алюминиевых и медных сплавов в электромагнитной печи с *U*-образным магнитопроводом [7; 8].

Представляет научный и практический интерес аналогичное исследование работы печи с МПр *C*-образной конфигурации (ЭМС-печь). Она имеет горизонтальный разомкнутый МПр *I* *C*-образной формы с двумя полюсами, среднюю часть (сердечник) которого охватывают витки электрической катушки 4 (ЭК), находящейся в защитном герметичном кожухе 6 для хладагента (рис. 1, *a*). Магнитопровод 1 является корпусом печи, установленным на основании 5 неподвижно или с поворотом. Электрическая катушка 4 и магнитопровод 1 создают усиленный рабочий поток между обращенными друг к другу полюсами, воздействующий на тигель 2

с ванной 3 для шихты, подвешенный на цапфах 7 или установленный на основании 5 (рис. 1, *a*) [3; 4]. Ее работа подробно описана в работах [5; 6].

Близких и подробных технических решений индукционных плавильных тигельных ЭМС-печей, параметров их работы и рациональной области применения в литературных источниках систем Google Scholar и Scopus [7 – 9] не найдено. Не обнаружены они и на сайтах ведущих изготовителей индукционных плавильных печей^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}.

Цель и задачи настоящей работы – исследование конструктивных и рабочих параметров ЭМС-печей при плавке силумина для получения данных об их работе,

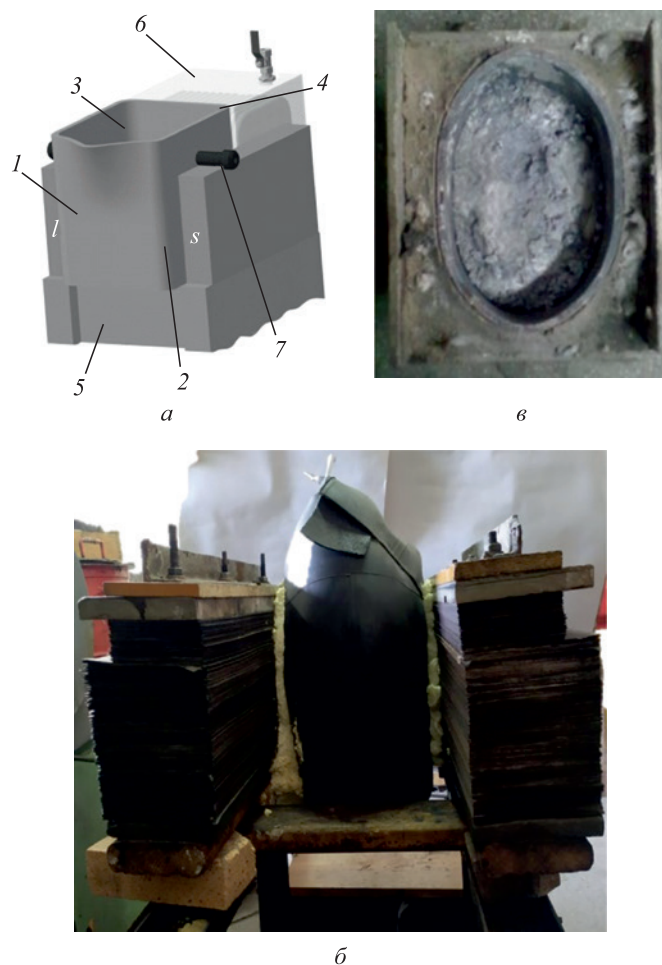


Рис. 1. Схема электромагнитной печи ЭМС (*a*), фото печи (*б*) с гибким резервуаром (без кожуха) и овального тигля (*в*): 1 – МПр; 2 – тигель; 3 – ванна; 4 – ЭК; 5 – основание; 6 – кожух; 7 – цапфы

Fig. 1. Layout of electromagnetic furnace with a C-shaped magnetic core (*a*), photo of the furnace (*b*) with a flexible tank (without shell) and an oval crucible (*в*):

1 – MC; 2 – crucible; 3 – bath; 4 – EC; 5 – base; 6 – shell; 7 – trunnions

¹ Indutherm Erwärmungsanlagen GmbH. URL: <http://www.indutherm.de/ru/> (Дата обращения: 09.02.2023).

² EFD Induction GmbH. URL: <http://www.efd-induction.com/ru/> (Дата обращения: 09.02.2023).

³ Ajax TOCCO Magnethermic GmbH. URL: <http://www.ajaxtocco.de> (Дата обращения: 09.02.2023).

⁴ РЭЛТЕК. URL: <http://www.reltec.biz> (дата обращения 09.02.2023).

⁵ TG Indutionsanlagen GmbH. URL: <http://www.itg-induktion.de> (Дата обращения: 09.02.2023).

⁶ Otto Junker GmbH. URL: <http://www.otto-junker.de> (Accessed 09.02.2023).

⁷ ABP Induction Systems GmbH. URL: <http://www.abpinduction.com/ru/> (Дата обращения: 09.02.2023).

⁸ ABB Process Industries GmbH Giessereien Umformwerke. URL: <http://www.abb.de> (Дата обращения: 09.02.2023).

⁹ Ias Induktions Anlagen Service GmbH CO KG. URL: <http://www.ias-gmbh.de> (Дата обращения: 09.02.2023).

необходимых при проектировании, расчете и определении рациональной области применения.

Опыты проводили на десяти изготовленных печах¹⁰ (рис. 1, б).

Объекты исследования

Магнитопровод печей собран вручную из использованных трансформаторных пластин толщиной 0,35 и 0,40 мм. При этом до высоты полюсов $h_{\text{п}}$ примерно 195 мм использовали широкие пластины (175×615 мм – для сердечника и 155×700 мм – для полюсной части). Для увеличения $h_{\text{п}}$ до 240 мм и рабочего объема $V_{\text{р}}$ печи укладывали слой высотой примерно 45 мм (пластины шириной 55, 90 или 120 мм на полюсную часть и пластины 175 мм – на сердечник). Пластины сжимали между толстыми асбоцементными и деревянными прокладками ремennыми стяжками или стальными шпильками, изолированными электрокартоном (рис. 1, б). Межполюсное расстояние $l_{\text{раб}}$ изменяли от 305 до 330 мм ($h_{\text{п}}/l_{\text{раб}} \approx 0,79$).

Электрическую катушку наматывали вручную на каркас из диэлектрика многожильным медным (М) гибким кабелем типа КГ в резиновой изоляции сечением примерно 78,5 и 130,0 мм² или алюминиевой (А) шинкой сечением 62 мм² в бумажной изоляции (три слоя). Длина ЭК $l_{\text{эк}} = 2,8$ дм, сечение окна – до 5,2 дм², объем полости $V_{\text{эк}}$ до 4,56 дм³. В витках было три или четыре шинки, соединенных вместе клеммным зажимом на выводах ЭК. При охлаждении ЭК проточной водопроводной водой пучок шинок помещали в трубку ХВТ для обеспечения двойной электроизоляции, а саму ЭК – в резиновый резервуар вместимостью 13 дм³. Сечение и количество витков выбрано из условий достижения необходимой индукции и допустимого нагрева ЭК повышенным током, в том числе при напряжении более 390 В. Количество витков w ЭК составляло 28М, 30М, 37М, 50А, 40А, 30А или 23А. Оно влияло на ширину ЭК и, как следствие, на длину $l_{\text{п}}$ полюсов МПР. Резервуар окружен защитным асбоцементным кожухом, что также уменьшало длину $l_{\text{п}}$ полюсов МПР и рабочий объем печи $V_{\text{р}} = h_{\text{п}} l_{\text{п}} l_{\text{раб}}$, дм³ (здесь $h_{\text{п}} l_{\text{п}} = S_{\text{п}}$ – рабочая поверхность полюса печи).

Изготовленные из трансформаторного лома печи обозначали как ЭМС- $V_{\text{р}}$ - w -М (или А):

- ЭМС-24,6-28М, ЭМС-24,6-37М,
- ЭМС-28,2-30М,
- ЭМС-28,7-23А,
- ЭМС-30,7-30А, ЭМС-30,7-40А, ЭМС-30,7-23А,
- ЭМС-30,8-28М, ЭМС-30,8-50А,
- ЭМС-35-50А.

Методика экспериментов

Использовался опыт работы печи с U-образным магнитопроводом [5; 6]. Питали ЭМС-печи однофазным током $I_{\text{эк}}$ ($f = 50$ Гц) от промышленной сети напряжением $U_{\text{пит}} \approx 380 \div 390$ В. Для изучения влияния емкости $C_{\text{кб}}$ конденсаторов на параметры печи их объединили в батарею (КБ) и подключали параллельно ЭК. Емкость $C_{\text{кб}}$ повышали постепенным присоединением старых конденсаторных банок типа КС2 и КМ2 (ГОСТ 1282 – 68) с номинальной емкостью $C = 80 \div 800$ мкФ, фактическая емкость которых могла отличаться. Подстроечные конденсаторы для приближения к резонансу токов $I_{\text{эк}}$ в ЭК и $I_{\text{кб}}$ в КБ отсутствовали.

Применялись стальные цилиндрические тигли круглого и овального сечений, изготовленные из толсто-стенной (8 мм) трубы наружным диаметром 220 мм и кислородного баллона. Их разместили в переносном асбоцементном коробе с двумя видами теплоизоляции: песчано-глинисто-жидкостекольной смесью (рис. 1, в); минеральной ватой и листовым асбестом.

По результатам электроизмерений вычислили магнитодвижущую силу (МДС) ЭК $I_{\text{эк}} w$, плотность тока j , мощности (полную $S_{\text{эк}} \approx S_{L-C}$, циркулирующую в $L-C$ -контуре, активную P и индуктивную Q_L), полное Z и индуктивное x_L сопротивление, коэффициент мощности $\cos \phi$, индуктивность $L_{\text{эм}}$ ЭМС-печи, активный I_a и индуктивный I_L токи по известным формулам электротехники [5; 6; 10].

Рассчитаны интегральные критерии энергоемкости: магнитный $K_{\text{м}} = I_{\text{эк}} w / V_{\text{р}}$, электромагнитный $K_{\text{эм}} = I_{\text{эк}} w / (B_c V_{\text{р}})$ и электрического нагрева $K_{\text{эн}} = S_{\text{эк}} / V_{\text{р}}$ и питания $K_{\text{эл}} = S_{\text{пит}} / V_{\text{р}}$ [5; 6]. Они позволяют сравнивать параметры разных печей.

Температуру слитка силумина АК7 массой 21 кг измеряли прибором ТРМ-1 с термопарой ХА в керамических «бусах», температура фиксировалась без учета повышающих поправок. Температуры верхней и нижней поверхностей сердечника МПР измеряли мультиметром М838 с термопарами ХА (без чехлов), стенок короба с тиглем и станины – ртутными термометрами.

Индукцию на боковых и торцовых поверхностях МПР (с тиглем и без него) измеряли на удалении от него и между полюсами плоским зондом миллитесламетра Ш1-15 в трех горизонтальных и семи вертикальных рядах точек, расположенных на удалении 220 мм от торцов МПР. Из-за быстрого нагрева тигля и опасения повреждения датчика Холла зонд располагался на удалении до 5 мм от правой стороны тигля и правого полюса. Шум измеряли прибором ДТ – 8851/52 и смартфонами при удовлетворительной близости показаний.

Результаты экспериментов и обсуждение

Результаты изменения средних значений токов питания $I_{\text{пит}} = I_{\text{общ}}$, а также $I_{\text{эк}}$ и $I_{\text{кб}}$, циркулирующих в кон-

¹⁰ В работе принимали участие С.Ю. Сергеев, Д.С. Кульдяйкин, А.В. Левагин, В.В. Кондриков, К.А. Мазко, Е.С. Баяндин, А.С. Зиновьев, Р.М. Гайнулин, П.А. Навалихин при поддержке ЗАО «Завод алюминиевого литья» (г. Барнаул).

туре ЭК – КБ ($L - C$), в зависимости от емкости $C_{\text{кб}}$ представлены на рис. 2. Ток $I_{\text{эк}}$ увеличивается с 780 до 912 А, а ток $I_{\text{кб}}$ – примерно до 920 А при емкости $C_{\text{кб}}$ примерно 8134 мкФ (когда эти графики пересекаются). Наиболее интересно снижение тока $I_{\text{пит}}$ примерно с 780 до 113 А при той же емкости $C_{\text{кб}}$. Это приводит к снижению потребляемой из сети мощности с $S_{\text{эк}} = I_{\text{пит}} U_{\text{пит}} = 780 \cdot 390 = 304\,200$ Вт до $S_{\text{пит}} = 113 \cdot 390 = 44\,070$ Вт (примерно в 7 раз). Применяя подстроечные конденсаторы, можно еще уменьшить потребляемую мощность.

Из опытов по нагреву и расплавлению слитка силумина массой 21 кг в ЭМС-печах с разными рабочим объемом V_p , ЭК и тиглями наиболее удачен опыт в печи ЭМС-30,7-23А с овальным тиглем в футеровочной смеси, так как достигнута температура расплава силумина 650 °С за 65 мин со средней скоростью нагрева 10 °С/мин. Высокая скорость нагрева (14 – 19 °С/мин) сохранялась до 30-ой минуты и достигнута температура 519 °С (рис. 3). На 35-ой минуте нагрева скорость снизилась до 6 °С/мин (при 560 °С), а затем до 3 °С/мин. Одной из причин снижения скорости является прогрев стенки короба и возрастающие потери тепла за его пределы. Однако после 60-ой минуты скорость возросла до 6 °С/мин в связи с перегревом расплава.

Сердечник МПР нагревается неравномерно (рис. 3). Нижняя поверхность шириной 175 мм нагревается к концу плавки примерно до температуры 160 °С, а верхняя, перекрещивающаяся с узкими пластинами 120 мм, – до 268 °С. Повышенный нагрев этой части сердечника обусловлен меньшей относительной массой узких пластин.

Нагрев наружных стенок короба практически одинаков и не превышает 170 °С (рис. 3). Его можно уменьшить увеличением толщины (для чего имеется место) или изготовлением футеровки из других малотеплопроводных материалов (пеношамота, минеральной

ваты и другими). В конце плавки «прогорел» стальной тигель и расплав вылился через щели в футеровке и левой стенке короба (в емкость под печью). Щели образовались из-за неоднократных термических деформаций стального тигля, футеровки и асбоцементных стенок. Верх стальной станины нагрелся полем рассеяния примерно до 120 °С.

Такой нагрев всех элементов обеспечили следующие эксплуатационные параметры печи ЭМС-30,7-23А (без тигля):

- $C_{\text{кб}} \approx 8134$ мкФ;
- $I_{\text{эк}} \approx 911$ А; $I_{\text{кб}} \approx 893$ А; $I_{\text{пит}} \approx 113$ А;
- $S_{L-C} \approx 355$ кВ·А; $S_{\text{пит}} \approx 44$ кВ·А; $S_{L-C}/S_{\text{пит}} = 8$;
- $j \approx 3,7$ А/мм²;
- $Z \approx 0,428$ Ом;
- $L_{\text{эм}} \approx 0,001363$ Гн;
- $I_{\text{эк}}^w \approx 20\,953$ А; $H_{\text{ц}} \approx 74\,800$ А/м;
- $B_{\text{ц}} = 94$ мТл; $B_{\text{к}} = 47$ мТл; $B_{\text{эк}} = (B_{\text{ц}} + B_{\text{к}})/2 \approx 70$ мТл;
- $K_{\text{м}} \approx 682,5$ А/дм³;
- $K_{\text{эм}} > 6,825$ А/(дм³·мТл);
- $K_{\text{эн}} > 11,6$ кВ·А/дм³; $K_{\text{эл}} > 1,43$ кВ·А/дм³.

Анализ результатов измерения индукции на поверхностях МПР (без тигля/с тиглем) показывает следующее (рис. 4):

- закономерно повышенная индукция $B_{\text{п}}$ на полюсах МПР (91,0 – 111,2/125 – 150 мТл);
- меньшая индукция на торцовых поверхностях МПР (67,3 – 92,5/65 – 82 мТл);
- еще меньшая индукция на наружных поверхностях МПР (53,7 – 67,1/52 – 69 мТл);
- закономерно самая малая индукция в середине между полюсами (55 – 70 мТ без тигля).

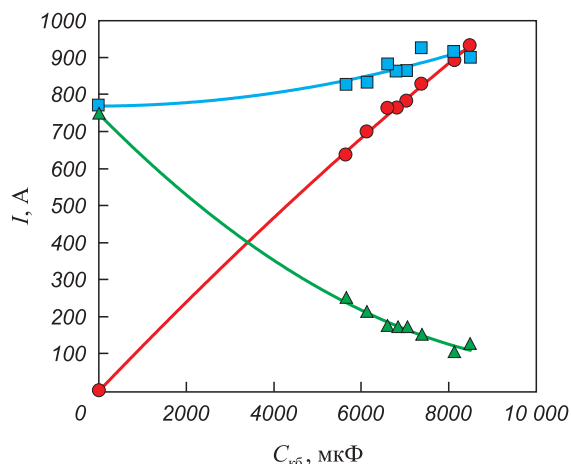


Рис. 2. Зависимость токов $I_{\text{пит}}$ (▲), $I_{\text{эк}}$ (■) и $I_{\text{кб}}$ (●) от емкости $C_{\text{кб}}$ печи ЭМС-30,7-23А

Fig. 2. Dependence of currents of I_{current} (▲), I_{EC} (■) and I_{CB} (●) on capacity C_{CB} of EMS-30.7-23A furnace

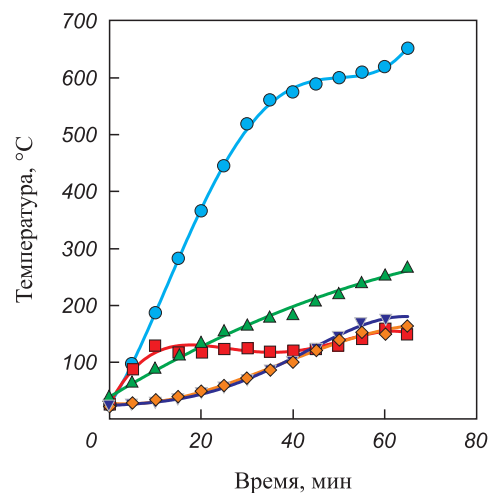


Рис. 3. Зависимость температуры слитка и элементов печи ЭМС-30,7-23А от времени: ● – ТРМ-1; ■ – низ сердечника; ▲ – верх сердечника; ▼ – у тигля слева; ◆ – у тигля справа

Fig. 3. Dependence of temperature of ingot and elements of EMS-30.7-23A furnace on time: ● – TRM-1; ■ – bottom of the core; ▲ – top of the core; ▼ – at the crucible on the left; ◆ – at the crucible on the right

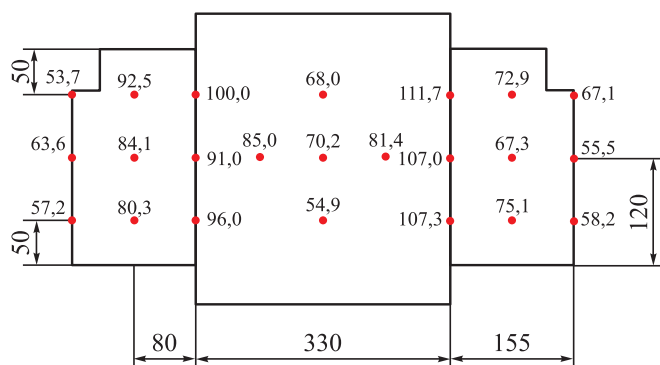


Рис. 4. Схема расположения точек и результаты измерения индукции на поверхности МПР и между его полюсами без тигля

Fig. 4. Layout of points and results of induction measurement on MC surface and between its poles without crucible

Распределение индукции B_c в точках среднего горизонтального сечения (рис. 4) между полюсами без тигля (91 – 85 – 70 – 81,4 – 107 мТл) показывает, что электромагнитное поле неоднородно и имеет горизонтальный градиент 0,6 мТл/мм, направленный от середины $l_{\text{раб}}$ к полюсам.

Индукция $B_{\text{п}}$ примерно 100 мТл на полюсах МПР, ограничивающих объем $V_{\text{р}}$ (примерно 30,7 дм³) и заметно превышает индукцию в ЭК ($B_{\text{эк}} = 70$ мТл), имеющей гораздо меньший объем $V_{\text{эк}}$ (примерно 14,56 дм³), за счет его намагничивания полем ЭК. Индукция поля рассеяния МПР быстро уменьшается с удалением l от него согласно уравнению $B_{\text{рас}} \approx 0,0012l^2 - 0,6987l + 134,88$.

При установке стального тигля диаметром 220 мм индукция $B_{\text{п}}$ на полюсах и между тиглем и полюсами существенно и закономерно возросла (примерно в 1,25 – 1,50 раза). Это объясняется тем, что в незамкнутой магнитной цепи с одним большим воздушным зазором длиной $l_{\text{раб}} = 330$ мм появились ферромагнитное тело диаметром 220 мм и два малых зазора по 55 мм, что снизило общее магнитное сопротивление цепи и привело к повышению индукции на полюсах. Такое повышение индукции весьма полезно при плавке ферромагнитной шихты и подтверждено в работе [11].

При более плотном сжатии пластин МПР снизился уровень шума на расстоянии 600 мм от печи и 200 мм над ЭК с 80 – 85 (при сжатии ремнями) до 40 – 48 дБ (при сжатии шпильками).

Выводы

Экспериментальная печь ЭМС-30,7-23А мощностью 44 кВт позволяет за 65 мин расплавить 21 кг силумина со скоростью 10 °С/мин. В печи сопротивления САТ-0,16 мощностью 40 кВт на это требуется примерно 120 мин (5,4 °С/мин).

Для дальнейшего повышения эффективности нагрева и работы печи целесообразно увеличить отношение $h_{\text{п}}/l_{\text{раб}}$ с 0,79 до 1,0, а ширину полюсных пластин

– до 155 мм, а также использовать минеральную вату в теплоизоляции тигля, подстроечные конденсаторы в КБ и медный кабель в ЭК.

Намагничивание МПР слабым полем с индукцией $B_{\text{эк}} = 70$ мТл в ЭК с малым объемом $V_{\text{эк}}$ (примерно 14,56 дм³) позволяет переместить поле в безопасное место за пределы ЭК и увеличить индукцию $B_{\text{п}}$ примерно до 100 мТл в заметно большем объеме $V_{\text{р}}$ (примерно 30,7 дм³). Это значительно уменьшает размеры ЭК, потребление электроэнергии и повышает надежность ЭК и печи.

Для опробования плавки медных сплавов и чугуна целесообразно подключить печь к повышающему напряжению трансформатору, чтобы увеличить плотность тока 3,7 А/мм² до допускаемой 20 А/мм², что значительно повысит токи $I_{\text{эк}}$, $I_{\text{кб}}$, мощность S_{L-C} , МДС $I_{\text{эк}}w$, индукцию $B_{\text{эк}}$ и $B_{\text{п}}$, а также улучшит критерии $K_{\text{м}}$, $K_{\text{эм}}$, $K_{\text{эн}}$, $K_{\text{эл}}$.

На основе успешных опытов можно получить малые ЭМС-печи из дешевого трансформаторного лома и продолжить исследования для улучшения параметров и определения области применения (для подогрева шихты, плавки разных типов сплавов, выдержки и доводки расплава, доставки тигля на заливку и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Сахаревич А.Н. Индукционные тигельные печи. Конструктивные отличия, эксплуатация. *Литье и металлургия*. 2012;(3):242–245.
Sakharevich A.N. Induction crucible furnaces. Design features, operation. *Lit'e i metallurgiya*. 2012;(3):242–245. (In Russ.).
- Маляров А.И. *Печи литейных цехов*. Москва: Машиностроение; 2014:256.
- Пат. 2536311 РФ. *Электромагнитная тигельная плавильная печь с С-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком* / Левшин Г.Е., Сергеев С.Ю.; заявл. 12.03.2013; опубл. 20.12.2014.
- Левшин Г.Е. Сравнение индукционных печей с вертикальным и горизонтальным электромагнитным потоком. *Металлургия машиностроения*. 2015;(5):2–6.
Levshin G.E. Comparison of induction furnaces with vertical and horizontal electromagnetic flux. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2015;(5):2–6. (In Russ.).
- Левшин Г.Е. О параметрах электромагнитной индукционной печи с U-образным магнитопроводом. *Металлургия машиностроения*. 2017;(2):11–16.
Levshin G.E. Parameters of electromagnetic induction furnace with U-shaped magnetic core. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2017;(2):11–16. (In Russ.).
- Левшин Г.Е. Электротехнология плавки в электромагнитной печи с U-образным магнитопроводом. *Электротехника*. 2018;(5):73–76.
- Левшин Г.Е. Электротехнология плавки в электромагнитной печи с U-образным магнитным контуром. *Электротехника*. 2018;(5):73–76. (In Russ.).
- Качанов А.Н., Качанов Н.А., Коренков Д.А. Классификация и область применения систем низкотемпературного

- индукционного нагрева с разомкнутыми магнитопроводами. *Вестник МЭИ*. 2016;(2):36–40.
- Kachanov A.N., Kachanov N.A., Korenkov D.A. Classification and field of application of low-temperature induction heating systems with the opened magnetic conductors. *Vestnik MEI*. 2016;(2):36–40. (In Russ.).
8. Rudnev V., Loveless D., Cook R.L. *Handbook of Induction Heating*. New York: CRC Press; 2017:772.
<https://doi.org/10.1201/9781315117485>
 9. Lupi S. *Fundamentals of Electroheat*. Switzerland: Springer Int. Publ.; 2017:1–55.
 10. Марченко А.Л., Опачий Ю.Ф. *Электротехника и электроника. Т. 1. Электротехника*. Москва: Инфра-М; 2015:574.
 11. Левшин Г.Е. Намагничивание ферромагнитной шихты при индукционном нагреве. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(2):85–91.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-85-91>
- Levshin G.E. Magnetisation of ferromagnetic charge at induction heating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(2): 85–91. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-85-91>

Сведения об авторе

Information about the Author

Геннадий Егорович Левшин, д.т.н., профессор кафедры машиностроительной технологии и оборудования, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

E-mail: levshing@mail.ru

Gennadii E. Levshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Engineering Technology and Equipment, Polzunov Altai State Technical University

E-mail: levshing@mail.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022

После доработки 20.12.2022

Принята к публикации 09.02.2023

Received 30.08.2022

Revised 20.12.2022

Accepted 09.02.2023