

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КАНАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Ж. ДАВИДЯН, П. МАНУКЯН, А. АРУТЮНЯН

Предложена новая конструкция низкочастотной канальной установки для плавки легкорасплавляемых цветных металлов малой мощности с погруженным магнитопроводом, обладающая преимуществами перед установками традиционных схем. Приведены зависимости мощности и производительности печи, а также сопротивления короткозамкнутого витка металла от конструкции, геометрических размеров ванны, массы и вида металла, что может использоваться для инженерных расчетов.

Электрические способы нагрева и плавки металлов имеют значительные преимущества перед огневыми способами, т.к. при этом значительно уменьшаются потери энергии, уменьшаются отрицательные экологические воздействия на окружающую среду за счёт исключения выбросов продуктов сгорания органического топлива, снижения перегревов, технологический процесс более управляем, может быть автоматизирован и пр.

Наибольшее распространение для электроплавки металлов получили способы индукционного нагрева. Эти способы и установки подразделяются на два принципиально отличных класса.

1. Высокочастотные тигельные установки (рис.1), где выделение тепла происходит от протекания наведённых вихревых токов в металле, помещённом в тигель, а также в самом тигле. Электропитание этих установок выполняется от высокочастотных преобразователей (по схеме “выпрямитель - инвертор”) на частотах до десятков килогерц. Регулирование процесса плавки заключается в регулировании величины электрической мощности, подаваемой в расплав – это обеспечивается изменением частоты на выходе преобразователя. Величина КПД ограничена частотой тока и глубиной проникновения тока в металл – теоретически КПД не превосходит 0,68.

2. Низкочастотные канальные установки (рис.2), где выделение тепла происходит от омического нагрева металла, образующего короткозамкнутый виток в плавильной ванне, от индуктированного в нем тока частотой 50 Гц. Электропитание этих установок выполняется непосредственно от промышленной сети. Регулирование процесса плавки обеспечивается изменением напряжения питания индуктора посредством переключения отпаек питающего трансформатора или посредством тиристорного регулятора напряжения – как это указано на рис.2. Величина КПД теоретически не ограничена, практически достаточно велика – находится на уровне 0,8...0,9.

Индукционные установки непрерывно совершенствуются, повышаются требования к номенклатуре и качеству выплавляемого металла, ужесточаются экологические требования по минимизации отрицательных воздействий на окружающую среду жизнедеятельности человека, а также функционирования технических средств. В последнем случае имеются в виду отрицательные воздействия на питающую сеть – искажения формы кривой напряжения сети и высокочастотные помехи в радиодиапазоне, в том числе – в частотном диапазоне сотовой телефонной связи. Резко увеличивается потребность в установках малых и средних мощностей.

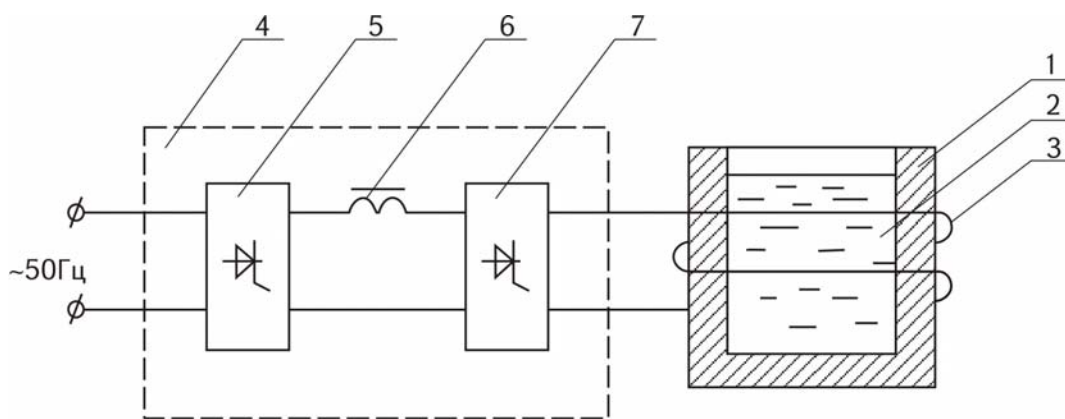


Рис. 1. Структурная схема высокочастотной тигельной установки: 1– тигель; 2 – расплав; 3 – индуктор; 4 – преобразователь частоты; 5 – выпрямитель; 6 – реактор; 7 – инвертор

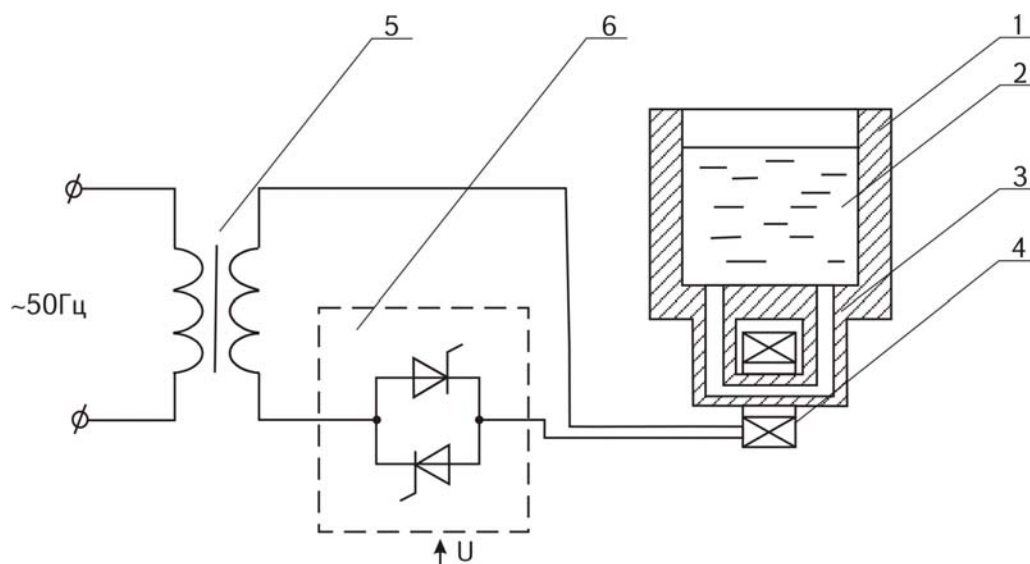


Рис. 2. Структурная схема низкочастотной каналной установки: 1– плавильная ванна; 2 – расплав; 3 – канал; 4 – индуктор (первичная катушка); 5 – трансформатор; 6 – тиристорный регулятор напряжения

Особенно актуальны указанные вопросы для установок малых и средних мощностей – мощностями от нескольких до нескольких десятков киловатт. Это объясняется следующим:

- маломощные установки получили развитие и распространение в относительно последнее время и недостаточно совершенны;

- маломощные установки имеют явно выраженную специфику технико-экономическую и энергетического характера, однако на них распространяют подходы и технические решения, свойственные мощным установкам, что необосновано и дает отрицательные результаты;

- традиционно отдается предпочтение высокочастотным тигельным установкам, что не вполне обосновано, особенно в маломощных установках;

- существующие низкочастотные канальные установки, обладая принципиальными достоинствами вследствие использования промышленной частоты (без высокочастотного преобразования), в то же время имеют существенные недостатки конструктивного характера, затрудняющие их усовершенствование;

- маломощные установки являются объектами индивидуального производства и частного бизнеса, для которых экономические характеристики имеют предпочтительное значение, а этому не уделялось достаточного внимания.

Особенностями индукционных канальных установок являются высокий электрический КПД, не зависящий от заполнения печи расплавом, достаточная для большинства процессов циркуляция расплава внутри ванны при относительно спокойном зеркале металла, а также возможность выполнения печей очень большой емкости. С другой стороны, обязательным условием функционирования индукционных канальных печей является сохранение в печи остатка расплава от предыдущей плавки (обычно 25—30% полной емкости печи) для сохранения начальной проводимости короткозамкнутого витка. Индукционные канальные печи предназначены для непрерывной работы с редкими переходами с одной марки металла на другую.

Следствием этого является ряд следующих преимуществ низкочастотных канальных установок относительно высокочастотных тигельных:

- исключается необходимость использования или создания специальных источников питания – высокочастотных преобразователей, что обеспечивает значительно меньшую стоимость установки;

- абсолютная коммутационная устойчивость источника питания – тиристорного регулятора напряжения, т.к. в нем реализуется принцип естественной коммутации тиристором;

- теоретически высокий КПД, в то время как КПД тигельных высокочастотных установок теоретически ограничен величиной 68% [3,4]; так, удельный расход электроэнергии низкочастотных канальных установок на плавку металла (например, для алюминия) меньше примерно в 1.5 раз, чем высокочастотных тигельных установок;

- значительно меньший уровень искажения напряжения сети и помех по полю, особенно в высокочастотном диапазоне сотовой телефонной связи.

Основными недостатками канальных печей являются: сложность конструкции нагревательного узла с выделенным каналом, недостаточная надежность вследствие расположения первичной катушки в нагретой зоне, а также особые условия пуска печи и их меньшая мобильность по сравнению с тигельными. Поэтому канальные печи, как правило, работают в непрерывном цикле. Печи этого типа хорошо применять для плавки большого количества одного металла или сплава, а также для поддержания температуры уже расплавленного металла.

Как высокочастотные тигельные, так и низкочастотные канальные установки малой мощности, имеют определенные общие недостатки, вызванные тем, что в маломощных установках, как тигельных, так и канальных, дублируются технические решения, используемые в мощных установках. Такой подход не может быть признан целесообразным. Указанные недостатки в установках малой и средней мощности становятся более актуальными вследствие большего количественного распространения и иных условий работы маломощных установок. Научное и

техническое обеспечение маломощных установок плавки металлов требуют своего решения.

Является весьма актуальным использовать преимущества и исключить недостатки низкочастотных канальных установок.

Излагается новая концепция создания канальных установок для плавки металлов малой мощности. Предлагаются конструкция, которая исключает указанные недостатки существующих конструкций, и метод расчета экономичной низкочастотной канальной установки, выполненной на уровне патента на изобретение (рис.3) [1].

Отличие предлагаемой канальной установки от существующих [2-4] заключается в максимальном сопряжении индуктирующего трансформатора и ванны, что приводит к повышению коэффициента передачи мощности, уменьшению потоков рассеяния и повышению КПД с одновременным удалением первичной обмотки из нагретой зоны.

Канальная печь состоит из плавильной ванны, магнитопровода, первичной обмотки, установленной на ярме магнитопровода; другое ярмо и часть стержней погружены в шихту расплавляемого металла. Первичная обмотка, таким образом, находится вне плавильной печи и соединена с регулируемым источником питания промышленной частоты 50Гц.

Вторичной обмоткой является короткозамкнутый виток, который образован шихтой и расплавляемым металлом, которыми охвачены ярмо и часть погруженных стержней.

После подачи напряжения в обмотку в магнитопроводе возникает магнитный поток, который в короткозамкнутом витке из шихты и металла индуцирует ЭДС. Под действием ЭДС по всему объему ванны возникает ток, под действием которого шихта нагревается. Сопротивление короткозамкнутого витка зависит от объема загрузки ванны, расположения стержней, т.е. сечения короткозамкнутого витка, контактного сопротивления кусков шихты, степени расплавления, температуры расплава. В процессе нагрева температура и сопротивление витка динамично изменяются.

При заданных геометрических размерах ванны и магнитопровода индуктора, объема загрузки шихты и производительности (времени расплавления) основным параметром, определяющим все остальные, является активное сопротивление короткозамкнутого витка металла – в качестве вторичной обмотки индукторного трансформатора.

Для определения активного сопротивления короткозамкнутого витка металла на рис.3. приведены расчетные проекции канальной печи.

Короткозамкнутый виток металла состоит из следующих, параллельно соединенных, участков (рис.3):

- два стержневых участка, ограниченных линиями 1-2-7-4 и 2-7-10-3 с сопротивлением каждый R_c (здесь и далее индексы условно указаны строчно);
- два верхних угловых участка, ограниченных линиями 4-6-12-11 и 10-8-16-17 с сопротивлением R_{y1} ;
- два нижних угловых участка, ограниченных линиями 6-12-13 и 8-16-15 с сопротивлением R_{y2} ;
- один донный участок, ограниченный линиями 6-8-15-13 с сопротивлением R_d .

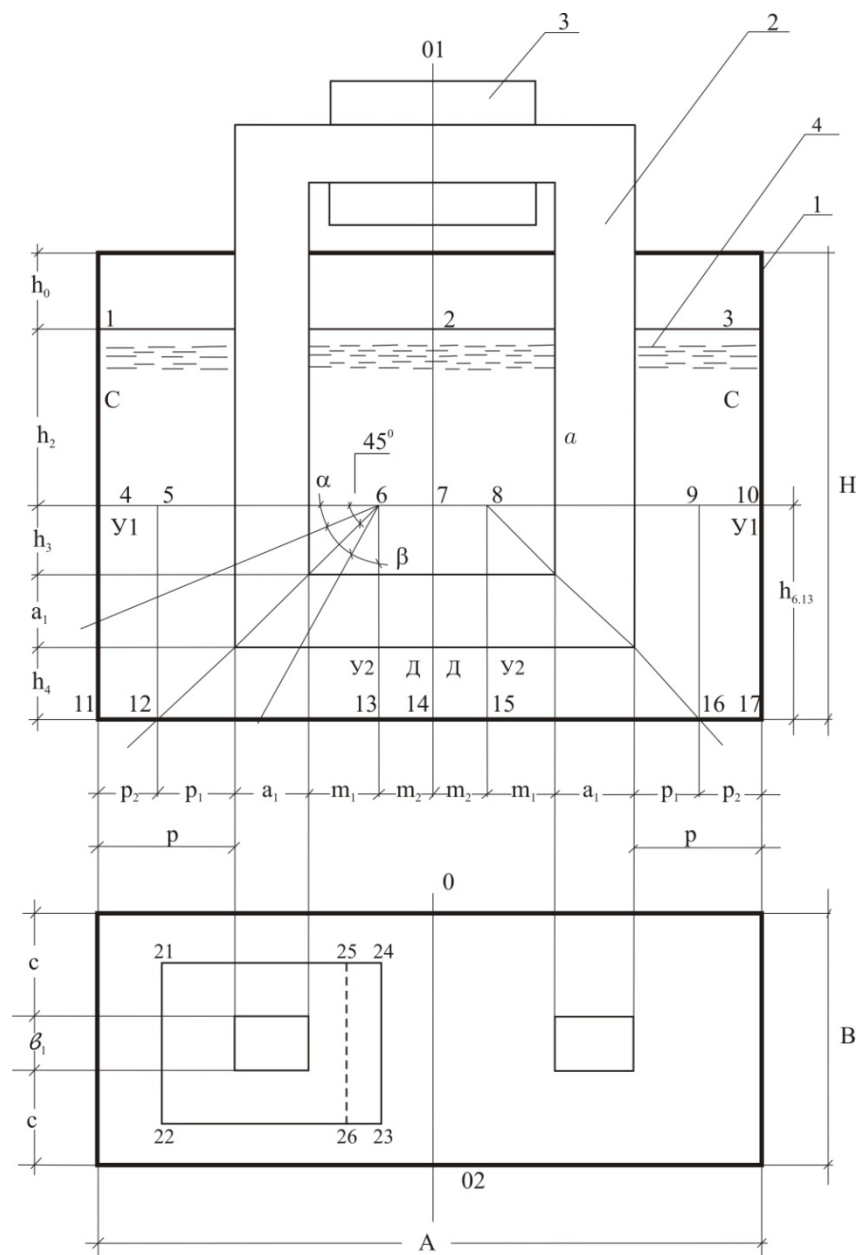


Рис. 3. Общий вид предложенной каналной печи и расчетные проекции каналной печи: 1 - плавильная ванна; 2 - магнитопровод печи; 3 - первичная катушка; 4 - шихта

Принимая короткозамкнутый виток в состоянии монолитного металла при температуре 20°C , сопротивление каждого участка R_{xi} определяется по известному выражению

$$R_{xi} = \rho \frac{l_i}{S_i}$$

где ρ – удельное сопротивление металла при температуре 20°C ; l_i – средняя длина витка на данном участке; S_i – сечение витка на данном участке.

Сопротивление стержневого участка равно:

$$R_c = \rho \left[\frac{2a_1 + (p_1 + p_2) + (m_1 + m_2)}{ch_1} + \frac{b_1 + c}{(p_1 + p_2)h_1} + \frac{b_1 + c}{(m_1 + m_2)h_1} \right],$$

где буквенные обозначения — это линейные размеры на рис.3., a_1 , b_1 — размеры стержня магнитопровода с учетом слоя термоизоляции.

Сопротивление верхнего углового участка определяется интегрированием по угловому положению элементарного сечения (углу α), учитывая, что длина и площадь каждого элементарного сечения находятся в функциональной связи с угловым положением сечения:

$$R_{Y1} = \rho \left[\frac{F_1(a_1, p_1, p_2, m_1)}{F_2(a_1, p_1, p_2, m_1)} + \frac{b_1 + c}{(p_1 + p_2)(h_3 + a_1 + h_4)} + \frac{F_1(a_1, p_1, p_2, m_1)}{F_2(a_1, p_1, p_2, m_1)} + \frac{b_1 + c}{m_1(h_3 + a_1 + h_4)} \right]$$

где

$$F_1(a_1, p_1, p_2, m_1) = \int_0^{45^\circ} \frac{2a_1 + (p_1 + p_2) + m_1}{2 \cos \alpha} d\alpha,$$

$$F_2(a_1, p_1, p_2, m_1) = \int_0^{45^\circ} \frac{c(a_1 + p_1 + p_2 + m_1)}{2} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha} d\alpha.$$

Сопротивление нижнего углового участка определяется аналогичным образом — интегрированием по угловому положению β :

$$R_{Y2} = \rho \left[2 \frac{F_1(a_1, p_1, p_2 = 0, m_1)}{F_2(a_1, p_1, p_2 = 0, m_1)} + \frac{b_1 + c}{p_1(h_3 + a_1 + h_4)} + \frac{b_1 + c}{m_1(h_3 + a_1 + h_4)} \right]$$

Сопротивление донного участка равно:

$$R_g = \rho \left[\frac{b_1 + c}{h_3 m} + \frac{2a_1 + h_3 + h_4}{cm} + \frac{b_1 + c}{h_4 m} \right]$$

Проводимость короткозамкнутого витка металла равна сумме проводимостей указанных параллельно соединенных участков. Оттуда определяется общее активное сопротивление короткозамкнутого витка металла R_x :

$$R_x = \frac{R_c R_{Y1} R_{Y2} R_g}{2(R_{Y1} R_{Y2} R_g + R_c R_{Y2} R_g + R_c R_{Y1} R_g + R_c R_{Y1} R_{Y2})}$$

Сопротивление короткозамкнутого витка выражено, таким образом, через заданные геометрические размеры ванны, индуктора, высоту заполнения ванны металлом и удельное сопротивление металла в холодном состоянии (15°C).

Однако динамическое удельное сопротивление металла и, соответственно, полное сопротивление короткозамкнутого витка в процессе нагрева и плавления резко меняются по следующим причинам.

1. Повышение температуры металла в процессе нагрева приводит к резкому увеличению его удельного сопротивления.

2. Шихта, загружаемая в ванну для нагрева, обычно представляет собой лом кусков металла различных размеров. Активное сопротивление шихты определяется размерами кусков металла и состоянием их контактируемых поверхностей. Сопротивление шихты выше, чем сопротивление монолитного металла вследствие

большей длины пути прохождения тока по кускам металла произвольной формы и наличия контактного сопротивления. По мере нагревания шихта сплавляется, переходя в монолитное состояние. Соответственно сопротивление шихты постепенно уменьшается, становясь при полном расплавлении равным сопротивлению монолитного металла.

Динамическое удельное и полное сопротивления, подверженные указанным изменениям, можно выразить посредством соответствующих коэффициентов следующим образом:

$$\rho_g = K_0 K_t \rho = K_\sigma \rho ; \quad R = K_0 K_t R_x = K_\sigma R_x ,$$

где k_t – тепловой коэффициент, показывающий изменение электрического сопротивления металла при изменении температуры; k_o – объемный коэффициент, показывающий увеличение электрического сопротивления в случае, если металл не монолитен, а заполняет объем в виде лома, т.е. в виде шихты, объем которой превосходит объем монолитного металла; k_σ – динамический коэффициент изменения сопротивления от воздействия обоих указанных факторов.

Тепловой коэффициент представляет известную связь электрического сопротивления и температуры:

$$K_t = \frac{273 + t}{273 + t_0}$$

где t_0 – нормированная температура, при которой известны (определены) удельное и полное сопротивление металла ρ и R_x ; t – температура, при которой определяется динамические удельное и полное сопротивление металла.

Для цинка, нагретого от нормированной температуры $t_0 = 20^\circ C$ до температуры плавления $t = 42^\circ C$, значение теплового коэффициента будет

$$K_{t(\text{цинк})} = 2.36$$

Объемный коэффициент k_o выражается через относительный объем шихты, принимая, что чем больший объем занимает шихта при заданной массе металла, т.е. чем больше куски металла в шихте, тем больше удельное и полное электрическое сопротивление.

Относительный объем шихты представляет собой отношение объема шихты $V_{ш}$ к объему монолитного металла V_m той же массы:

$$K_{ш} = \frac{V_{ш}}{V_m} .$$

Объем металла:

$$V_m = \frac{G}{g} ,$$

где G – масса металла; g – удельная масса металла.

Объем, помещенной в ванну шихты $V_{ш}$ или металла V_m , можно выразить через размеры ванны и высоту шихты (металла) в ванне, за вычетом объема погруженной части магнитопровода (рис.1) следующим образом:

$$V = AB - a_1 b_1 [2(h_1 - h_4) + m] \quad (1)$$

Отсюда может быть выражена высота шихты (или металла) – размер h_1 – необходимая для последующего расчета

$$h_1 = \frac{\frac{V}{a_1 b_1} + m - 2h_4}{\frac{AB}{a_1 b_1} - 2} \quad (2)$$

Объем шихты, таким образом, может быть определен посредством измерения высоты заполнения ванны h_1 по (2). Объем металла может быть определен по его массе (1) или аналогичным образом по (2).

На рис.4 приведена экспериментально определенная зависимость объемного коэффициента k_o от относительного объема шихты $k_{ш}$.

Энергия, необходимая для нагрева и расплавления металла:

$$W = W_n + W_{п} = q_n G(t - t_0) + q_n \cdot G,$$

где W_n – энергия, необходимая для нагревания металла массой G от начальной температуры $t_0 = 20^{\circ}C$ до температуры плавления t – для цинка $t = 420^{\circ}C$; q_n – удельная теплоемкость металла; $W_{п}$ – энергия, необходимая для плавления металла массой G ; q_n – удельная теплота плавления металла.

Мощность, необходимая для нагрева и расплавления металла:

$$P = \frac{W}{T}$$

где T – заданное время для для нагрева и расплавления металла.

Производительность процесса определяется как

$$\Pi = \frac{G}{T}$$

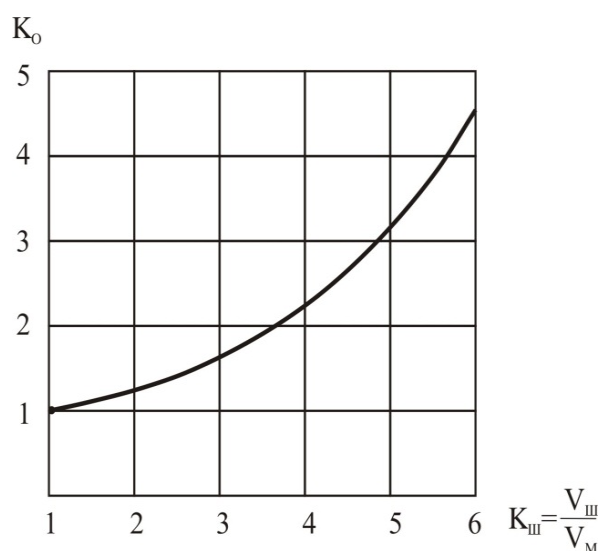


Рис.4. Зависимость объемного коэффициента k_o от относительного объема шихты $k_{ш}$

Температуру погружённой части магнитопровода следует обеспечить не выше точки магнитных превращений (которая для электротехнической стали равна 740°C). Это достигается:

- использованием предложенной конструкции для плавления легкорасплавляемых металлов, температура плавления которых не превосходит точку Кюри (например для цинка, температура плавления которого составляет 420°C), либо
- теплоизоляцией или охлаждением магнитопровода – в случае, если температура плавления выше точки Кюри.

Заключение

1. Маломощные установки электрической плавки легкорасплавляемых цветных металлов целесообразно выполнять по схеме низкочастотных канальных установок с питанием непосредственно от промышленной сети частотой 50 Гц.

2. Предложенная конструкция канальной установки с погружённым магнитопроводом и расчетные соотношения могут быть использованы в инженерной практике.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Патент № 2533 А, F27D 11/06. Индукционная канальная печь. Ж.Д. Давидян,
2. П.С. Манукян, А.М. Арутюнян / 25.06.2011.
3. Патент № 2119 А2, F27D 11/06. Индукционная канальная печь. Ж.Д. Давидян, П.С. Манукян, А.М. Арутюнян / 25.07.2008.
3. Иванова Л.И., Грובה Л.С., Сокунов Б.А. Индукционные канальные печи: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд. УГТУ – УПИ. 2002. – 105 с.
4. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунер А.В. Установки индукционного нагрева / Под ред. А.Е. Слухоцкого. Л.: Энергоиздат. 1981. – 328с.

ЖАН ДАВИДОВИЧ ДАВИДЯН – доктор техн.наук, профессор
E-mail: jan.davidyan@gmail.com