

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

А.И. Глухенький, канд. техн. наук, Ю.М. Гориславец, докт. техн. наук, В.Ю. Максименко, инж., А.В. Токаревский, инж.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

С помощью численного трехмерного моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов выполнен расчетный анализ влияния конструктивных параметров на эффективность однофазного перемешивателя жидкого металла. Исследован перемешиватель с П-образным ферромагнитным сердечником и двумя катушками на стержнях при боковом расположении его относительно ванны отражательной печи для плавки алюминия. В качестве основного критерия эффективности принята усредненная по объему металла скорость его движения, отнесенная к корню квадратному от электромагнитной мощности перемешивателя. В соответствии с этим критерием найдены оптимальные значения длины и высоты сердечника, ширины его стержней, исследовано влияние на эффективность перемешивателя размеров поперечного сечения катушек. С целью предотвращения замешивания в расплав окисных пленок определены возможности уменьшения скорости металла на поверхности без значительного снижения эффективности перемешивателя. Библ. 5, рис. 7.

Ключевые слова: однофазный перемешиватель, жидкий металл, расчетный анализ, конструктивные параметры, критерий эффективности.

Введение. Одним из наиболее действенных способов улучшения качества металла, а также повышения эффективности энергоемких технологических процессов и оборудования при плавке и приготовлении сплавов является перемешивание металлических расплавов. В настоящее время общепризнанно, что такое перемешивание наиболее рационально выполнять электромагнитными средствами, используя силовое воздействие электромагнитного поля на жидкий металл. При этом в качестве электромагнитных перемешивателей (ЭМП) наибольшее практическое применение нашли многофазные индукторы с бегущим магнитным полем [4, 5].

Применительно к отражательным печам для плавки алюминия такие индукторы обычно пристыковываются к одной из боковых стенок ванны печи. В этом случае под действием бегущего поля в ванне печи создается преимущественно одноконтурное (в плане) вихревое течение жидкого металла, которое вовлекает в движение пристеночные слои жидкого металла, оставляя неподвижным металл, находящийся в центральной зоне ванны печи (рис. 1 а). Как показано в работах [2, 3], однофазный индуктор с пульсирующим магнитным полем в этом случае позволяет создать более эффективную двухвихревую

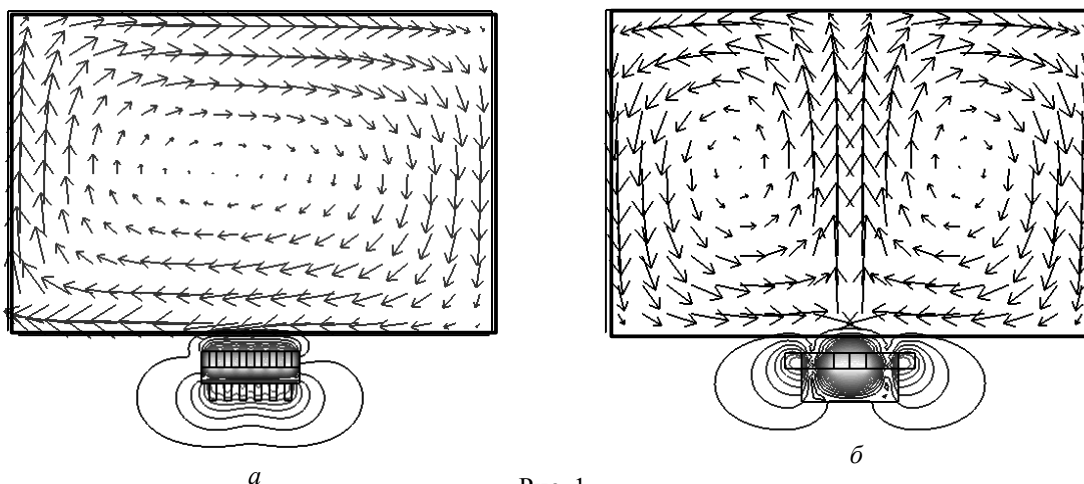


Рис. 1

структуру течения, в соответствии с которой в движение вовлекаются не только пристеночные, но и центральные области жидкого металла (рис. 1 б).

Ранее с помощью численного моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов было показано, что среди конструктивных вариантов однофазных индукторов наиболее рациональной следует считать конструкцию с П-образным шихтованным ферромагнитным сердечником и двумя катушками на его стержнях. Схематическое изображение такого индуктора с обозначением основных конструктивных размеров представлено на рис. 2, где l и h – длина и высота сердечника, b – ширина стержня, h_k и b_k – высота и ширина катушек.

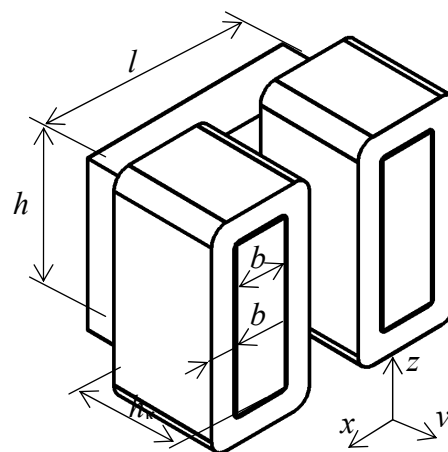


Рис. 2

Целью настоящей работы является расчетное исследование влияния конструктивных размеров на эффективность такого однофазного перемешивателя.

Математическая модель. Учитывая специфику электромагнитных и гидродинамических процессов в системе "ЭМП – ванна с жидким металлом", а именно отсутствие заданных контуров тока во вторичной среде и наличие движения ее по неизвестным заранее траекториям, наиболее приемлемым методом их расчетного анализа является численное моделирование, в соответствие с которым по результатам решения полевой электромагнитной задачи определяется распределение объемных электромагнитных сил в жидком металле, которое в дальнейшем используется в качестве исходных данных при определении поля скоростей в ванне печи.

В настоящее время с учетом наличия и современного состояния программного обеспечения и вычислительной техники при использовании ряда упрощающих допущений является доступным выполнение такого моделирования в трехмерной постановке. С учетом явно выраженной трехмерности физических процессов в рассматриваемой системе указанная постановка необходима в первую очередь для получения достоверных количественных результатов.

Расчет электромагнитного поля проводился путем численного решения дифференциального уравнения для векторного магнитного $\dot{\mathbf{A}}$ и скалярного электрического $\dot{\phi}$ потенциалов

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \dot{\mathbf{A}} + (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla \dot{\phi} = \dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где μ_0 и ε_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума; μ_r и ε_r – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости; σ – удельная электропроводность; ω – угловая частота; $\dot{\mathbf{J}}_{\text{вн}}$ – плотность внешнего (стороннего) тока, распределение которого задано. Электромагнитная задача решалась в линейной постановке.

Распределение скорости расплава определялось посредством численного решения дифференциальных уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения:

$$\rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{эф}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{u} – скорость движения жидкого металла; ρ_m – плотность металла; p – давление; $\eta_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективной динамической вязкости металла, определяемый с помощью k - ε модели турбулентности; \mathbf{f} – удельные электромагнитные силы в жидком металле.

Расчеты выполнялись в безындукционном приближении, т.е. без учета электродвижущих сил, наводимых в жидком металле за счет его движения. Основные расчетные выражения для определения электромагнитных сил и мощностей, а также методика численного трехмерного моделирования электромагнитных и гидродинамических

процессов в системе “ЭМП – ванна с жидким металлом” подробно представлены в работе [1].

Методика исследования. В общем случае к основным факторам, определяющим интенсивность движения металла при электромагнитном перемешивании, следует отнести мощность перемешивателя, частоту тока, физические характеристики жидкого металла, конфигурацию и объем расплава, взаимное расположение расплава и перемешивателя, его конструктивные особенности и параметры. При расчетном анализе влияния конструктивных размеров на эффективность перемешивателя значения остальных определяющих факторов поддерживались неизменными.

Для обеспечения постоянства “гидродинамической нагрузки” конфигурация приводимого в движение расплава принималась постоянной. Рассматривался объем металла с размерами в горизонтальной плоскости 2 на 3 м и высотой 0,5 м. ЭМП располагался вдоль длинной боковой стенки ванны печи симметрично относительно металла как по длине, так и по высоте. Немагнитный зазор между перемешивателем и жидким металлом составлял $\delta = 0,1$ м. Задавались постоянными удельная электропроводность жидкого металла (алюминия) ($\sigma = 4,8 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) и его динамическая вязкость ($\eta = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$). Питание индуктора осуществлялось током промышленной частоты ($f = 50$ Гц).

В качестве параметра, определяющего мощность электромагнитного перемешивателя, рассматривались суммарные ампервитки Iw обеих катушек индуктора. При численном моделировании они с сохранением общей локализации и без внесения существенной погрешности в конечные результаты могут быть представлены средней плотностью тока по поперечному сечению катушек $J = Iw/s_k$. Отметим, что максимальная величина ампервитков для каждого конструктивного варианта перемешивателя ограничивается предельно допустимым средним значением магнитной индукции в сердечнике, которое принято равным 1 Тл.

Поскольку при электромагнитном перемешивании в печах движение расплава носит турбулентный характер, его скорость, пренебрегая нелинейностью магнитных свойств сердечника в обозначенном диапазоне индукций, пропорциональна ампервиткам и соответственно пропорциональна корню квадратному полной мощности индуктора [4]. Это дает возможность выполнять расчеты электромагнитных и гидродинамических процессов при произвольном значении ампервитков с последующим пропорциональным пересчетом параметров, например, исходя из требуемой гидродинамической производительности перемешивателя.

Гидродинамическая эффективность конструктивных вариантов оценивалась с помощью усредненной по всему объему жидкого металла V_m скорости расплава

$$W = \frac{1}{V_m} \int_{V_m} \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} dV. \quad (3)$$

В качестве обобщенного критерия эффективности, учитывающего как гидродинамическую производительность, так и мощность перемешивателя, принималось соотношение $W_S = W/S^{1/2}$, где S – электромагнитная мощность, определяемая по результатам расчета электромагнитного поля в соответствии с выражением

$$S = Abs(\tilde{S}) = Abs(j\omega \frac{1}{2} \int_{V_k} \mathbf{A} \mathbf{J}^* dV). \quad (4)$$

Здесь V_k – объем катушек перемешивателя; \tilde{S} – комплексная электромагнитная мощность, величина которой не учитывает потери в катушках и сердечнике перемешивателя. Действительная часть \tilde{S} для принятого здесь безындукционного приближения равна мощности тепловыделений от вихревых токов в жидком металле. Отметим, что при решении задач в полной магнитогидродинамической постановке, она включает также механическую мощность, затрачиваемую на приведение металла в движение. Мнимая часть \tilde{S} соответствует реактивной мощности перемешивателя (системы).

Для каждого конструктивного варианта выбранный критерий эффективности W_S в отличие, к примеру, от критерия W/S , остается постоянным при любых значениях скорости, ампервитков и мощности, что позволяет рассматривать соотношение W_S как универсальную удельную характеристику системы.

Выбор длины сердечника и ширины его стержней. Расчетный анализ этих параметров выполнялся при следующих фиксированных значениях остальных основных конструктивных размеров перемешивателя: высота сердечника $h = 0,3$ м; высота катушек $h_k = 0,1$ м и их ширина $b_k = 0,05$ м. На рис. 3 в качестве иллюстрации представлены полученные при ампервитках $I_w = 60$ кА (амплитудное значение) расчетные зависимости электромагнитной мощности S , средней магнитной индукции в сердечнике B и усредненной по объему ванны скорости W от относительной длины сердечника перемешивателя l/δ для ширины стержней $b = 0,1$ м (пунктирные линии) и $b = 0,2$ м (сплошные линии). В обоих случаях рассматривалось изменение длины l в диапазоне 0,3 м, начиная с минимально возможной длины $l_{\min} = 2(b + b_k)$. Из представленных графиков следует, что с увеличением длины сердечника электромагнитная мощность перемешивателя S монотонно снижается, в то время как гидродинамическая эффективность перемешивателя (усредненная скорость W) сначала возрастает, а затем уменьшается. При этом для каждой ширины стержней b существует оптимальная длина сердечника $l_{\text{опт}}$, при которой усредненная скорость достигает максимального значения. Так, при $b = 0,1$ м $l_{\text{опт}}$ составляет 0,48 м, а при $b = 0,2$ м – 0,62 м. При указанных выше ампервитках значение средней индукции в сердечнике в первом случае равно 0,76 Тл, а во втором – 0,42 Тл. После приведения к максимально допустимому значению средней индукции, равной 1 Тл, для каждой ширины стержней может быть получено максимально возможное значение усредненной скорости. В первом случае оно составило $W_1 = 0,154$ м/с, а во втором – $W_2 = 0,355$ м/с. При одинаковой усредненной скорости, к примеру $W = 0,1$ м/с, электромагнитная мощность в первом случае составит $S_1 = 174$ кВА, во втором – $S_2 = 139$ кВА. Таким образом, вариант индуктора с шириной стержней 0,2 м обеспечивает не только большую гидродинамическую производительность перемешивателя, но и обладает более высокими удельными характеристиками.

На рис. 4 представлено семейство зависимостей обобщенного критерия эффективности перемешивателя W_S от относительной длины индуктора l/δ для различной ширины стержней b в диапазоне от 0,05 до 0,3 м. Соединяющая экстремумы представленных зависимостей огибающая (пунктирная линия) позволяет найти глобальный максимум критерия W_S , который соответствует длине сердечника $l_{\text{опт}} = 0,67$ м при ширине стержня $b = 0,2$ м.

Размеры катушек. Исследование влияния высоты и ширины катушек на эффективность перемешивателя выполнялось при следующих размерах сердечника: длина $l = 0,7$ м, высота $h = 0,3$ м, ширина стержней $b = 0,2$ м. При расчетном анализе площадь поперечного сечения катушек поддерживалась постоянной: $s_k = b_k \times h_k = 0,01$ м². Диапазон

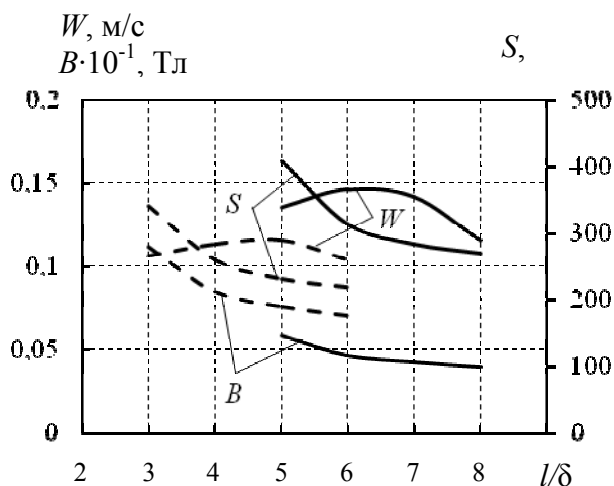


Рис. 3

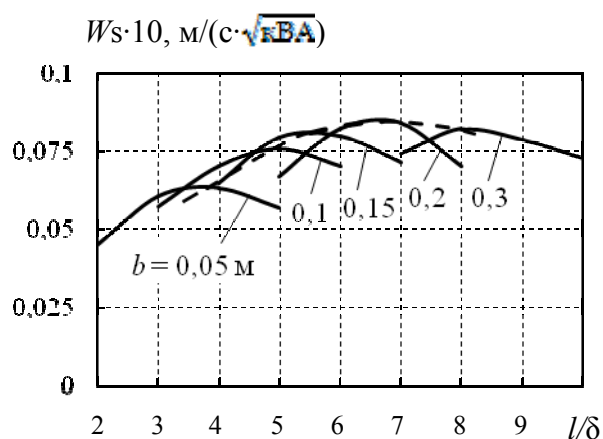


Рис. 4

изменения значений высоты катушек h_k составлял от 0,067 до 0,2 м, а ширины катушек b_k – от 0,15 до 0,05 м. На рис. 5 представлены расчетные зависимости электромагнитной мощности S , усредненной по объему ванны скорости W и критерия эффективности W_S от относительной высоты катушек $h_k/\sqrt{S_k}$. Из приведенных графиков можно сделать вывод, что эффективность перемешивателя с увеличением высоты катушек неуклонно снижается. В то же время следует учитывать, что при уменьшении высоты h_k омические потери в катушке будут расти за счет увеличения средней длины витка. Таким образом, размеры катушек должны выбираться с учетом обоих факторов.

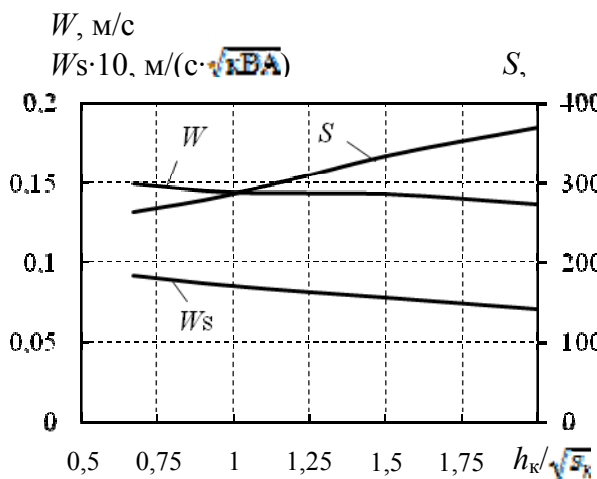


Рис. 5

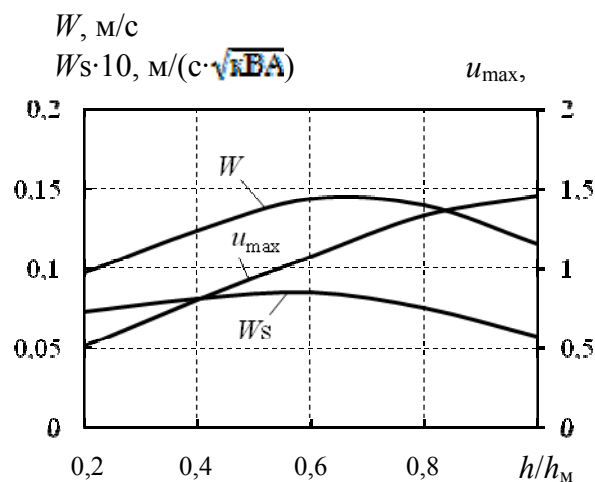


Рис. 6

Высота сердечника. Расчетный анализ влияния высоты сердечника h на эффективность перемешивателя производился путем варьирования ее в диапазоне от 0,1 до 0,5 м. Верхняя граница диапазона совпадала с глубиной металла h_M в ванне. Рассматривался перемешиватель с длиной сердечника 0,7 м, шириной стержней 0,2 м и с размерами катушек $(0,1 \times 0,1) \text{ м}^2$. Зависимость критерия W_S от относительной высоты сердечника h/h_M , которая имеет пологий экстремум при $h/h_M = 0,6$, представлена на рис. 6. Здесь же приведена зависимость максимальной скорости u_{\max} расплава на свободной поверхности (на зеркале) металла, которая с увеличением высоты h монотонно растет. При перемешивании алюминиевых сплавов важно не допустить замешивания в расплав окисных пленок, которое, как полагается в работе [4], происходит при скоростях металла на поверхности, превышающих 0,5 м/с. Уменьшение относительной высоты сердечника с 0,6 до 0,4 в этом случае позволяет снизить скорость на поверхности в 1,35 раза при снижении эффективности перемешивателя W_S всего лишь на 4 %.

Дополнительной возможностью уменьшения скорости на зеркале металла без значительного снижения эффективности перемешивателя является также несимметричное расположение его относительно металла по высоте. Зависимости критерия эффективности W_S и максимальной скорости на поверхности u_{\max} от относительной величины смещения $\Delta h/h_M$ перемешивателя вниз относительно его симметричного положения представлены на рис. 7. Значения, приведенные на рисунке, получены для индуктора с высотой сердечника $h = 0,3$ м. Смещение перемешивателя вниз на $\Delta h/h_M = 0,1$ ($\Delta h = 0,05$ м) приводит к снижению поверхностной скорости в 1,4 раза при уменьшении W_S всего на 4 %.

Расчет показал, что указанные возможности снижения максимальной скорости на поверхности металла действуют независимо. Критерий эффективности W_S перемешивателя с высотой сердечника $h = 0,2$ м и смещением его вниз на $\Delta h = 0,05$ м по отношению к симметрично расположенному перемешивателю с высотой сердечника 0,3 м уменьшается на 8,7 %, а максимальная скорость на поверхности при этом уменьшается в 1,86 раза, с 1,05 до 0,56 м/с.

В заключение представим приведенные к максимально допустимой скорости металла на поверхности (0,5 м/с) расчетные характеристики такого перемешивателя: ампервитки $I_w = 53,3$ кА; средняя индукция в сердечнике $B = 0,47$ Тл; электромагнитная мощность $S = 185,4$ кВА; тепловыделения в жидком металле $P_{мет} = 8,45$ кВт; усредненная по объему ванны скорость металла $W = 0,107$ м/с. При этих ампервитках действующее значение средней плотности тока в сечении катушки будет $J = 1,9$ А/мм², а с учетом коэффициента заполнения сечения катушки медью $k_z = 0,5$ плотность тока в проводниках катушки (меди) составит $J_{Cu} = 3,8$ А/мм², что вызывает необходимость использования принудительного воздушного либо водяного охлаждения катушек перемешивателя.

Отметим, что в данном конструктивном варианте существует дополнительный резерв по уменьшению плотности тока без снижения эффективности перемешивателя, который может быть реализован за счет увеличения ширины катушек. При максимально допустимой ширине катушек $b_k = 0,15$ м их сечение увеличится в 1,5 раза и плотность тока при этом составит $2,5$ А/мм², что уже допускает эксплуатацию перемешивателя с естественным воздушным охлаждением. Поскольку средняя длина витка в этом случае увеличится только в 1,2 раза, то тепловыделения в катушке при том же токе снизятся на 25 %.

Выводы. Предложено оценивать эффективность электромагнитного перемешивателя жидкого металла с помощью обобщенного критерия в виде усредненной по объему ванны печи скорости расплава, отнесенной к корню квадратному от электромагнитной мощности перемешивателя. На основании этого критерия определены оптимальные длина ферромагнитного сердечника и ширина стержней, на которых расположены катушки перемешивателя. Установлены зависимости указанного критерия от соотношения размеров поперечного сечения катушек, высота сердечника и асимметричного смещения его по высоте относительно металла в ванне печи. Полученные зависимости позволяют определить оптимальные (рациональные) геометрические соотношения основных размеров перемешивателя с точки зрения достижения максимальной его эффективности при ограниченной на заданном уровне скорости жидкого металла на свободной поверхности ванны печи.

1. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В. Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 77–84.
2. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 61–66.
3. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Горюк М.С., Слажнев Н.А., Скоробагатько Ю.П. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости // Металл и литье України. – 2008. – № 5.
4. Тур Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1991. – 280 с.
5. *Non ferrous casting: Equipment MHD Technology.* – Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

УДК 621.74: 537.84

О.І. Глухенький, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук, **В.Ю. Максименко**, інж., **А.В. Токаревський**, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

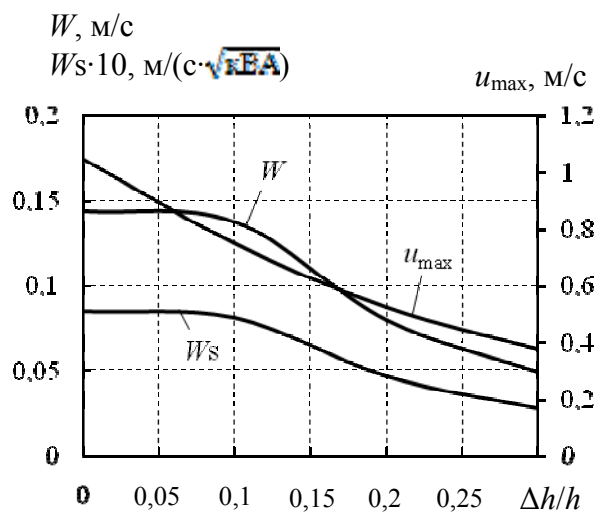


Рис. 7

Розрахункове дослідження впливу конструктивних параметрів на ефективність однофазних перемішувачів рідкого металу

За допомогою чисельного тривимірного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів виконано розрахунковий аналіз впливу конструктивних параметрів на ефективність однофазного перемішувача рідкого металу. Досліджено перемішувач з П-подібним феромагнітним осердям і двома котушками на стержнях при бічному його розміщенні відносно ванни відбивної печі для плавки алюмінію. Як основний критерій ефективності прийнято усереднену за об'ємом металу швидкість його руху, віднесену до кореня квадратного від електромагнітної потужності перемішувача. Згідно з цим критерієм знайдено оптимальні значення довжини і висоти осердя, ширини його стержнів, досліджено вплив на ефективність перемішувача розмірів поперечного перерізу котушок. З метою запобігання замішуванню в розплав окисних плівок визначено можливість зменшення швидкості металу на поверхні без значного зниження ефективності перемішувача. Бібл. 5, рис. 7.

Ключові слова: однофазний перемішувач, рідкий метал, розрахунковий аналіз, конструктивні параметри, критерій ефективності.

O. Hlukhenkiy, Yu. Horyslavets, V. Maksymenko, A. Tokarevskiy

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Computational research of influence of constructive parameters of the efficiency of single-phase liquid metal stirrer

Computational analysis of the influence structural parameters on the efficiency of single-phase liquid metal stirrer was performed by numerical simulation of 3D electromagnetic and hydrodynamic processes. Stirrer with П-shaped ferromagnetic core and two coils on the rods in case of its side location concerning to the bath of reverberatory furnace for melting of aluminum. As the main criteria of effectiveness was accepted averaged over the volume of the metal velocity of its movement referred to the square root of the power of an electromagnetic stirrer. According to this criteria the optimal values of the core length and height, the width of its cores were found, the effect on the efficiency of cross-sectional dimensions stirrer coils was studied. In order to prevent mixing of the oxide films into alloy were determined the possibility of reducing the velocity of the metal on the surface without a significant reduction in the effectiveness stirrer. References 5, figures 7.

Key words: single-phase stirrer, liquid metal, computational analysis, structural parameters, criteria of effectiveness.

Надійшла 16.06.2014

Received 16.06.2014